

**Interprétation
des analyses foliaires
réalisées dans les
102 peuplements
du réseau de 1993 à 1997
et premières évaluations
interdisciplinaires**

●
Décembre 1999



Ce document est à citer sous la forme suivante :
CROISE L., CLUZEAU C., ULRICH E., LANIER M., GOMEZ A., 1999 : RENECOFOR -
Interprétation des analyses foliaires réalisées dans les 102 peuplements du réseau de 1993 à 1997 et
premières évaluations interdisciplinaires. Editeur : Office National des Forêts, Département Recherche
et Développement, ISBN 2 - 84207-189 - 1, 413 p.

ERRATUM - PREAMBULE - ERRATUM

L'échantillonnage foliaire a nécessité la participation active de très nombreux acteurs à toutes les étapes du projet : définition des méthodes d'échantillonnage et d'analyses, prélèvements annuels, pré-traitement des échantillons, analyses chimiques, conception et gestion de la base de données.

Il nous est donc particulièrement agréable de remercier les personnes ayant contribué à la réussite de cette tâche.

Il s'agit d'abord des ingénieurs et techniciens des Sections Techniques Interrégionales (STIR) du Département Recherches et Développement de l'Office National des Forêts, très fortement impliqués sur le terrain :

Samuel	AUTISSIER	Laurent	DELANNOY	Jean	KHELIFA
Thierry	BARATEAU	Christian	DEMOLIS	Philippe	LANDREAU
Jacques	BAUBION	Philippe	DESPLANCHES	Dominique	LECLERC
Jean-Claude	BIGET	Christophe	DUFOUR	Pierre-Jean	MOREL
Philippe	BOURDENET	Jean-Michel	DUMAS	Loïc	NICOLAS
Catherine	CHATON	Jacques	FAY	Jérôme	PIAT
Gérard	COLIN	Pascal	FELIX	Brigitte	PILARD-LANDEAU
Didier	CORNEVIN	Didier	FRANÇOIS	Claudine	RICHTER
Bernard	COUHERT	Jean-Paul	GUYON	Jean-Claude	SAORIN
Pascal	DELON	Pascal	JARRET	Thierry	SARDIN
Philippe	DEMARCO	Benoît	JACQUEMIN		

Les responsables et suppléants de la plupart des 102 placettes permanentes ont assez souvent prêté assistance aux ingénieurs et techniciens lors des prélèvements sur le terrain.

Les personnes suivantes sont particulièrement remerciées d'avoir relu le projet de ce document et d'avoir contribué avec leurs remarques critiques à l'améliorer pour la publication :

- Monsieur Maurice BONNEAU (directeur de recherche en retraite, INRA-Nancy, Equipe Cycle Biogéochimique)
- **Monsieur André CLEMENT (ingénieur de recherche, INRA-Nancy, Unité d'Ecophysiologie Forestière et Unité d'Analyses Minérales)**
- Monsieur Jean-Luc DUPOUEY (directeur de recherche, INRA-Nancy, Equipe Phytoécologie)
- Monsieur Pierre MONTPIED (ingénieur de recherche, INRA-Nancy, Unité d'Ecophysiologie Forestière)
- Monsieur Quentin PONETTE (enseignant-chercheur, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Département des Sciences du Milieu et de l'Aménagement, Belgique)
- Monsieur Bernard ROMAN-AMAT (chef du département Recherche et Développement, ONF, Fontainebleau)

De multiples discussions avec Messieurs Alain BRÊTHES et Pascal JARRET ont également aidé à apporter aux auteurs des idées enrichissantes, au fur et à mesure de la progression du travail.



RENECOFOR

INTERPRETATION DES ANALYSES FOLIAIRES REALISEES DANS LES 102 PEUPLEMENTS DU RESEAU DE 1993 A 1997 ET PREMIERES EVALUATIONS INTERDISCIPLINAIRES

Auteurs : Luc CROISE¹
Catherine CLUZEAU^{1,2}
Erwin ULRICH¹
Marc LANIER¹
Alain GOMEZ³

Programme soutenu financièrement par :

Union Européenne, DGVI
Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt
Office National des Forêts

¹ Office National des Forêts, Département Recherche et Développement, Boulevard de Constance,
77300 Fontainebleau ; Tél. : +33 (0) 1 60 74 92 25, Fax : +33 (0) 1 64 22 49 73,
E-mail : dte5onf@calvanet.calvacom.fr

² actuellement : Inventaire Forestier National, Echelon de Nancy, ENGREF,
14 rue Girardet, 54042 Nancy Cedex ; Tel. : +33 (0) 3 83 30 99 33

³ INRA-Bordeaux, Laboratoire d'Etude et de Recherches Méthodologiques en Analyses Végétales et
Environnementales (LERMAVE), 71 avenue Edouard Bourleaux, BP 81,
33883 Villenave d'Ornon Cedex ; Tél. : +33 (0) 5 56 84 30 71

Décembre 1999

PREAMBULE

L'échantillonnage foliaire a nécessité la participation active de très nombreux acteurs à toutes les étapes du projet : définition des méthodes d'échantillonnage et d'analyses, prélèvements annuels, pré-traitement des échantillons, analyses chimiques, conception et gestion de la base de données.

Il nous est donc particulièrement agréable de remercier les personnes ayant contribué à la réussite de cette tâche.

Il s'agit d'abord des ingénieurs et techniciens des Sections Techniques Interrégionales (STIR) du Département Recherches et Développement de l'Office National des Forêts, très fortement impliqués sur le terrain :

Samuel	AUTISSIER	Laurent	DELANNOY	Jean	KHELIFA
Thierry	BARATEAU	Christian	DEMOLIS	Philippe	LANDREAU
Jacques	BAUBION	Philippe	DESPLANCHES	Dominique	LECLERC
Jean-Claude	BIGET	Christophe	DUFOUR	Pierre-Jean	MOREL
Philippe	BOURDENET	Jean-Michel	DUMAS	Loïc	NICOLAS
Catherine	CHATON	Jacques	FAY	Jérôme	PIAT
Gérard	COLIN	Pascal	FELIX	Brigitte	PILARD-LANDEAU
Didier	CORNEVIN	Didier	FRANÇOIS	Claudine	RICHTER
Bernard	COUHERT	Jean-Paul	GUYON	Jean-Claude	SAORIN
Pascal	DELON	Pascal	JARRET	Thierry	SARDIN
Philippe	DEMARCO	Benoît	JACQUEMIN		

Les responsables et suppléants de la plupart des 102 placettes permanentes ont assez souvent prêté assistance aux ingénieurs et techniciens lors des prélèvements sur le terrain.

Les personnes suivantes sont particulièrement remerciées d'avoir relu le projet de ce document et d'avoir contribué avec leurs remarques critiques à l'améliorer pour la publication :

- Monsieur Maurice BONNEAU (directeur de recherche en retraite, INRA-Nancy, Equipe Cycle Biogéochimique)
- Monsieur Jean-Luc DUPOUEY (directeur de recherche, INRA-Nancy, Equipe Phytoécologie)
- Monsieur Pierre MONTPIED (ingénieur de recherche, INRA-Nancy, Unité d'Ecophysiologie Forestière)
- Monsieur Quentin PONETTE (enseignant-chercheur, Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Département des Sciences du Milieu et de l'Aménagement, Belgique)
- Monsieur Bernard ROMAN-AMAT (chef du département Recherche et Développement, ONF, Fontainebleau)

De multiples discussions avec Messieurs Alain BRÊTHES et Pascal JARRET ont également aidé à apporter aux auteurs des idées enrichissantes, au fur et à mesure de la progression du travail.

SOMMAIRE

RESUME.....	i
ABSTRACT.....	iii
ZUSAMMENFASSUNG.....	v
INTRODUCTION.....	1
OBJECTIFS et PLAN du RAPPORT.....	5
PREMIERE PARTIE: MATERIELS ET METHODES.....	8
1. Echantillonnage.....	8
1.1. Périodicité et période d'échantillonnage.....	8
1.1.1. Ecart par rapport aux périodes de prélèvement.....	8
1.1.2. Ecart entre deux dates de prélèvements successifs.....	8
1.2. Arbres échantillonnés.....	10
1.2.1. Changements d'arbres.....	12
1.3. Echantillon foliaire.....	13
1.3.1. Choix des rameaux.....	13
1.3.2. Directions de prélèvement.....	13
1.3.3. Prélèvement des feuilles ou des aiguilles.....	14
1.3.4. Constitution de l'échantillon.....	15
1.3.5. Echantillon composite, méthodes, avantages et limitations.....	15
1.3.6. Problèmes rencontrés lors des prélèvements.....	16
2. Préparation des échantillons pour l'analyse.....	18
2.1. Procédure générale.....	18
2.2. Test de lavage des échantillons.....	18
2.2.1. Protocole.....	18
2.2.2. Résultats.....	19
2.2.3. Conclusions.....	19
3. Analyse des échantillons foliaires.....	22
3.1. Matériel et techniques analytiques.....	22
3.2. Calculs, contrôle de qualité et édition des résultats.....	25
3.3. Méthodes analytiques.....	26
3.3.1. Précautions d'ordre général concernant l'analyse élémentaire.....	26
3.3.2. Procédures analytiques relatives à la détermination des éléments.....	26
3.3.3. Dosages élémentaires.....	29
3.3.4. Calculs.....	31
3.3.5. Contestations.....	31
3.4. Résultats du suivi de l'assurance qualité.....	31
3.4.1. Macronutriments.....	31
3.4.2. Micronutriments.....	33
3.5. Conclusions.....	37
DEUXIEME PARTIE: ETUDE DES TENEURS, DES MINERALOMASSES^{100f(1000a)} FOLIAIRES ET DE LA MASSE FOLIAIRE^{100f(1000a)}.....	39
1. Introduction.....	39
2. Analyse des teneurs foliaires en nutriments de la masse foliaire ^{100f(1000a)} et de la minéralomasse ^{100f(1000a)}	39
2.1. Masse foliaire ^{100f(1000a)}	39
2.2. Teneurs en macroéléments.....	40
2.3. Teneurs en microéléments.....	43
2.4. Minéralomasses ^{100f(1000a)}	44
2.5. Conclusions.....	44
3. Comparaison des teneurs foliaires aux seuils de référence.....	45
3.1. Seuils européens.....	45
3.2. Seuils indicatifs ^{Fr}	49
3.2.1. Résultats par élément et par espèce.....	51
3.2.2. Placettes dont les teneurs foliaires sont inférieures au seuil de carence ou au seuil critique.....	60
3.3. Conclusions.....	64

4. Relations entre éléments et avec la masse foliaire ^{100f (1000a)}	65
4.1. Etude des corrélations	65
4.1.1. Corrélations entre la masse foliaire ^{100f (1000a)} et les teneurs en nutriments	65
4.1.2. Corrélations entre éléments	68
4.2. Rapport des teneurs foliaires	69
5. Sources de variabilité des teneurs foliaires en nutriments	72
5.1. Variabilité intraplacette	72
5.1.1. Teneurs et masse foliaire ^{100f (1000a)}	72
5.1.2. Minéralomasses ^{100f (1000a)}	74
5.2. Variabilité interplacette et interannuelle	74
5.2.1. Coefficients de variation interplacette et interannuel	74
5.2.2. Analyse de variance à deux facteurs "année" et "placette"	78
5.3. Quel effectif d'arbres par placette pour quelle précision?	81
5.3.1. Nombre d'arbres par placette	81
5.3.2. Classement des nutriments selon les effectifs nécessaires par placette	82
5.3.3. Précision des moyennes des teneurs foliaires à l'échelle de la placette	83
5.4. Conclusions	85
5.4.1. Ordres de grandeur et importance relative des différentes sources de variation	86
5.4.2. Différences de variabilité entre macro- et micronutriments	87
5.4.3. Différences de variabilité entre essences	91

TROISIEME PARTIE: RELATIONS ENTRE LES ELEMENTS FOLIAIRES, LES ELEMENTS ECHANGEABLES DANS LE SOL, L'ETAT SANITAIRE ET LA CROISSANCE DES ARBRES

1. Nutriments foliaires et éléments échangeables dans le sol	92
1.1. Introduction	92
1.2. Etude des régressions entre les nutriments foliaires et les éléments échangeables dans le sol	92
1.3. Teneurs foliaires en fonction des teneurs en éléments échangeables dans le sol	94
1.3.1. Analyse globale: feuillus, résineux	94
1.3.2. Analyse par essence	96
1.4. Teneurs foliaires en fonction des stocks en éléments échangeables dans le sol	98
1.4.1. Analyse globale: feuillus, résineux	98
1.4.2. Analyse par essence	100
1.5. Minéralomasse ^{100f (1000a)} en fonction des teneurs en éléments échangeables dans le sol	101
1.6. Minéralomasses ^{100f (1000a)} en fonction des stocks en éléments échangeables dans le sol	102
1.7. Comparaison de la qualité des régressions selon les régresseurs	103
1.8. Discussion et conclusion	105
1.8.1. Nutriments foliaires et éléments dans le sol: intensité des relations?	107
1.8.2. Validité des relations et améliorations possibles	109
1.8.3. Autres variables explicatives	112
1.8.4. Conclusions	113
2. Défoliation et nutriments foliaires	115
2.1. Introduction	115
2.2. Défoliation l'année (n) et nutriments foliaires l'année (n)	116
2.3. Défoliation l'année (n) et nutriments foliaires l'année (n-1)	118
2.4. Discussion et Conclusions	120
3. Accroissement en diamètre des arbres et nutriments foliaires	122
3.1. Introduction	122
3.2. Calcul des accroissements en diamètre et contrôle des valeurs	123
3.2.1. Accroissements "fortement négatifs"	123
3.2.2. Accroissements "anormalement élevés"	124
3.2.3. Correction appliquée	124
3.3. Relations entre les accroissements en diamètre et les teneurs foliaires en nutriments	125
3.3.1. Accroissements en diamètre des 52 arbres "objectif" et nutriments foliaires	125
3.3.2. Accroissements en diamètre des 8 arbres "échantillon" et nutriments foliaires	129
3.4. Discussion et Conclusions	130

DISCUSSION

1. Echantillonnage et analyses chimiques	134
1.1. Période d'échantillonnage	134
1.2. Directions de prélèvement	134
1.3. Préparation des échantillons pour analyse	135

1.4. Assurance qualité des analyses	135
1.5. Evaluation de différentes sources de variabilité.....	136
2. Etat nutritionnel initial des placettes	138
3. Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments.....	140
4. Premiers croisements avec les données édaphiques, dendrométriques et sanitaires	140
4.1. Relations entre les teneurs foliaires et la richesse minérale du sol.....	140
4.2. Relations entre l'accroissement en diamètre des arbres et les teneurs foliaires en nutriments	141
4.3. Relations entre le pourcentage de défoliation et les teneurs foliaires en nutriments	143
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	144
BIBLIOGRAPHIE.....	146
ANNEXES.....	150
1. Synthèse des principales données sur les nutriments foliaires	150
2. Quantité de feuilles ou d'aiguilles prélevée par arbre	155
3. Directions de prélèvement	156
4. Ecart moyen entre deux dates de prélèvements	158
5. Valeurs moyennes des masses foliaires ^{100f(1000a)} et des teneurs en nutriments	159
6. Comparaison des teneurs foliaires du réseau RENECOFOR avec les seuils indicatifs ^{Ft} (Seuils adaptés d'après Bonneau, 1995; van den Burg, 1985 et 1990)	167
7. Corrélations entre la masse foliaire ^{100f(1000a)} et les 13 nutriments analysés	169
8. Rapports entre éléments	172
9. Variabilité interannuelle et interplacette des minéralomasses ^{100f(1000a)} en nutriments.....	174
10. Variabilité interannuelle et interplacette des teneurs en nutriments et de la masse foliaire ^{100f(1000a)}	176
11. Variabilité intraplacette des minéralomasses ^{100f(1000a)} foliaires.....	178
12. Variabilité intraplacette des masses foliaires ^{100f(1000a)} et des teneurs foliaires en nutriments.....	180
13. Calcul du nombre d'arbres nécessaire par placette (ou d'analyses par type d'échantillon de référence: CRM 100, CRM 101) pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs foliaires sur la placette (ou par type d'échantillon de référence) à un risque de première espèce (α)	182
14. Nombre d'arbres nécessaire par placette pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs foliaires sur la placette à un risque de première espèce (α) fixé.....	183
15. Corrélations entre les teneurs foliaires en nutriments (ou leur minéralomasse ^{100f(1000a)}) et la teneur des mêmes éléments (ou leurs stocks) dans différents horizons de sol	187
16. Accroissements annuels moyens en diamètre (1993-1996) avant et après correction des 52 arbres "objectif"	195
17. Corrélations entre les accroissements annuels moyens en diamètre et les teneurs foliaires en nutriments des 8 arbres "échantillon" (1993 - 1996).	196
18. Liste des figures, des tableaux, et des cartes.....	198
18.1. Liste des figures.....	198
18.2. Liste des tableaux	199
18.2.1. Dans le texte:	199
18.2.2. Dans les annexes	200
18.3. Liste des cartes.....	202
19. List of figures, tables and maps	202
19.1. List of figures.....	202
19.2. List of tables	203
19.2.1. In the texte:	203
19.2.2. In the annexes:	205
19.3. List of maps	206
20. Fiches synthétiques par placette.....	207
20.1. Guide de lecture des fiches	207
20.1.1. Informations générales	207
20.1.2. Evolutions interannuelles	208
20.1.3. Comparaison aux seuils.....	208
20.1.4. Commentaires	208
20.2. Fiches individuelles (par placette)	209

Résumé

Introduction. Le réseau RENECOFOR a été mis en place à partir de 1991 pour compléter le système de surveillance de l'état sanitaire des forêts en France en assurant sur une période au minimum de 30 ans le suivi de nombreux paramètres dans certains peuplements forestiers. Parmi les facteurs pouvant entraîner des dysfonctionnements des écosystèmes forestiers, les problèmes nutritionnels peuvent être à l'origine d'une diminution de vigueur des arbres et de leur dépérissement. Les précédents rapports réalisés sur les données du réseau ont permis notamment de caractériser la richesse minérale initiale des sols et l'état sanitaire des arbres en 1994-1995 et de faire une première synthèse des données dendrométriques. Sur ces bases, un double objectif a été assigné au présent rapport sur les analyses foliaires: d'une part caractériser l'état nutritionnel initial des arbres (de 1993 à 1997) dans les 102 placettes du réseau et d'autre part aborder les premiers croisements avec les données sur la chimie des sols (facteur explicatif de l'état nutritionnel des arbres), les données dendrométriques et l'état sanitaire des arbres (facteurs pouvant être expliqués par l'état nutritionnel des arbres).

Méthodes et sources de variabilité. Une procédure de prélèvement standardisée a été mise en place pour limiter, ou au contraire, intégrer au maximum certaines sources de variabilité. Les échantillons foliaires ont été prélevés chaque année au fusil dans le tiers supérieur de 8 arbres "échantillons" sur chaque placette en essayant de respecter une proportion la plus équilibrée possible entre les directions principales. Les dates de prélèvement ont été fixées pour les feuillus et le mélèze entre le 15 juillet et le 31 août et pour les résineux entre le 1^{er} ou le 15 octobre et le 15 décembre ou le 15 janvier selon la situation géographique et l'altitude. Six macronutriments (N, P, S, K, Ca, Mg) et 7 micronutriments (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu, Zn) ont été analysés chaque année sur un échantillon composé (ou individuel par arbre en 1997) par placette.

Les écarts entre les dates de prélèvement d'une année sur l'autre dans un peuplement donné ont été assez faibles pendant les cinq premières années de suivi (14 jours en moyenne chez les feuillus et 24 jours chez les résineux). Les directions de prélèvement sur chaque placette n'ont pas toujours intégré l'ensemble des directions principales. En moyenne 50 % des placettes ont été prélevées dans toutes les directions mais une dérive au cours du temps a été notée. En 1993, les prélèvements ont été réalisés de manière homogène entre les directions principales pour 72 % des placettes contre seulement 35 % des placettes en 1997. Cette dérive justifie une attention plus soutenue dans les années à venir. Des tests de lavage d'aiguilles réalisés en 1996 et en 1997 sur trois placettes de pin maritime ont montré globalement pour les macronutriments que la surévaluation des teneurs due à l'absence de lavage était faible (au maximum 3 % pour S) et plus importante pour les micronutriments (21 % pour Cu et entre 6 % et 17 % pour Cl, Na et Fe). Ces résultats dépendent en outre de la localisation géographique des placettes et de l'année. Le suivi assurance qualité des analyses foliaires a porté sur deux échantillons de référence: le CRM 100 (feuilles de hêtre) et le CRM 101 (aiguilles d'épicéa). L'absence de dérive au cours des 5 premières années d'analyse a globalement été vérifiée pour les macronutriments aussi bien pour les feuilles de hêtre que pour les aiguilles d'épicéa. Par contre, les teneurs foliaires en micronutriments ont accusé une dérive manifeste entre 1995 et 1998 avec des valeurs plus faibles pendant cette période en particulier dans le cas du hêtre (- 16 % pour Al et - 33 % pour Fe en 1997). Cette dérive représente une difficulté surtout dans la perspective de comparaisons avec d'autres pays européens.

L'ordre de grandeur de la variabilité interanalyse évalué par le coefficient de variation est globalement très satisfaisant pour les macronutriments aussi bien chez le hêtre que chez l'épicéa (CV moyen entre 1995 et 1998 = 2,3 %) et homogène sur l'ensemble de la période à l'exception du S et du Mg dans les feuilles de hêtre en 1998 (CV respectivement 14 et 10 %). La variabilité interanalyse des micronutriments est plus importante (CV = 6,6 % sauf pour Na: CV entre 19,6 % et 71,6 %).

Les cinq premières années d'analyses foliaires ont permis d'évaluer les sources de variabilité intraplacette, interplacette et interannuelle (coefficient de variation compris en moyenne entre 10 et 35 % pour tous les nutriments analysés à l'exception du sodium: 80 %). Ces moyennes masquent des différences selon les nutriments (N, P, S : CV \approx 10 % ; K, Mg, Ca, Zn, Fe : CV compris entre 15 % et 20 % ; Cl, Al, Mn, Cu : CV compris entre 30 et 35 %). Dans le cas des macronutriments (sauf pour S) et de certains micronutriments (Mn et Zn) la variabilité interannuelle est inférieure aux variabilités intra et interplacette. Les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") conduisent sensiblement aux mêmes conclusions à l'exception du Zn pour lequel l'effet "année" est tantôt supérieur (DOU, EPC, SP), tantôt inférieur (CHP, CHS, HET, PS) à l'effet "placette". Le coefficient de variation intraplacette est soit supérieur au CV interplacette (S, K et Zn), soit inférieur (N, P, et Mn) ou égal (Ca et Mg). Dans le cas des autres micronutriments (Sodium, chlore, aluminium, fer, et cuivre), la variabilité interannuelle est relativement proche de la variabilité entre placettes ou entre arbres. Les variabilités intraplacette, interplacette et analytique sont vraisemblablement bien définies à partir des cinq premières années d'analyses alors que la variabilité interannuelle est certainement appelée à être mieux évaluée avec un nombre d'années d'analyse plus important.

Résultats. L'état nutritionnel des arbres apparaît globalement satisfaisant (à l'exception des épicéas) à la fois selon les seuils^{Eu} proposés pour la comparaison des analyses foliaires dans les différents pays européens et selon les seuils indicatifs^{Fr} proposés pour la France par rapport à l'état sanitaire et la croissance des arbres. Les équilibres entre les principaux nutriments sont également satisfaisants pour la plupart des placettes. Ces résultats reflètent de manière cohérente les critères de choix initiaux des placettes qui ont été sélectionnées notamment d'après leur aspect visiblement sain. D'autre part ces résultats vont globalement dans le même sens que les premières évaluations réalisées pour les analyses foliaires en 1995 à l'échelle de l'Europe aussi bien pour les teneurs foliaires que pour les équilibres entre éléments. Cependant, par rapport aux seuils^{Eu}, des teneurs foliaires parfois élevées (N pour le chêne pédonculé et le hêtre et P pour l'épicéa) ou au contraire basses (N, P et S pour le pin maritime et S pour l'épicéa et le pin sylvestre) ont été observées. Par rapport aux seuils indicatifs^{Fr}, des teneurs foliaires (moyennes sur 5 ans) supérieures aux valeurs optimales ont été observées (N, pour les chênes et le hêtre, K pour le chêne pédonculé et l'épicéa et Mn pour l'épicéa, le pin laricio, le pin sylvestre et le sapin). Les placettes en dessous du seuil de carence sont peu nombreuses (N: une placette de pin maritime et de pin sylvestre; Mg: deux placettes de hêtre et une placette de sapin; S: une placette d'épicéa; Fe: 3 placettes d'épicéa et une placette de sapin). Ces comparaisons doivent cependant être considérées d'un oeil critique du fait de la valeur relative des seuils proposés et des différentes sources de variabilité des teneurs foliaires. Aucune tendance continue au cours du temps des teneurs foliaires n'est actuellement visible.

Les relations entre les teneurs foliaires en nutriments et la richesse minérale du sol ont été étudiées à partir du premier inventaire sur la chimie des sols réalisé entre 1993 et 1995 et des teneurs foliaires moyennes en N, Mg, K et Ca entre 1993 et 1997. La richesse minérale du sol a été appréciée à la fois par les teneurs en éléments et leurs stocks jusqu'à 40 cm de profondeur. Ces relations obtenues en général peu étroites dépendent à la fois des éléments, des essences et des couches de sol considérées. Pour les relations significatives à au moins 10 % (teneurs foliaires / stocks dans le sol) en moyenne 46 % de la variance totale des éléments dans les feuilles est expliquée par la régression pour N et Mg, 48 % pour le potassium, et 56 % pour Ca. Les relations obtenues entre les teneurs foliaires et les teneurs dans le sol ont été généralement moins étroites. Les différents facteurs pouvant intervenir dans le découplage observé entre les éléments dans les feuilles et les mêmes éléments dans le sol sont discutés (variabilité dans le sol, écart entre les éléments échangeables et les éléments assimilables, effectif réduit de placette par essence, phénomènes de transferts et de remobilisations internes dans l'arbre, activité mycorhizienne, facteurs climatiques, ...).

Les relations entre les accroissements en diamètre et les teneurs foliaires en nutriments ont été étudiées en considérant

- (1) les accroissements en diamètre moyen par placette des 52 arbres "objectif" entre 1993 et 1996 et
- (2) les accroissements en diamètre moyen par placette des 8 arbres "échantillon" pour chaque année entre 1993 et 1996.

Les 13 nutriments dosés et 9 rapports entre nutriments (N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg et Fe/Mn) ont été testés. L'élément foliaire le plus souvent corrélé positivement à l'accroissement des 52 arbres "objectifs" a été l'azote pour le chêne sessile, le douglas, l'épicéa et le sapin mais ces relations ne sont pas très étroites (significatives à 5 % et R^2 compris entre 0,20 et 0,65) et les effectifs réduits de placettes par essence incitent à considérer ces relations avec prudence. Le pin sylvestre est l'essence pour laquelle le plus grand nombre de relations significatives a été observé (relations positives avec P et négatives avec Mg et Al). Les relations entre l'accroissement des 8 arbres "échantillon" et les teneurs foliaires des mêmes arbres étaient généralement moins étroites. La variabilité interannuelle des paramètres mesurés, et la faible précision des mesures d'accroissement en diamètre sur une année ont vraisemblablement réduit la qualité des relations.

Les relations entre le pourcentage de défoliation moyen par placette et par année des 8 arbres échantillon utilisés pour les analyses foliaires et les teneurs foliaires en nutriments ont été analysées pour la période 1993 à 1997. Les teneurs foliaires l'année (n) ont été mises en relation avec les pourcentages de défoliation l'année (n) et l'année (n + 1). Les relations les plus étroites (R^2 entre 0,43 et 0,62) ont été observées chez le pin maritime (Al), chez l'épicéa (Zn et Ca), et chez le douglas (Mg) avec la défoliation de la même année (n). L'absence d'arrière effet de l'état nutritionnel des arbres sur la défoliation est suggérée par des corrélations encore plus faibles avec les teneurs foliaires l'année n-1. La série de mesures est vraisemblablement encore trop réduite et l'absence de pourcentage de défoliation nettement supérieur à 25 % pour certaines essences peut expliquer en partie ces relations peu étroites. Le rôle d'autres facteurs non liés à la nutrition des arbres est également important à prendre en compte (l'âge, les facteurs climatiques, et les défoliateurs). Les données récoltées dans le sous-réseau météorologique forestier et les observations de l'état sanitaire des arbres seront précieuses, pour aborder d'ici quelques années une analyse multifactorielle intégrant les facteurs climatiques, nutritionnels et biotiques.

Abstract

The title of each Figure and Table in the text is translated into English just below the French title.

Introduction. The RENECOFOR Network was set up in 1991 to complete the forest health monitoring system in France and was designed to ensure the monitoring of numerous parameters in chosen forest stands over a period of at least 30 years. Among the many factors which can perturb forest ecosystems, nutritional problems can cause loss of tree vigour or even die-back. Previous reports that have used data collected through the Network have been able to define the mineral content of the soils at the start of the Network, the health status of the trees for the years 1994 and 1995, and to draw the first conclusions from tree mensurations on the plots. Following on from these perspectives, the present report has two objectives: on the one hand, to define the initial nutritional status of the trees (from 1993 to 1997) for the 102 plots in the Network and, on the other hand, to begin comparing data on soil chemistry (as a factor determining the nutritional health of a tree) to ring width data and the overall health status of the trees (both of which are directly influenced by the nutritional status of a tree).

Methods and determination of sources of variability. A standardised sampling procedure was defined to either limit, or on the contrary, integrate completely, certain sources of variability. Leaf samples were collected each year from the top third of the canopy of 8 " sample " trees on each plot (branches were shot out with a rifle). As much as possible, samples were taken in equal proportions from the four cardinal directions. Sampling dates were set between July 15 and August 31 for broad-leaves and larch, and between October 1 and October 15 or December 15 and January 15 depending on geographical location and altitude for conifers. For each plot, 6 macro-nutrients (N, P, S, K, Ca, Mg) and 7 micro-nutrients (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu, Zn) were analysed each year in composite samples (or by individual tree in 1997).

Differences in sampling dates from year to year were slight during the first 5 years of monitoring (14 days for the broad-leaves and 24 days for the conifers on average). Whether or not the sampling was balanced in the four cardinal directions was not always verified by the operators. 50% of the plots on average had samples taken equally from all directions but a less rigorous respect of the guidelines became apparent over time. In 1993, 72% of the plots were sampled in all four cardinal directions equally whereas by 1997, this was the case for only 35% of the plots. This trend must be carefully controlled in the future.

Tests carried out in 1996 and 1997 on three plots of maritime pine (*Pinus pinaster*) using washed needles showed that basically, for the macro-nutrients, possible over-estimation of concentrations due to lack of washing was minimal (only 3% at the most for S). For the micro-nutrients, however, over-estimations were greater (21% for Cu and from 6 to 17% for Cl, Na and Fe). These results vary according to the geographical location of the plots and from year to year.

The quality control for the foliar analyses was carried out on two reference samples: CRM 100 (beech leaves) and CRM 101 (spruce needles). Generally speaking, no deviation was found for the macro-nutrients (N, P, S, K, Ca, and Mg) either for the beech leaves or for the spruce needles. However, the foliar micro-nutrient concentrations showed a clear deviation between 1995 and 1998 with lower values during this period, particularly for beech (-16% for Al and -33% for Fe in 1997). This deviation is problematic, especially if results are to be compared with other European countries.

The degree of variability from one analysis to the next, shown by the coefficient of variation (CV), is globally very satisfactory for the macro-nutrients, both for beech and for spruce (average CV from 1995 to 1998 = 2.3 %). Variability was also relatively consistent over the four years except for S and Mg in beech leaves in 1998 (CV of 14 and 10 % respectively). Inter-analysis variability is greater for micro-nutrients (CV = 6.6 % except for Na: CV between 19.6 and 71.6 %).

These five first years of foliar analysis have allowed us to identify the sources of intra-plot, inter-plot and inter-annual variability (CV) ranging on average from 10 to 35 % for all the nutrients analysed excluding Na: 80 %). These averages mask certain differences for specific nutrients (N, P, S: CV = 10 %; K, Mg, Ca, Zn, Fe,: CV = from 15 to 20 %; Cl, Al, Mn, Cu: CV = from 30 to 35 %). For the macro-nutrients (except S) and for certain micro-nutrients (Mn and Zn), inter-annual variability is lower than intra- and inter-plot variability. A two-way analysis of variance (plot and year) gives nearly the same results except for zinc where the " year " effect is sometimes higher (*Pseudotsuga menziesii*, *Picea abies*, *Abies alba*), and sometimes lower (*Quercus robur*, *Q. petraea*, *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris*) than the " plot " effect. The intra-plot variability is higher than the inter-plot variability for S, K and Zn, lower for N, P and Mn, or equal for Ca and Mg. For the other micro-nutrients (Na, Cl, Al, Fe and Cu), the inter-annual variability is relatively close to the one between plots or between individual trees. Finally, it is important to note that the first five years of study have provided a relatively clear definition of intra-plot, inter-plot, and analysis variability, whereas a longer period of time will certainly be needed to clarify the inter-annual variability.

Results. The nutritional status of the trees under study is globally satisfactory with reference to both the European threshold values used to compare foliar analyses from one European country to the next and the French indicative threshold values used to relate health status and tree growth. The balance of principal nutrients is also satisfactory for most of the plots. These results are a reflection of the coherent selection criteria used to choose the plots, for example, a generally healthy appearance with no sign of any abnormal characteristics. In addition, these results tend toward the same conclusions shown in the first European-wide evaluations for foliar analysis carried out in 1995, both for foliar concentrations and for the balance of elements. With reference to the European threshold values, however, occasional high foliar concentrations have been observed (N for pedunculate oak and beech, P for spruce) as well as low values (N, P and S for maritime pine and S for spruce and Scots pine). With reference to the French threshold values, foliar concentrations (average over 5 years) which were higher than the optimum values were observed (N for the oak species and beech, K for pedunculate oak and spruce, and Mn for spruce, Corsican pine, Scots pine and fir). Plots showing values below the deficiency threshold are rare (N: one plot of maritime and Scots pine, Mg: 2 plots of beech and one plot of fir, S: one plot of spruce, and Fe: 3 plots of spruce and one plot of fir). However, these comparisons should be examined critically because of the relative nature of the threshold values proposed and the different sources of variability in foliar concentrations. Furthermore, at this point in time, no long-term trends for foliar concentrations can be verified.

The correlation between foliar nutrient concentrations on the one hand and soil mineral contents on the other was studied based on an initial inventory of soil chemistry carried out from 1993 to 1995 and on average foliar concentrations for N, Mg, K and Ca analysed from 1993 to 1997. Soil chemical characteristics were evaluated both by exchangeable nutrient concentrations and pools to a depth of 40 centimetres. The correlations were generally low and depended on the elements, species and soil layers under consideration. For correlations significant to at least 10 % (foliar concentrations / soil pools), an average of 46 % of the total variance for foliar concentrations can be explained by the linear regression for N and Mg, 48 % by K, and 56 % by Ca. The correlations obtained between foliar concentrations and soil concentrations were generally less close than for those between foliar concentrations and soil pools. The report discusses the different factors which could be related to the lack of correlation between the foliar nutrients and the same elements stored in the soil (variability within the soil, the difference between exchangeable elements and really plant available elements, the small number of plots per species, transfer and re-use strategies inside the tree, mycorrhiza activity, climatic factors...).

Correlations between diameter increment and foliar nutrient concentrations were studied, taking into account:

- 1) the average diameter increment per plot for the 52 " objective " trees from 1993 to 1996 and,
- 2) the average annual diameter increment per plot for the 8 " sample " trees from 1993 to 1996.

Thirteen nutrients and 9 ratios (N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg, and Fe/Mn) were tested. Nitrogen was the foliar element which most often correlated positively to the growth of the 52 " objective " trees for sessile oak, Douglas fir, spruce and silver fir but the correlation was not very close (significant to 5 % with R^2 between 0.20 and 0.65) and due to the small number of plots tested per species, caution should be used in interpreting these results. Scots pine most often showed significant correlations (positive correlations with P and negative correlations with Mg and Al). The correlation between growth for the 8 "sample" trees and foliar concentrations for the same trees was generally less close. The variability from year to year of the parameters measured together with the limited accuracy of the diameter increment measurements over one year very probably reduced the quality of the correlation. Though the closer correlations generally involve nitrogen, the species concerned were present only in a small number of plots and this limits the strength of the correlation.

The correlation between the average percentage of defoliation per plot and per year for the 8 " sample " trees and the foliar nutrient concentrations was analysed for the period from 1993 to 1997. Foliar concentrations for year (n) were correlated with percentages of defoliation for year (n) and for year (n + 1). The closest correlations (R^2 between 0.43 and 0.62) were observed for maritime pine (Al), spruce (Zn and Ca), and for Douglas fir (Mg) between defoliation for year (n) and foliar concentrations for the same year. An apparent lack of memory effect of tree nutritional status on defoliation is suggested by the even weaker correlations with foliar concentrations for the year (n - 1). This lack of correlation may be due to the fact that the data available is still too limited and that no defoliation high enough above 25 % was observed for certain species, which means that we had always to do with generally healthy trees only. It is also important not to overlook the role of other factors, unrelated to tree nutrition (age, climatic factors, defoliating pests). Tree health assessment and the data being collected in the sub-network of plots equipped with weather stations will be critical to the success of future multi-factor analyses which will integrate climatic, nutritional and biotic parameters.

English translation : Vicki Moore

Zusammenfassung

Unter jedem Titel der Tabellen, Abbildungen und Karten befindet sich eine englische Übersetzung.

Einführung. Das RENECOFOR-Meßnetz wurde von 1991 an aufgebaut um das französische Waldgesundheitsüberwachungssystem zu vervollständigen. Viele Parameter sollen mindestens 30 Jahre lang in verschiedenen Beständen verfolgt werden. Die Mineralstoffernährung kann Ursache einer Vitalitätsverringering der Bäume und ihres Absterbens sein. Die bereits in dieser Serie erschienen Berichte haben unter anderem die Bodenqualität, den Gesundheitszustand der Bäume (1994/95) und die ersten dendrometrischen Messungen behandelt. Darauf aufbauend hat der vorliegende Bericht über die Blatt- und Nadelanalysen zwei Ziele : (i) den initialen (1993-1997) Ernährungszustand der Bäume der 102 Dauerbeobachtungsflächen zu charakterisieren und (ii) erste Beziehungen zwischen den Blatt/Nadelmineralstoffgehalten und der Bodenchemie, den dendrometrischen Messungen und dem Gesundheitszustand zu suchen.

Methoden und Bestimmung von Variationsquellen. Eine standardisierte Probenahme wurde verwendet um sowohl verschiedene Variationsquellen zu verringern oder zu integrieren. Die Blatt/Nadelproben wurden jährlich auf jeder Fläche mit Hilfe von langen Entenschrotflinten im oberen Drittel von 8 Probebäumen gewonnen. Es wurden, soweit es möglich war, alle Hauptwindrichtungen berücksichtigt. Die Probenahmen fanden für Laubbäume und Lärche vom 15. Juli bis 31. August statt und für Nadelbäume, je nach geographischer Verteilung und Meereshöhe zwischen dem 1. oder 15. Oktober und 15. Dezember oder Jänner. Es wurden 6 Makronährstoffe (N, P, S, K, Ca und Mg) und 7 Mikronährstoffe (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu und Zn) einer Mischprobe pro Fläche (oder im Jahr 1997 individuell pro Baum) analysiert.

Die Unterschiede im Datum der Probenahme zwischen den 5 Jahren und pro Fläche waren eher gering : im Mittel 14 Tage bei den Laubbäumen und 24 Tage bei den Nadelbäumen. Die Probenwerber haben nicht immer darauf geachtet alle Hauptwindrichtungen mit einzubeziehen ; 50% der Flächen wurden im Mittel an allen Hauptwindrichtungen gewonnen aber eine Abweichung im Laufe der Jahre ist zu beobachten. Die Proben wurden 1993 homogen an allen Windrichtungen an 72 % der Flächen gewonnen, gegen nur 35% der Flächen im Jahr 1997. Auf diese Abweichung muß in den nächsten Jahren besser geachtet werden.

Waschtests, die an Seestrandkiefernadeln (*Pinus pinaster*) 1996 und 1997 an 3 Flächen durchgeführt wurden, zeigten, daß die Überschätzung der Makronährstoffkonzentrationen, wenn die Nadeln nicht gewaschen werden, gering ist (maximal 3% für S), für die Mikronährstoffe jedoch höher ist (21% bei Cu und zwischen 6 und 17% bei Cl, Na und Fe). Diese Ergebnisse hängen unter anderem von der geographischen Lokalisation der Flächen und vom Jahr ab. Das Analysequalitätsprogramm hat unter anderem die europäischen Referenzproben CRM 100 (Buche) und CRM 101 (Fichte) betroffen. Für beide Referenzproben, die zertifizierte Konzentrationen für die meisten Elemente haben, konnte nachgewiesen werden, daß es in den ersten 5 Jahren zu keiner analytischen Drift bei den Makronährstoffen gekommen ist. Bei den Mikronährstoffen ist jedoch eine Drift bei dem Buchenproben (CRM 100) nachgewiesen worden : -16% bei Al und -33% bei Fe im Jahr 1997. Diese Drift kann ein Problem für einen europaweiten Vergleich sein.

Die analytische Variation, die durch den Variationskoeffizienten (CV), bezogen auf die Referenzproben, bestimmt wurde, ist zufriedenstellend für die Makronährstoffe (CRM 100 und CRM 101) : mittlerer CV zwischen 1995 und 1998 = 2,3% dieser CV ist homogen über die gesamte Periode, mit Ausnahme von S und Mg bei CRM 100 im Jahr 1998 (CV zwischen respektive 14 und 10%). Die Mikronährstoffe zeigen eine größere analytische Variation (CV = 6,6%, außer für Na : CV zwischen 19,6 und 71,6%).

Die ersten 5 Jahre haben es erlaubt folgende Variationsquellen zu quantifizieren : innerhalb der Bestände, zwischen Beständen der gleichen Baumart und zwischen den Jahren (mittlerer CV von 10 bis 35% für alle analysierten Elemente, mit Ausnahme von Na : 80%). Diese Mittel verdecken Unterschiede zwischen den Elementen (N, P, S : CV \approx 10% ; K, Mg, Ca, Zn, Fe : CV zwischen 15 und 20% ; Cl, Al, Mn, Cu : CV zwischen 30 und 35%). Bei den Makronährstoffen (mit Ausnahme von S) und bei manchen Mikronährstoffen (Mn und Zn) ist die zwischenjährige Variation kleiner als jene der zwischen den Flächen und innerhalb der Flächen. Die zwei Faktoren-Varianzanalyse (« Fläche » und « Jahr ») führt zu den gleichen Ergebnissen, mit Ausnahme von Zn für welches der Effekt « Jahr » einmal größer (Douglasie, Fichte und Tanne) und einmal kleiner (Eiche, Buche, Rotkiefer) als der Effekt « Fläche » ist. Der CV innerhalb der Flächen ist entweder größer (S, K und Zn), kleiner (N, P und Mn) oder gleich (Ca und Mg) als jener zwischen den Flächen. Bei den anderen Mikronährstoffen (Na, Cl, Al, Fe und Cu) ist die Variation zwischen den Jahren ähnlich jener zwischen den Flächen und zwischen den Bäumen einer Fläche. Die analytischen Variation, sowie jene innerhalb und zwischen den Flächen konnten gut mit Hilfe der ersten 5 Jahre definiert werden. Jene zwischen den Jahren benötigt eine größere Anzahl von Jahren um gut definiert zu werden.

Ergebnisse. Der Ernährungszustand der Bäume ist generell zufriedenstellend (mit Ausnahme der Fichtenbestände), sowohl nach den europäischen als auch französischen Richtwerten. Die verschiedenen Nährstoffe sind auch in den meisten Fällen zueinander in einem guten Gleichgewicht. Diese Ergebnisse zeigen, daß die Selektion der Bestände, die unter anderem nach ihrem sichtbar gesunden Aussehen gemacht wurde, begründet war. Zudem stimmen diese Ergebnisse mit der ersten europaweiten Studie, die 1995 durchgeführt wurde, überein. Verglichen mit den europäischen Richtwerten, werden manchmal hohe Konzentrationen von N bei Stieleiche und Buche und von P bei Fichte beobachtet. Niedrige Konzentrationen von N, P, und S werden dagegen bei Seestrandkiefer (*Pinus pinaster*) und nur S bei Fichte und Rotkiefer beobachtet. Verglichen mit den französischen Richtwerten wurden öfters Werte, die über den optimalen Konzentrationen liegen, gefunden (im 5-Jahresmittel : N, bei Eiche und Buche, K bei Stieleiche und Fichte und Mn bei Fichte, korsischer Schwarzkiefer, Rotkiefer und Tanne). Nur wenige Bestände weisen Konzentrationen unter den Mangelwerten auf (N : ein Bestand mit Seestrandkiefer und einer mit Rotkiefer ; Mg : zwei Buchenflächen und eine Tannenfläche ; S : eine Fichtenfläche ; Fe : 3 Fichten- und eine Tannenfläche). Diese Vergleiche müssen jedoch, aufgrund der relativen Gültigkeit der Richtwerte und der Variabilität der Konzentrationen innerhalb einer Fläche und zwischen den Jahren, kritisch betrachtet werden. Während der 5 Jahre wurden keine Trends in den Konzentrationen festgestellt.

Die Beziehungen zwischen den Blatt/Nadelkonzentrationen und den bodenchemischen Verhältnissen wurden mit Hilfe der Daten, der zwischen 1993 und 1995 durchgeführten Bodenbestandesaufnahme, durchgeführt. Dazu wurden die mittleren N-, Mg-, K- und Ca-Blatt/Nadelkonzentrationen der Periode 1993 und 1997 und die entsprechenden Konzentrationen oder Vorräte bis 40 cm Bodentiefe verwendet. Die Regressionen sind generell wenig straff und hängen sowohl vom Element, der Baumart und der Bodentiefe ab. Bei jenen Beziehungen, die mindestens 10% signifikant sind (Blattkonzentrationen : : Bodenvorräte), wurden im Mittel bei N und Mg 46% der Gesamtvarianz erklärt, bei K 48% und bei Ca 56%. Die Beziehungen zwischen den Blatt/Nadelkonzentrationen und den Konzentrationen im Boden sind generell weniger straff als jene zwischen den Blatt/Nadelkonzentrationen und den Bodenvorräten. Die verschiedenen Faktoren, die für den geringen Anteil der erklärten Varianz verantwortlich sind, werden diskutiert (Variation im Boden, Differenz zwischen austauschbaren und wirklich assimilierbaren Ionen, geringe Anzahl von Wiederholungen pro Baumart, interne Nährstofftransfers, Mykorrhiza, klimatische Faktoren, ...).

Die Beziehungen zwischen den Diameterzuwächsen (in 1,30 m) und den Blatt/Nadelkonzentrationen wurden folgendermaßen studiert : (1) an Hand der mittleren Zuwächse (1993-1996) der 52 Zukunftsbäume und (2) anhand der mittleren jährlichen Zuwächse (1993-1996) der 8 Blatt/Nadelprobebäume. Die 13 Nährelemente und 9 Verhältnisse zwischen Elementen (N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg und Fe/Mn) wurden getestet. Das am meisten positiv mit dem Zuwachs der 52 Bäume korrelierte Element war N bei der Traubeneiche, der Douglasie, Fichte und Tanne, aber diese Beziehungen sind nicht sehr straff (signifikant zu 5%, mit einem R^2 zwischen 0,2 und 0,65) und die geringe Anzahl der Wiederholungen pro Baumart zwingen zu einer gewissen Vorsicht bei ihrer Interpretierung. Die Rotkiefer zeigt die meisten signifikanten Korrelationen (positive Beziehungen mit P, negative mit Mg und Al). Die Beziehungen zwischen den 8 Probebäumen und den Blatt/Nadelkonzentrationen der gleichen Bäume waren meistens weniger straff. Die Variation der gemessenen Parameter zwischen den Jahren und die geringe Genauigkeit der Durchmesserzuwächse innerhalb einer so kurzen Periode sind wahrscheinlich die Ursache für die geringe Qualität der Regressionen. Die signifikanten Beziehungen betreffen meistens den Stickstoff, aber sie sind zugleich durch eine geringe Anzahl von Flächen repräsentiert, welches ihre Aussagekraft mindert.

Die Beziehungen zwischen den mittleren Blatt/Nadelverlusten pro Fläche und Jahr der 8 Probebäume und den Nährstoffen wurden für die Periode 1993 bis 1997 studiert. Die Blatt/Nadelkonzentrationen (Jahr n) wurden mit den Blatt/Nadelverlusten der Jahre (n) und (n+1) in Beziehung gebracht. Die besten Regressionen (R^2 zwischen 0,43 und 0,62) wurden bei der Seestrandkiefer (*Pinus pinaster*) für Al, der Fichte für Zn und Ca und der Douglasie für Mg mit den Blatt/Nadelverlusten im gleichen Jahr erzielt. Erinnerungseffekte scheinen kaum vorzuliegen, da die Korrelationen für das Jahr (n+1) noch geringer sind als für das Jahr (n). Die Meßserien sind sicherlich noch zu kurz und es liegen nur wenige Fälle mit Blatt/Nadelverlusten > 25% vor. Dies könnte die geringe Anzahl an straffen Beziehungen teilweise erklären. In diesem Zusammenhang sind andere Faktoren, welche nichts mit der Mineralstoffernährung der Bäume zu tun haben, auch von Bedeutung (Alter, klimatische Faktoren und Insektenfrass). Die auf 26 Flächen gemessenen meteorologischen Parameter und die sanitären Baumbeobachtungen sind wichtig, um in einigen Jahren multifaktorielle Analysen zu beginnen, die die klimatischen, mineralnährstoffbezogenen und biotischen Faktoren integrieren.

INTRODUCTION

La composition chimique des feuilles est un indicateur de la nutrition minérale de l'arbre. C'est dans les feuilles, siège de la photosynthèse, que les éléments minéraux puisés dans le sol et le dioxyde de carbone se rencontrent pour former les éléments carbonés nécessaires au fonctionnement et à la croissance de l'arbre. Plusieurs auteurs ont mis en évidence une relation entre le niveau d'activité photosynthétique des arbres et leur teneur foliaire en azote et en magnésium (Lange et al., 1989 ; Bassow et Bazzaz, 1997 ; Liu et al., 1997). D'autre part, Schulze et al. (1989) ont montré dans une étude sur l'épicéa commun (*Picea abies*) que la production de bois de tige est liée à l'alimentation en magnésium et calcium.

La qualité de l'alimentation minérale dépend de la disponibilité des éléments dans le milieu (essentiellement le sol) et de la capacité d'absorption des arbres. Des conditions limitantes d'alimentation minérale ou un déséquilibre entre éléments nutritifs peuvent conduire à une dégradation de l'état de santé des arbres et des forêts. Les études sur les dépérissements forestiers des années 1970-80 ont montré que de nombreux phénomènes de dysfonctionnements des écosystèmes forestiers étaient liés à des problèmes de nutrition minérale dus aux changements de la chimie des sols sous l'effet de la pollution atmosphérique et des changements globaux de l'environnement (Zöttl and Mies, 1983; Müller-Edzards et al., 1997 ; de Vries et al., 1998).

Le dépérissement de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans le Fichtelgebirge en Bavière par exemple serait essentiellement dû à une carence en magnésium (Zech et Popp, 1983). Cette relation entre dépérissement et carence magnésienne a été mise en évidence dans d'autres peuplements d'Europe, mais aussi d'Amérique du Nord et de la Nouvelle Zélande dès le début des années 1980. En Europe, les précipitations acidifiantes seraient pour partie à l'origine de la diminution du taux de magnésium et des cations en général dans les sols (Weikert et al., 1989 ; Landmann, 1992 ; Landmann et al., 1997).

La sylviculture peut également être à l'origine de l'appauvrissement des sols suite à l'introduction d'espèces très productives qui épuisent les sols.

Mais la baisse de fertilité des sols n'est pas la seule cause de carences. L'augmentation des dépôts atmosphériques azotés entraîne dans certains cas (surtout sur sols pauvres en cations) une augmentation de la disponibilité en azote et une insuffisance relative d'alimentation en magnésium, potassium ou phosphore, créant des déséquilibres entre nutriments et l'apparition de carences (Duvigneaud, 1984 ; Bonneau in Landmann, 1992 ; van der Eerden et al., 1997 ; Kölling et al., 1997). La stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique peut constituer une cause de déséquilibre entre nutrition carbonée et nutrition minérale (Guehl in Landmann, 1992).

L'abondance d'un élément peut être tout aussi néfaste que sa rareté. Lorsque certains éléments sont absorbés en trop grande quantité ils peuvent en effet affecter le fonctionnement physiologique de la plante. C'est le cas de l'aluminium (Al^{+++}) sur les sols acides ou de faible fertilité (Ilvesniemi, 1992). Il serait d'ailleurs à l'origine de la discrimination entre plantes calcicoles et calcifuges sur ces types de sols. De plus, l'abondance d'aluminium dans les sols affecte les racines fines, et par conséquent l'alimentation minérale, par inhibition du prélèvement de cations. De même le zinc, le manganèse et le cuivre sont toxiques en excès bien que nécessaires en petite quantité (Lemée, 1978).

Le sodium et le chlorure sont également à l'origine de phénomènes de toxicité. L'apport de sodium et de chlorure d'origine marine par les embruns est incriminé dans les dépérissements de pin maritime de la côte ouest de la France (Nguyen-Queyrens et al., 1995).

Etant donné l'implication des problèmes d'alimentation minérale impliqués dans de nombreux dysfonctionnements d'écosystèmes forestiers, les analyses foliaires font partie des principaux outils

utilisés dans les réseaux d'observation et de surveillance des écosystèmes forestiers, de même que la description de l'état des houpiers et l'étude des caractéristiques chimiques des sols (Müller-Edzards et al., 1997; Raitio, 1999).

Le réseau RENECOFOR fait partie du réseau européen de suivi intensif des forêts mis en place au début des années 1990 pour étudier l'impact de la pollution atmosphérique et d'autres facteurs de stress sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (F.I.M.C.I., 1997). Dans le cadre de ce programme, l'analyse de la composition chimique des feuilles figure parmi les paramètres de suivi prioritaires et est effectuée dans toutes les placettes au moins une fois tous les deux ans (UN-ECE, 1998).

Malgré son intérêt, l'interprétation des résultats des analyses chimiques des feuilles est délicate car les teneurs foliaires sont soumises à de nombreux facteurs de variation (Bonneau, 1988 ; Wagner, 1990). Elles varient notamment :

- entre espèces;
- entre peuplements de la même espèce (facteur stationnel, âge des arbres);
- entre arbres d'un même peuplement (âge, statut social, type génétique (voir Fober (1986)), état physiologique);
- entre feuilles du même arbre (âge, position dans l'arbre) (voir Krivan et Schaldach, 1986);
- selon l'année d'échantillonnage (facteur climatique);
- selon la période de l'année et du jour auxquels on prélève les feuilles.

Les méthodes d'échantillonnage et d'analyses ont été harmonisées au niveau européen de façon à limiter les sources de variation entre pays et à l'intérieur d'un pays (UN-ECE, 1998). D'autre part, la qualité des analyses chimiques est soumise à un contrôle strict au sein de chaque laboratoire et entre laboratoires grâce à l'utilisation d'échantillons de référence certifiés. Cependant il reste des facteurs de variation que l'on ne peut pas contrôler et dont l'effet doit être quantifié pour pouvoir en tenir compte dans l'interprétation des résultats. C'est le cas des variations intra- et interannuelles. Elles ont surtout été étudiées chez les conifères, souvent sur de jeunes individus, et en ce qui concerne les variations interannuelles sur de courtes durées (Evers, 1972) ou par comparaison entre deux échantillonnages séparés d'une dizaine ou d'une vingtaine d'années (Ernst, 1990 ; Helmisaari, 1990 ; Cenni et al., 1998 ; Duquesnay, 1998). Dans les placettes du réseau RENECOFOR les analyses foliaires ont débuté en 1993 et ont été effectuées tous les ans jusqu'en 1997. La France dispose donc d'une série de 5 années successives d'analyses pour 102 peuplements et dix essences différentes. Cette série est relativement longue et permettra, pour chaque région et chaque espèce étudiées, d'évaluer l'importance de la variation interannuelle des teneurs de façon plus précise que ce qui a pu être fait jusqu'à maintenant en France et dans les autres pays, et si possible d'identifier les causes de cette variation.

Interprétation des analyses

Les résultats des analyses chimiques sont généralement comparés à des normes, ou seuils de référence, pour établir un diagnostic de l'état de santé des arbres. A ce niveau, deux types de questions peuvent être posées:

- (1) les teneurs en nutriments sont-elles du même ordre de grandeur que les teneurs obtenues en moyenne dans d'autres pays d'Europe, pour une essence ou un groupe d'essences donné?
- (2) les teneurs en nutriments indiquent-elles des problèmes d'alimentation minérale (carence ou toxicité) traduits par une perte de croissance, et/ou des symptômes d'affaiblissement ou de dépérissement?

Deux systèmes de seuils de référence peuvent actuellement être utilisés pour aborder ces questions très différentes.

(1) Les "normes européennes" (désignées dans la suite du texte par "seuils^{Eu}" pour "seuils européens") ont été proposées à partir des valeurs obtenues dans 16 pays européens et représentent une gamme de variation possible des teneurs en nutriments (Stefan et al., 1997). Cet effort d'homogénéisation et de simplification était nécessaire afin de remplacer les nombreux termes utilisés dans différents pays d'Europe pour désigner les mêmes valeurs ou gammes de valeurs (van den Burg, 1985 et 1990). Deux valeurs, une basse (borne inférieure: bi) et une haute (borne supérieure: bs), délimitent dans ce cas trois domaines de teneurs foliaires pour 4 groupes d'essences (le hêtre, les chênes, les pins et les épicéas). Les seuils^{Eu} retenus ne permettent pas d'interprétation directe en terme de dysfonctionnement physiologique des arbres. Autrement dit, pour un arbre donné, les analyses peuvent parfaitement montrer des valeurs basses par rapport aux seuils^{Eu} alors que l'arbre est visiblement sain et vigoureux. Inversement, on peut s'attendre à obtenir des analyses "dans les normes" pour des arbres pourtant peu vigoureux et dépérissants.

(2) Les "normes françaises" ou plus justement, les "seuils indicatifs^{Fr}"¹ sont au nombre de 2 (ou 3) auxquels correspondent des niveaux de croissance particuliers, ou des symptômes de dépérissement. Ces seuils ont été proposés pour un élément donné à partir de la courbe de Prévôt et Ollagnier qui met en relation la croissance d'un végétal et sa teneur foliaire en cet élément (Bonneau, 1988). La plupart d'entre eux proviennent d'expériences de fertilisation. Ces seuils indicatifs^{Fr} sont plus souvent définis par une fourchette de valeurs que par une valeur de teneur unique. On distingue, en fonction des teneurs décroissantes : (i) une "teneur optimale" qui correspond à la teneur, ou à la gamme de teneurs, pour laquelle la croissance est maximale ; (ii) une "teneur critique" qui est atteinte lorsque la diminution de la teneur foliaire entraîne une diminution de croissance d'environ 10 % par rapport à la croissance maximale ; (iii) une "teneur de carence" lorsque la réduction de croissance devient importante et que des symptômes visibles apparaissent tels qu'une coloration anormale du feuillage, des nécroses foliaires ou le dessèchement de rameaux.

Au-delà de la teneur optimale, certains éléments (S, Cl, Na, ...) présentent un seuil de toxicité induisant des dysfonctionnements physiologiques et une réduction de la croissance.

Actuellement, ces seuils n'ont pas été estimés pour tous les éléments foliaires, ni pour toutes les essences. Lorsqu'ils existent, leur utilisation est restreinte aux conditions dans lesquelles ils ont été déterminés (station, âge des arbres, concurrence, ...) et toute extrapolation comporte le risque de formuler des interprétations abusives.

La terminologie employée actuellement n'est pas reconnue de manière unanime, notamment en ce qui concerne le système de référence proposé par rapport à la croissance et à l'état sanitaire des arbres. Aussi, pour éviter toute incompréhension de la part du lecteur, et aussi pour éviter de se représenter ces systèmes de seuils de référence comme des systèmes bien établis alors qu'ils comportent de nombreuses lacunes et imprécisions, les termes employés dans ce rapport, et leur définition, ont été regroupés (**Tableau 1**, p.4).

La qualité de l'alimentation minérale n'est pas seulement liée à la quantité de chacun des nutriments mais aussi à l'équilibre entre ces nutriments. Notamment, car ils entrent dans la constitution de composés complexes selon des rapports précis. Ainsi le soufre et l'azote sont présents dans les protéines selon un rapport, exprimé en poids, de 0,069.

Les rapports entre N et P, N et S, N et Mg, N et K, N et Ca, K et Mg, K et Ca, Ca et Mg, Fe et Mn sont plus particulièrement importants pour évaluer la vitalité des arbres (Bonneau, 1988 ; Stefan et al., 1997). Plusieurs auteurs ont montré que les carences magnésiennes caractéristiques de certains dépérissements sont le résultat d'un déséquilibre entre l'azote, dont les apports augmentent avec les dépôts atmosphériques, et le magnésium, dont la teneur n'augmente pas de façon proportionnelle

¹ L'expression "norme", utilisée dans la littérature, nous semble inadaptée car elle ne traduit pas le fait que les valeurs proposées ne sont pas définitives, mais demandent à être adaptées notamment en fonction de l'âge des arbres, de la station, de l'altitude... L'expression "seuils indicatifs^{Fr}" sera utilisée de préférence dans la suite du rapport à la place de "normes françaises".

mais tend au contraire à diminuer sous l'effet de l'acidification des sols (Altherre and Evers, 1974; Schulze et al., 1989 ; van der Eerden et al., 1997).

Tableau 1: Vocabulaire employé dans ce rapport relatif aux deux systèmes de référence des teneurs en nutriments foliaires: seuils^{Eu}, et seuils indicatifs^{Fr}.

Table 1: Vocabulary used in this report related to the two reference classifications for threshold values for foliar nutrition: European thresholds, and French thresholds.

Expression française	Expression anglaise	Equivalent	Définition
Seuils de référence	<i>Reference thresholds</i>		Désignation globale pour les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr} .
Seuils^{Eu}	<i>European thresholds</i>	"Normes européennes" ⁽¹⁾	Teneurs foliaires prenant en compte les valeurs observées à l'échelle de l'Europe (indépendamment de l'état de l'arbre). Teneur foliaire correspondant à la limite entre les classes 2 et 3.
Borne supérieure (bs)	<i>Upper classification value</i>		Teneur foliaire correspondant à la limite entre les classes 1 et 2.
Borne inférieure (bi)	<i>Lower classification value</i>		Classe 1 ≤ bi; bi < classe 2 ≤ bs; classe 3 > bs.
Classes 1, 2, et 3	<i>Classes 1,2, and 3</i>		
Seuils indicatifs^{Fr}	<i>French thresholds</i>	"Normes françaises" ⁽²⁾	Teneurs foliaires indicatives prenant en compte l'état de l'arbre: croissance et état sanitaire. "Fr" mentionne la valeur symptomatique des seuils. Teneurs foliaires non limitante pour la croissance.
Optimum	<i>Optimum</i>		Teneurs foliaires → diminution de croissance (d'environ 10 %). C'est une incitation à la vigilance.
Seuil critique	<i>Critical threshold</i>		Teneurs foliaires → des symptômes de dysfonctionnement physiologique et une forte diminution de croissance.
Seuil de carence	<i>Deficiency threshold</i>		

⁽¹⁾ Valeurs de Stefan et al. (1997). ⁽²⁾ Valeurs de Bonneau (1995), modifiées d'après Bonneau et Montpied (communication personnelle) et van den Burg (1985 et 1990). Le terme de norme est à éviter car les valeurs indiquées (notamment pour les seuils indicatifs^{Fr}) n'ont pas valeur de norme arrêtée. Elles sont indicatives et doivent être soumises à révision, en particulier selon différentes sources de variation (âge, station, altitude ...).

L'étude des rapports entre éléments permet d'expliquer des résultats a priori contradictoires tels qu'une croissance normale malgré des insuffisances d'alimentation minérale révélées par l'analyse foliaire. L'abondance d'un nutriment donné peut favoriser la croissance. L'augmentation de la biomasse foliaire² qui en résulte aura pour effet une baisse de teneur des autres éléments par dilution. Malgré de faibles teneurs des éléments les moins abondants dans le sol, la croissance sera donc à un niveau normal (Bonneau, 1986 et 1988). A l'inverse, le niveau de croissance peut être réduit alors que les teneurs foliaires sont à des niveaux proches de l'optimum. Cela résulte d'un effet de concentration des éléments dans une biomasse foliaire réduite. Ces phénomènes de dilution et de concentration des éléments dans le volume foliaire peuvent être à l'origine de variations interannuelles des teneurs foliaires en relation avec les variations des conditions de croissance (alimentation hydrique par exemple). Les rapports entre éléments sont moins sensibles à l'effet dilution de la croissance. De plus amples données de terrain sont toutefois nécessaires pour mieux comprendre ces phénomènes.

Il faut également être prudent dans l'interprétation des rapports entre éléments car les proportions optimales entre éléments diffèrent selon les espèces et varient au cours de la saison de végétation (Oren et Schulze, 1989).

² L'expression "biomasse foliaire" est utilisée ici pour désigner la biomasse foliaire totale à l'échelle de l'arbre.

OBJECTIFS et PLAN du RAPPORT

Faisant suite à l'étude du "nouveau type de dépérissement forestier" observé au début des années 1980 en Europe (en France: programme DÉpérissement des FORêts et Pollution Atmosphérique: DEFORPA) et qui se traduit dans la majeure partie des cas plutôt par des dysfonctionnements qui ne sont pas faciles à observer de manière instantanée dans les peuplements concernés, les quatre principaux objectifs des systèmes de suivi intensif des forêts, dont fait partie le Réseau National de suivi à long terme des ÉCOsystèmes FORestiers (RENECOFOR), ont été fixés officiellement lors de la première conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe qui s'est tenue à Strasbourg en 1990. Cette conférence fut suivie de plusieurs règlements communautaires, et en 1993 la conférence d'Helsinki en confirma les décisions (ONF, 1996).

- *1. Obtenir des informations approfondies sur l'évolution de certains écosystèmes européens, en prenant en compte la dimension historique de l'évolution et des variations de la vitalité des forêts, les conditions stationnelles et les événements climatiques*
- *2. Chercher à établir des corrélations entre la variation des facteurs environnementaux et la réaction des écosystèmes*
 - 3. Déterminer le niveau de charge critique en polluants susceptible de déstabiliser un type donné d'écosystème forestier*
- *4. Permettre de mieux interpréter les résultats issus des réseaux systématiques tels que le réseau Européen de suivi des dommages forestiers*

Les résultats présentés dans le présent rapport s'inscrivent dans les points 1, 2 et 4 de ces objectifs généraux.

Le réseau RENECOFOR a été créé par l'Office National des Forêts (ONF) en 1992 afin de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts françaises constitué par le réseau des correspondants-observateurs et par la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Il est constitué de 102 placettes permanentes qui seront suivies pendant au moins 30 ans (**Carte 1**, p.7). L'objectif principal de ce réseau est de contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers, notamment dans le cadre des modifications probables du milieu (fertilité des stations, climat, facteurs biotiques). Pour répondre à ces objectifs, des mesures sont réalisées à intervalle régulier et permettent de suivre l'accroissement des arbres, leur état sanitaire, leur état nutritionnel, la production annuelle de nécromasse, les caractéristiques physiques et chimiques des sols, l'inventaire phytoécologique et d'estimer les dépôts atmosphériques ainsi que certains paramètres climatiques dans un nombre plus restreint de placettes (ONF, 1996).

Les analyses foliaires, faisant l'objet de ce rapport, ont été effectuées tous les ans sur l'intégralité des placettes du réseau de 1993 à 1997; elles le seront tous les deux ans à partir de 1998. Conformément aux recommandations du programme européen de suivi à long terme des écosystèmes forestiers pour les placettes de niveau II, les macroéléments suivants sont analysés: l'azote (N), le phosphore (P), le soufre (S), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg). Ce sont les nutriments de base présents en grande quantité dans les feuilles. En outre, les oligoéléments (nutriments nécessaires en petite quantité) suivants sont analysés alors que leur prise en compte est facultative dans le cadre du programme européen: le fer (Fe), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le sodium (Na), l'aluminium (Al) et le chlore (Cl). Ces mesures sont réalisées dans le cadre du réseau RENECOFOR pour répondre à trois types de questions complémentaires: (1) existe-t-il des problèmes nutritionnels à une date donnée? (2) existe-t-il une évolution à long terme des teneurs

foliaires en nutriments? Si tel est le cas, (3) quels en sont les facteurs déterminants, et les impacts possibles sur l'état sanitaire et la croissance des arbres?

Ce programme de suivi à long terme des teneurs en nutriments foliaires va combler un manque dans la littérature scientifique en France. En effet, les analyses foliaires ont été surtout utilisées par le passé comme outil de diagnostic mais rarement intégrées à un programme de suivi à long terme respectant des méthodes d'échantillonnage standardisées. Les suivis annuels réalisés en Finlande de 1987 à 1995, en Autriche de 1989 à 1995 et de 1983 à 1995 pour le soufre, et en Allemagne de 1986 à 1993 (Evers, 1972; Stefan *et al.*, 1997) ont montré que les teneurs foliaires en soufre ont diminué en Finlande suite à la baisse des dépôts atmosphériques mais ont augmenté en Autriche à proximité des secteurs à forte pollution soufrée. En Allemagne, la variabilité régionale de l'évolution des teneurs en azote s'expliquerait plus vraisemblablement par des différences régionales dans les niveaux de dépôts atmosphériques que par des différences des facteurs géo/pédogénétiques. A défaut de suivi à long terme, l'évolution des teneurs en nutriments foliaires a été le plus souvent appréciée par rééchantillonnage à quelques dizaines d'années d'intervalle (Duquesnay, 1998). La comparaison entre des valeurs actuelles et anciennes a montré que la teneur foliaire en magnésium avait diminué au cours de ces deux dernières décennies dans plusieurs peuplements européens d'épicéa commun et de sapin pectiné sur sols acides. Mais les rééchantillonnages n'ont pas été faits dans les mêmes peuplements et ne portent généralement que sur deux dates (Landmann *et al.*, 1997). Il manque de longues séries de mesures pour confirmer ces résultats et d'autre part, les variations interannuelles ont été peu étudiées ce qui ne permet pas de savoir si l'écart observé entre deux dates est compris ou pas compris dans la variabilité interannuelle.

L'étude des relations entre les teneurs foliaires, l'état sanitaire et la productivité des peuplements permettra, à terme, d'affiner les seuils indicatifs utilisés actuellement pour le diagnostic foliaire. De plus, le nombre important d'essences étudiées dans le réseau (les 10 principales essences forestières françaises) et la diversité géographique des sites d'implantation des placettes offrent la possibilité d'étendre le développement des seuils de diagnostic à des essences peu étudiées jusqu'ici, et à des peuplements adultes *in situ*. Les expériences dans ce domaine sont en effet souvent réalisées sur de jeunes plants en serre en pépinière ou *in situ* sur des plantations jeunes.

La synthèse des cinq premières années d'analyses foliaires est présentée dans ce rapport dont les objectifs sont d'une part de proposer une évaluation de l'état nutritionnel initial des placettes du réseau et d'autre part de commencer à explorer les relations entre les différents types de données enregistrées. Ce deuxième aspect doit être considéré comme une approche préliminaire étant donné le nombre d'années de mesures encore peu important.

Le rapport est organisé en trois parties.

La première partie présente la méthode d'échantillonnage (chapitre 1), la préparation des échantillons pour les analyses (chapitre 2) et les méthodes analytiques employées (chapitre 3). Une analyse critique est incluse dans les chapitres 1 et 3 d'une part pour identifier les problèmes d'échantillonnage qui ont été rencontrés entre 1993 et 1995 et d'autre part pour évaluer le programme d'assurance qualité appliqué sur les dosages.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des teneurs en nutriments foliaires, des minéralomasses^{100f (1000a)} et de la masse foliaire^{100f (1000a)} (voir les définitions § 1.3.4). Dans cette partie sont traités successivement les ordres de grandeur observés (chapitre 1), les comparaisons aux seuils de référence (chapitre 2), les corrélations entre éléments foliaires et les rapports entre teneurs foliaires (chapitre 3) et certaines sources de variabilité: intraplacette, interplacette, interannuelle, et analytique (chapitre 4).

La troisième partie est consacrée à une première approche des relations entre les teneurs foliaires en éléments et les éléments échangeables dans le sol (chapitre 1), entre les teneurs foliaires en éléments et les pourcentages de défoliation (chapitre 2) et entre les teneurs foliaires en éléments et les accroissements en diamètre des arbres objectifs (chapitre 3).

Les annexes contiennent trois groupes d'informations: (1) des tableaux de synthèse pour les trois principales parties du rapport, (2) les listes des figures, tableaux et cartes et (3) les fiches synthétiques par placette.



Carte 1: Localisation et type des 102 placettes permanentes du réseau RENECOFOR

Map 1: Localisation and level of investigation for the 102 plots in the RENECOFOR network

PREMIERE PARTIE: MATERIELS ET METHODES

1. Echantillonnage

1.1. Périodicité et période d'échantillonnage

Le prélèvement foliaire et l'analyse chimique du contenu des feuilles ont débuté en 1993 dans les 102 placettes du réseau RENECOFOR. Ils ont été répétés tous les ans de 1993 à 1997.

La période d'échantillonnage dans l'année est importante car les teneurs foliaires varient beaucoup au cours de la saison de végétation. Elles sont élevées dans les jeunes tissus foliaires, après le débourrement, et diminuent ensuite au cours de la saison (Bonneau, 1988 ; Ernst, 1990 ; Helmisaari, 1990). Elles sont relativement stables durant le mois d'août chez les feuillus et de mi-octobre à mi-novembre chez les résineux à feuilles pérennes.

Les placettes de feuillus et de mélèze du réseau sont échantillonnées entre le 15 juillet et le 31 août, les placettes de résineux autres que le mélèze, entre le 1^{er} ou le 15 octobre et le 15 décembre ou le 15 janvier selon leur situation géographique et l'altitude. Les dates sont précisées par placette dans le manuel de référence RENECOFOR n°6 (Ulrich et al., 1994).

Le prélèvement doit être réalisé par temps sec, si possible depuis plusieurs jours, afin que le feuillage soit entièrement sec. Cette condition n'a pas toujours pu être remplie; les échantillons (surtout les feuillus) étaient alors séchés avec du papier absorbant avant d'être envoyés au laboratoire d'analyses.

1.1.1. Ecart par rapport aux périodes de prélèvement

Les périodes de prélèvement ont été respectées dans la quasi totalité des placettes (**Tableau 2**, p.9 et **Tableau 3**, p.9).

En moyenne, les prélèvements ont été effectués la première semaine d'août pour les feuillus et le mélèze, mi-novembre pour les placettes de douglas, d'épicéa, de pin sylvestre et de sapin pectiné et début décembre pour les placettes de pin laricio et de pin maritime.

Dans le cas des feuillus, en 5 ans, seules deux placettes sur 51 ont été échantillonnées avant le 15 juillet et deux après le 31 août (**Tableau 2**, p.9). Ce sont les placettes CHS 86 (échantillonnée le 12/07/1995), HET 64 (échantillonnée le 08/07/1996), HET 04 (échantillonnée le 07/09/1995) et CHP 18 (échantillonnée le 26/09/1995).

Dans le cas des résineux à feuilles persistantes, seules deux placettes sur 51 ont été échantillonnées en février, donc après le 15 janvier, et deux en septembre, donc avant le premier octobre (**Tableau 3**, p.9). Ce sont les placettes PS 35 (échantillonnée le 05/02/1997), PS 44 (échantillonnée le 06/02/1997), EPC 73 (échantillonnée le 28/09/1995 et 25/09/1997).

1.1.2. Ecart entre deux dates de prélèvements successifs

Dans le cadre d'un suivi à long terme des teneurs en nutriments foliaires, le respect d'une période de prélèvement la plus étroite et constante possible est nécessaire pour limiter le plus possible d'introduire une source de variabilité supplémentaire.

L'écart maximum observé entre deux dates de prélèvements annuels successifs dans une même placette est de 102 jours (EPC 81 entre le 03/10/94 et le 13/01/95). En moyenne cet écart est de 14 ± 11 jours pour les placettes de feuillus et la placette de mélèze, et de 24 ± 22 jours pour les placettes de résineux à feuilles persistantes. Les placettes ayant des écarts supérieurs à 50 jours (soit un mois et demi) entre deux dates de prélèvements successifs sont au nombre de 16 (**Tableau A 5³**, p.158). Ce sont uniquement des placettes de résineux et pour certaines d'entre elles cette situation se répète plusieurs fois en cinq ans.

Tableau 2: Nombre annuel de placettes échantillonnées à une période donnée. Cas des feuillus et du mélèze (51 placettes au total).

Table 2: Total number of plots sampled per year showing plots sample during (col.1) before (col 2) and after (col 3) normal sampling periods. Broad-leaved and larch plots only (total number of plots = 51).

	15 juillet au 31 août	avant le 15 juillet	après le 31 août
1993	51		
1994	51		
1995	48	1	2
1996	50	1	
1997	51		

Tableau 3: Nombre annuel de placettes échantillonnées à une période donnée. Cas des résineux à feuilles persistantes (51 placettes au total).

Table 3: Total number of plots sampled per year showing plots sample during (col.1) before (col 2) and after (col 3 and 4) normal sampling periods. Coniferous plots only, larch excepted (total number of plots = 51).

	15 oct. au 15 déc.	1 au 15 oct.	15 déc. au 15 janv.	15 janv. au 1 ^{er} oct.
1993	43		8	
1994	45	5	1	
1995	41	1	8	1
1996	38	4	7	2
1997	39	2	9	1

La distribution des écarts entre deux dates de prélèvement successives est présentée ci-dessous (**Figure 1**, p.10). Le cas le plus fréquent est un décalage de quelques jours à une semaine vers une date plus tardive. La période de prélèvement foliaire préconisée pour les résineux étant plus étalée que celle préconisée pour les feuillus et le mélèze, la distribution des écarts entre dates est également plus étalée pour ceux-là.

L'écart entre la date de prélèvement la plus précoce et la date de prélèvement la plus tardive au cours de ces cinq premières années d'échantillonnage foliaire est en moyenne de 39 ± 21 jours, ce qui est relativement important. Seuls les résineux à feuillage persistant sont affectés par un écart supérieur à 50 jours. La météorologie locale est la cause principale de cet écart. Le prélèvement foliaire étant fortement déconseillé par temps de pluie ou lors de fortes chutes de neige, les dates de prélèvement, prévues initialement, ne peuvent pas toujours être respectées.

³ Les tableaux numérotés en A 1, 2, 3, ... sont en annexe à la fin du document.

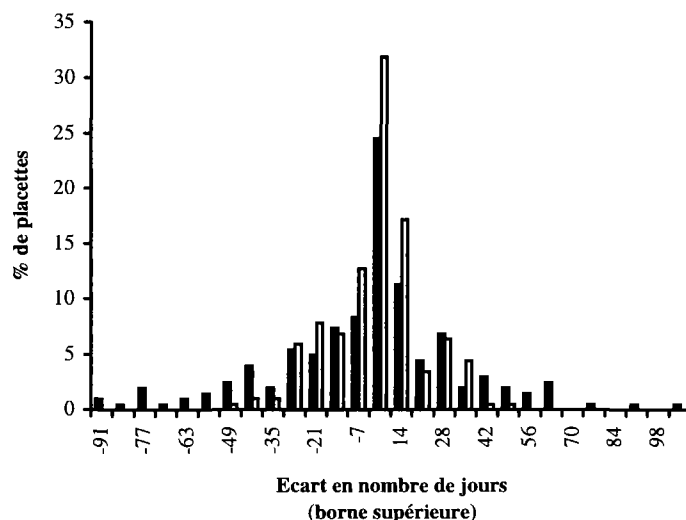


Figure 1: Décalage entre les dates de deux prélèvements foliaires successifs dans les placettes de résineux à aiguilles persistantes (en noir, n = 51), et dans les placettes de feuillus et la placette de mélèze (en blanc, n = 51).

Figure 1: Differences expressed in days between two successive dates of foliar sampling for the coniferous plots, larch excepted (in black, n = 51) and the broad-leaved plots and the larch plot (in white, n = 51).

Globalement, les écarts entre les dates de prélèvement semblent assez faibles pendant les cinq premières années de suivi. Toutefois, il serait nécessaire d'évaluer l'ordre de grandeur de la variabilité introduite par de tels écarts afin de s'assurer de l'absence de biais important lié à ce problème.

1.2. Arbres échantillonnés

Dans chacune des 102 placettes, 52 arbres ont été sélectionnés parmi les arbres "objectif" et identifiés par un numéro peint sur l'écorce (**Figure 2**, p.11). Ces 52 arbres sont répartis en deux groupes : l'un, composé de 36 arbres "observation" (numérotés de 1 à 36) situés dans la partie centrale de la placette (délimitée par un grillage) et l'autre, composé de 16 arbres "échantillon" (numérotés de 101 à 116) situés à l'extérieur du grillage dans la zone périphérique de la placette (Bonneau et al., 1994). Il appartiennent tous à la classe des dominants et codominants de l'essence principale. Ces arbres font l'objet de mesures dendrométriques individuelles tous les 5 ans et d'une notation annuelle du degré de défoliation et de coloration anormale des houppiers (Ulrich et Lanier, 1996 ; Cluzeau, 1998).

Les 16 arbres "échantillon", et eux seuls, servent aux prélèvements d'échantillons foliaires pour des analyses chimiques (Ulrich et al., 1994). La moitié d'entre eux (8 sur 16) est effectivement échantillonnée à chaque fois, les 8 autres servant de réserve. Les prélèvements de feuilles ou d'aiguilles sont effectués sur le même groupe d'arbres chaque année sauf si leur état ne le permet pas : houppier trop réduit pour subir un prélèvement supplémentaire, attaques d'insectes ou autres symptômes d'un mauvais état sanitaire (coloration anormale et défoliation), dans ce cas, on utilise le groupe de réserve.

Les arbres échantillonnés doivent rester représentatifs de la population des dominants et codominants de la placette. Le suivi de leur croissance et de leur état sanitaire permet de les comparer à tout moment aux 36 arbres "observation" qui servent alors de référence puisqu'ils ne sont soumis à aucune mesure destructive pouvant entraîner une dégradation éventuelle de leur vitalité (Cluzeau et al., 1998).

RENECOFOR
Schéma type d'une placette
Position des arbres "observations" et "échantillons"

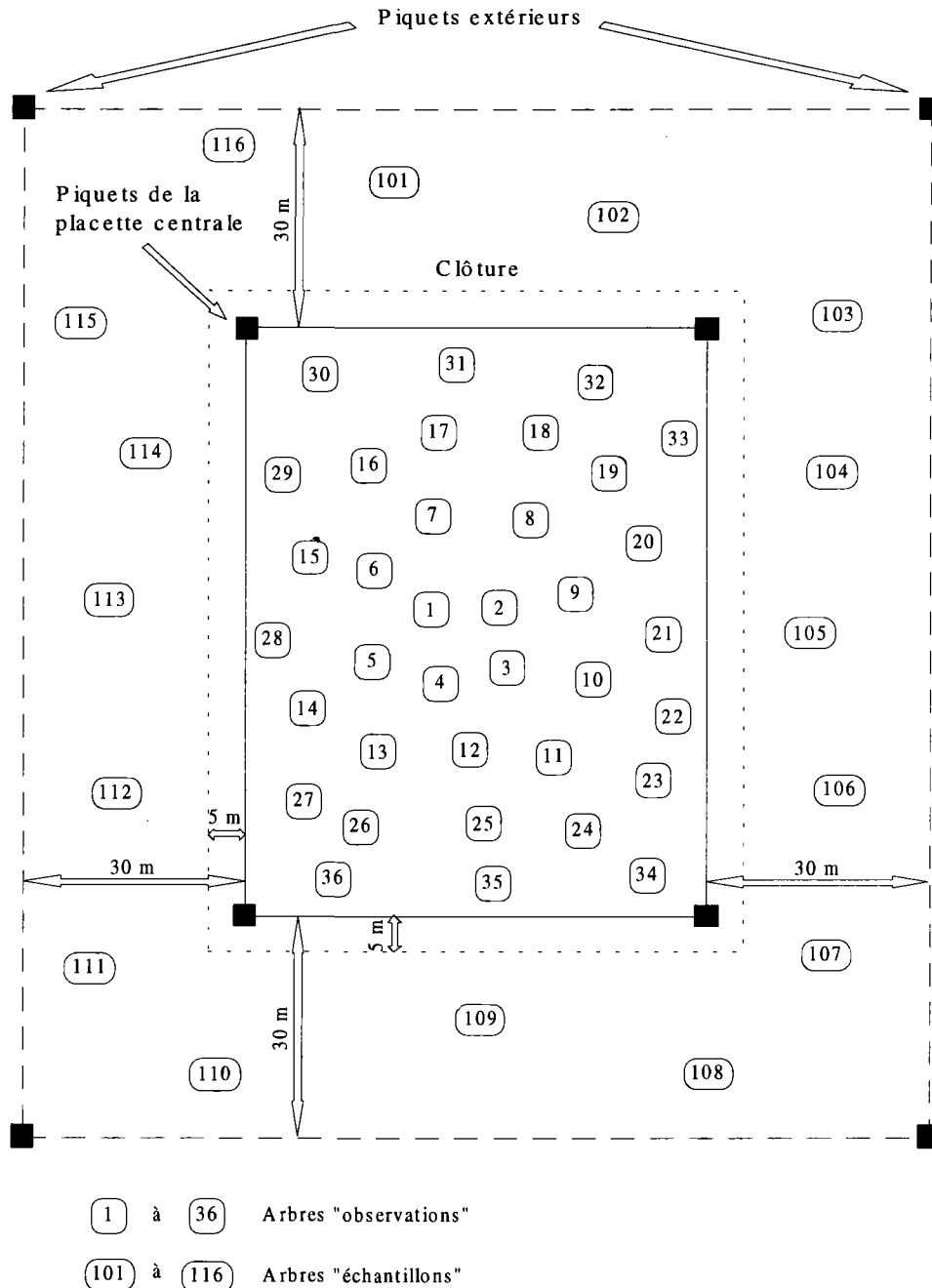


Figure 2: Schéma d'une placette type du réseau RENECOFOR. Seuls les arbres "observation" (à l'intérieur de la partie clôturée, n = 36) et "échantillon" (à l'extérieur de la clôture, n = 16) sont représentés sur ce schéma. Ils constituent les arbres "objectif" (n = 52) de la placette.

Figure 2: Diagram of a typical RENECOFOR plot. Only the "observation" trees (inside enclosure, for sanitary observations, n = 36) and "sample" trees (outside enclosure, for foliar sampling, n = 16) are represented in this diagram. They make up the "objective" trees (n = 52) of the plots.

1.2.1. Changements d'arbres

Selon le protocole défini pour le réseau RENECOFOR, les échantillons foliaires doivent, si possible, être prélevés sur les mêmes arbres lors de chaque campagne d'échantillonnage (Ulrich et al., 1994). Cependant si les houppiers sont peu volumineux, si leur aspect ne correspond plus au niveau de défoliation ou de jaunissement moyen de la placette, ou si les arbres ont été endommagés il est recommandé de changer le groupe entier de 8 arbres pour le prélèvement.

Au total 816 arbres par an ont été échantillonnés durant les cinq premières années de prélèvement foliaire dont 715 (88 %) cinq fois de suite.

Le remplacement de la totalité des 8 arbres a eu lieu une fois dans 9 placettes et chaque année dans les placettes PM 40a, PM 40b et PM 40c (**Tableau 4**). Dans ces placettes, le prélèvement foliaire est volontairement réalisé en alternance sur les deux groupes de huit arbres car les houppiers sont de petite taille et seraient significativement réduits par un échantillonnage annuel.

Tableau 4: Changements d'arbres pour le prélèvement foliaire entre 1993 et 1997. Nombre d'arbres différents par rapport au prélèvement précédent et année du changement.

Table 4 : *Plots where "sample" trees were changed between 1993 and 1997. Number of "sample" trees which were replaced The year the change took place (Total number of "sample" trees = 8)*

Placette	Nombre d'arbres remplacés	Année (s) de remplacement
DOU 34	8	1996
EPC 34	8	1996
HET 04	8	1996
HET 30	8	1996
HET 64	8	1994
PL 20	8	1995
PM 20	8	1996
PM 40a	8	1994, 1995, 1996 et 1997
PM 40b	8	1994, 1995, 1996 et 1997
PM 40c	8	1994, 1995, 1996 et 1997
PS 04	8	1996
SP 11	8	1995
DOU 65	1 (108 par 117)	1995
EPC 08	1 (114 par 117)	1995
EPC 88	1 (110 par 117)	1994
PS 15	1 (103 par 117)	1995
SP 07	1 (107 par 106)	1995

Un seul des 8 arbres échantillonnés a été remplacé une fois par un nouvel arbre dans 5 placettes. Contrairement aux cas précédents, ces changements ont été imposés selon les cas par la présence d'agents pathogènes (rouille suisse pour DOU 65, Chancre pour PS 15) ou des dégâts dus au vent (EPC 08). Dans la placette SP 07, l'arbre remplaçant (n°106) a été choisi parmi les 8 arbres de réserve (non échantillonnés les années précédentes) alors qu'on aurait du prendre un nouvel arbre (numéroté 117).

La cause du remplacement des arbres a été précisée par les responsables de placettes dans 5 cas sur 17. L'arbre 108 de la placette DOU 65 a été remplacé car il était sec en 1995. Les 8 arbres échantillonnés des placettes PL 20 et SP 11 ont été remplacés en 1995 car il était impossible de changer de direction de prélèvement par rapport aux années précédentes. L'arbre 103 de la placette PS 15 a été exploité alors qu'il n'aurait pas du l'être puisque c'était un arbre numéroté. Enfin, l'arbre 107 de la placette SP 07 a été remplacé car il était difficilement accessible.

1.3. Echantillon foliaire

1.3.1. Choix des rameaux

Les feuilles, ou aiguilles, sont récoltées sur un (ou des) rameau(x) prélevé(s) au fusil de chasse dans le tiers supérieur du houppier (Ulrich et al., 1994). Toutes les feuilles analysées sont du même type: ce sont des feuilles de lumière. Les rameaux sont sélectionnés en fonction de leur niveau d'éclairement mais aussi en fonction de leur densité de feuillage, de leur couleur et de la couleur des feuilles, de leur dimension, de leur forme qui doivent être représentatifs de l'aspect général du houppier. Cependant, dans le cas des résineux, il est parfois difficile de choisir un verticille précis.

1.3.2. Directions de prélèvement

Les directions de prélèvement devraient être décalées de 90 ° d'un arbre à l'autre sur les 8 arbres d'une même placette afin de ne pas influencer les résultats de l'analyse en privilégiant une direction donnée, et pour éviter de trop "mutiler" les arbres. Cependant, dans les placettes subissant fréquemment des vents forts, dans une direction particulière (surtout les placettes de montagne) l'échantillonnage n'est effectué que dans la direction opposée aux vents dominants. La composition chimique foliaire varie avec la taille des feuilles qui est elle-même influencée par le niveau d'éclairement (Niinemets et Kull, 1994). Dans une placette donnée, l'intensité d'éclairement (exposition, ombrage éventuel produit par les arbres situés en amont dans le cas d'une placette en pente) change selon les directions, de même que l'exposition au vent, au gel, ou à tout facteur lié au microclimat. Pour ces raisons, il est donc important de "mélanger" les directions de prélèvement à l'échelle de la placette.

Dans les relevés de terrain, la direction de prélèvement correspond à une des 16 directions suivantes: N, S, E, O, NE, NO, SE, SO, NNO, NNE, ENE, ESE, SSE, SSO, ONO, OSO. Pour l'étude des directions de prélèvement, un regroupement selon les quatre directions principales a ensuite été effectué de la manière suivante:

- Nord = N + NNO + NNE + ½ NO + ½ NE
- Est = E + ENE + ESE + ½ NE + ½ SE
- Sud = S + SSE + SSO + ½ SE + ½ SO
- Ouest = O + OSO + ONO + ½ SO + ½ NO

Pour chaque placette et par année, les directions de prélèvement individuelles ont été comparées entre elles afin de s'assurer qu'aucune direction n'avait été privilégiée.

Pour chaque arbre, les cinq directions de prélèvement correspondant aux cinq premières années d'échantillonnage ont été comparées afin d'identifier les cas éventuels de suréchantillonnage sur un côté donné du houppier.

Directions de prélèvement au sein de chaque placette

Pour l'ensemble des cinq premières années de prélèvement foliaire, les tirs ont été équitablement répartis entre les quatre directions dans la moitié des placettes (de 35 à 72 % des placettes selon les années) (**Figure 3**, p. 14). Chaque direction, Nord, Est, Sud et Ouest, est représentée par deux arbres dans chacune de ces placettes, ou deux directions sont représentées par deux arbres et les deux autres par un ou trois arbres. On remarque également que l'équilibre entre les directions de prélèvements a mieux été respecté lors de la première année de prélèvement que lors des années suivantes.

Une direction de prélèvement a été privilégiée dans 6 % des placettes en moyenne chaque année (de 5 à 8 % selon les années). Ceci correspond à la situation où plus de 4 arbres sur les 8 échantillonnés ont subi un prélèvement dans la même direction une année donnée (voir détails dans le **Tableau A 3**, p.156).

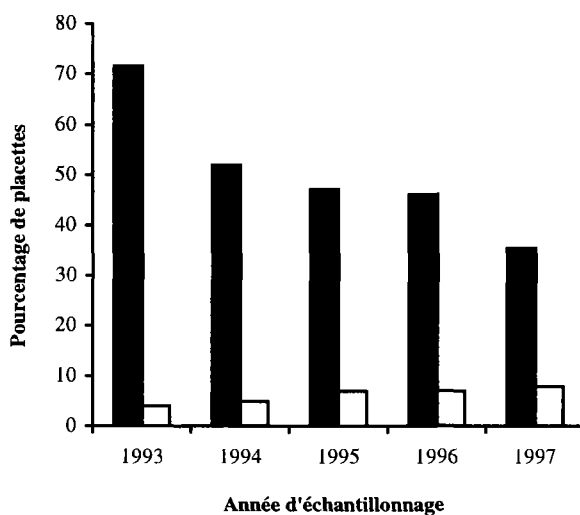


Figure 3: Pourcentage annuel de placettes où les prélèvements foliaires ont été effectués dans toutes les directions (en noir) et où plus de la moitié des arbres ont été échantillonnés dans la même direction (en blanc) (n=102 placettes/an).

Figure 3: Annual percentage of plots on which the foliar sampling was done in every cardinal direction (in black) and where more than half of the trees were sampled in the same direction (in white) (n=102 plots/year).

Directions de prélèvement par arbre

Sur les 715 arbres qui ont été échantillonnés cinq années de suite (de 1993 à 1997), 276 (39 %) ont été échantillonnés au moins trois fois dans la même direction et 54 (8 %) plus de trois fois.

La liste des 54 arbres qui ont été échantillonnés plus de trois fois dans la même direction est présentée en annexe (**Tableau A 4**, p.157)

1.3.3. Prélèvement des feuilles ou des aiguilles

Les rameaux une fois au sol, ainsi que les feuilles ou les aiguilles, sont manipulés avec des gants en polyéthylène afin de ne pas les contaminer. Les échantillons sont placés dans des sacs en polyéthylène microperforés.

Seules les feuilles entières, non touchées par les plombs, sont détachées pour constituer l'échantillon. Les feuilles humides sont séchées avec du papier absorbant avant d'être enfermées dans les sacs .

Les rameaux d'épicéa, de sapin et de douglas sont directement mis dans les sacs. Les aiguilles sont séparées des branches après un passage à l'étuve au laboratoire.

En cas de polycyclisme (chênes, douglas et pin maritime), ce sont les feuilles des premières pousses (pousses de printemps) qui sont prises en compte. Les pousses d'été sont exclues car leur développement n'est pas toujours complet au moment du prélèvement. Pour le mélèze, les aiguilles sont choisies sur les pousses de l'année précédente seulement. Cela pose un problème de

représentativité du fait des transferts possibles d'éléments entre les feuilles de première pousse vers celles de deuxième pousse.

Le réseau RENECOFOR comprend trois niveaux de suivi d'intensité différente (O.N.F., 1996). Le niveau 1 correspond aux observations de base réalisées dans les 102 placettes et caractérisant l'état sanitaire, la croissance des arbres et les conditions écologiques. Dans les 27 placettes de niveau 2 des mesures des dépôts atmosphériques humides sont réalisées en plus des observations de niveau 1 et dans 17 de ces 27 placettes les solutions de sol sont récoltées pour être analysées (niveau 3). Pour les résineux, seules les aiguilles de l'année en cours sont prélevées dans les placettes de niveau 1. Dans les placettes de niveaux 2 et 3, les aiguilles de l'année précédente sont également prélevées et étudiées séparément.

On obtient finalement par placette 8 échantillons pour les placettes de niveau 1, et 16 échantillons pour les placettes de résineux de niveau 2 ou 3.

1.3.4. Constitution de l'échantillon

Le suivi annuel des nutriments foliaires est réalisé chaque année sur un échantillon composite par placette. Une fois tous les 5 ans à partir de 1997, chacun des 8 arbres échantillonnés par placette est analysé individuellement pour estimer la variabilité intraplacette des teneurs en nutriments foliaires. A cette occasion le prélèvement individuel est plus important.

Une partie des feuilles et aiguilles récoltées est utilisée pour estimer le poids sec de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (désigné dans la suite du texte par: "masse foliaire^{100f}" ou "masse foliaire^(1000a)" selon qu'il s'agit des feuillus (100 feuilles) ou des résineux (1000 aiguilles)). Ces masses foliaires^{100f} ou ^(1000a) ne doivent en aucun cas être confondues avec la masse foliaire qui désigne la masse foliaire totale à l'échelle de l'arbre et qui est reliée à la productivité de l'arbre. Les masses foliaires^{100f} et masse foliaire^(1000a) ainsi que les minéralomasses^{100f (1000a)} qui en découlent serviront uniquement dans la suite de ce rapport à étudier (1) les variations de masse foliaire et de minéralomasse contenue dans un nombre fixé de feuilles ou d'aiguilles en fonction des placettes ou de l'année, et (2) à étudier les relations avec les éléments dans le sol, l'accroissement en diamètre des arbres et leur niveau de défoliation. Une autre partie de l'échantillon est utilisé pour effectuer des analyses chimiques. Les mesures de poids sec et les analyses chimiques sont réalisées sur un échantillon moyen constitué d'un mélange d'un nombre égal de feuilles ou d'aiguilles provenant des huit prélèvements par placette. Pour les feuillus, l'échantillon de 100 feuilles est constitué de 12 ou 13 feuilles par arbre, indépendamment de leur taille. Pour les résineux, la masse sèche des 1000 aiguilles a été obtenue en prélevant 50 aiguilles par arbre sur les 8 arbres par placette puis en extrapolant à 1000 aiguilles. Le mélange est constitué au laboratoire.

Il faut au minimum 15 g de poids sec de feuilles ou d'aiguilles pour les analyses chimiques et 100 feuilles ou 400 aiguilles pour le calcul du poids sec. Suite aux prélèvements foliaires réalisés de 1993 à 1996, le nombre total de feuilles ou d'aiguilles par arbre nécessaires pour effectuer ces analyses a pu être précisé pour chaque essence (**Tableau A 2**, p.155). Dans le cas d'un échantillon moyen (par placette), il faut entre 10 et 60 feuilles environ par arbre pour les chênes et le hêtre, entre 60 et 800 aiguilles environ par arbre pour les résineux autres que le mélèze et entre 850 et 4000 aiguilles par arbre pour le mélèze. Pour les analyses individuelles (tous les 5 ans), il faut entre 150 et 400 feuilles par arbre pour les chênes et le hêtre, entre 500 et 6000 aiguilles par arbre pour les résineux autres que le mélèze et entre 6000 et 29000 aiguilles par arbre pour le mélèze.

1.3.5. Echantillon composite, méthodes, avantages et limitations

Les échantillons composites sont utilisés dans différents domaines de recherche pour obtenir à moindre coût l'information désirée sur les échantillons individuels (Voir la synthèse bibliographique

de Boswell et al. 1996). La constitution des échantillons composés est réalisée par le mélange physique de sous-échantillons extraits des échantillons individuels. La méthode la plus simple pour constituer l'échantillon composé est de mélanger des parts égales de chaque sous-échantillon. Si les parts sont inégales mais connues, il est possible de réaliser un ajustement sur les valeurs. Si les parts sont inconnues ou réparties au hasard, la formulation mathématique devient plus complexe. Différentes méthodes de constitution de l'échantillon composite ont été utilisées dans le domaine forestier. Elles diffèrent par le poids respectif accordé à chaque échantillon individuel. Dans une étude de fertilisation consacrée aux échantillons composites pour les analyses foliaires, Snowdon et Waring (1984) ont testé 4 méthodes de constitution des échantillons composites sur *Pinus radiata*: (1) même masse de feuilles pour chaque arbre, (2) masse de feuilles proportionnelle à la hauteur de l'arbre, (3) masse de feuilles proportionnelle au poids de 20 rameaux, et (4) masse d'échantillon proportionnelle à la surface terrière de l'arbre. Dans cette étude, la meilleure estimation des valeurs moyennes de nutriments foliaires au niveau de la placette a été obtenue avec des échantillons composés d'un poids égal de feuilles pour chaque arbre. Le nombre d'arbre à échantillonner pour atteindre une précision donnée sur la moyenne est par conséquent moins élevé pour les échantillons composés à poids égal de feuille par rapport à ceux constitués d'un poids inégal.

Les avantages des échantillons composites sont essentiellement de 4 types (Garner et al. 1988): (1) la diminution du coût peut être importante si celui de l'échantillonnage est inférieur à celui de l'analyse, (2) le nombre de tests déclarés significatifs alors qu'ils ne le sont pas en réalité est réduit, (3) la variance observée est diminuée, et (4) la quantité de matériel mesurable est augmentée. Les inconvénients de la méthode sont: (1) une perte d'information, (2) la possibilité de trouver des résultats négatifs alors qu'ils ne le sont pas en réalité, et (3) une augmentation des coûts si l'échantillonnage revient plus cher que l'analyse.

1.3.6. Problèmes rencontrés lors des prélèvements

Lors des prélèvements foliaires, les STIR notent tout phénomène pouvant avoir une influence sur la composition foliaire et sur la qualité des analyses. Ces observations concernent aussi bien les conditions météorologiques que des caractéristiques du peuplement, de l'arbre échantillonné, du houppier, des feuilles, ... Elles ont été regroupées et classées en plusieurs catégories (**Tableau 5**, p.17).

Le nombre de placettes où il est fait mention de problèmes particuliers (observations) a augmenté de 1993 à 1997, et surtout entre 1993 et 1994 et 1996 et 1997. En moyenne, 43 % des placettes sont concernées, mais ce pourcentage varie selon les années. En 1993, 21 % des placettes ont fait l'objet d'observations particulières, en 1994 : 48 %, en 1995 : 47 %, en 1996 : 41 % et en 1997 : 59 %, soit 3 fois plus qu'en 1993.

Les difficultés de prélèvement ou de changement de direction de prélèvement sont principalement dues à des problèmes de visibilité ou d'accès aux branches dans les peuplements trop denses (houppiers imbriqués) et/ou ayant un sous-étage important. Cette situation concerne une à neuf placettes selon les années.

Très peu d'échantillons foliaires n'ont pas été prélevés dans le tiers supérieur du houppier : un cas en 1993 et deux en 1997.

Quelques prélèvements ont été effectués dans des conditions météorologiques humides (pluie, brouillard, neige) : 3 à 7 placettes par an, sauf en 1996 où aucune observation sur le temps n'a été rapportée.

Les échantillons foliaires ont été séchés et/ou stockés au froid avant leur envoi au laboratoire dans 9 placettes en 1993 et dans une seule placette en 1994 et en 1995.

Dans l'ensemble, le protocole d'échantillonnage a bien été respecté et assez peu de peuplements présentent des difficultés inquiétantes de prélèvement.

Tableau 5: Observations notées par les STIR lors des prélèvements foliaires.

Table 5 : *Observations made by the Regional Technical Sections (STIR) during foliar sampling.*

Catégorie d'observations	Modalités
Conditions météorologiques lors du prélèvement	Pluie, neige, brouillard, tempête (embruns)
Structure du peuplement	Eclaircie, densité
Vigueur de l'arbre	Dépérissant, dominé, présence d'une blessure, ...
Remplacement d'un (ou des) arbre(s)	Causes du remplacement
Espèce	Chêne sessile ou pédonculé
Aspect du houppier	Taille, dissymétrie, densité du feuillage, présence de fructifications ou d'inflorescences
Aspect des feuilles	Taille, présence de tâches, nécroses, déformation et agent responsable (oidium, insectes, rouille, gel, grêle, ...)
Age des feuilles/aiguilles	Polycyclisme, nombre d'années d'aiguilles
Niveau de prélèvement lorsqu'il ne correspond pas au 1/3 supérieur du houppier	Centre du houppier, mi-hauteur
Direction de prélèvement	Changement de direction impossible, plusieurs directions/arbre, ...
Difficultés de prélèvement (visibilité)	Hauteur des arbres, densité, sous-étage, taille réduite des houppiers, nb de cartouches nécessaires
Manipulation des échantillons après la récolte	Séchage (par essuyage ou à l'air), stockage au froid avant envoi

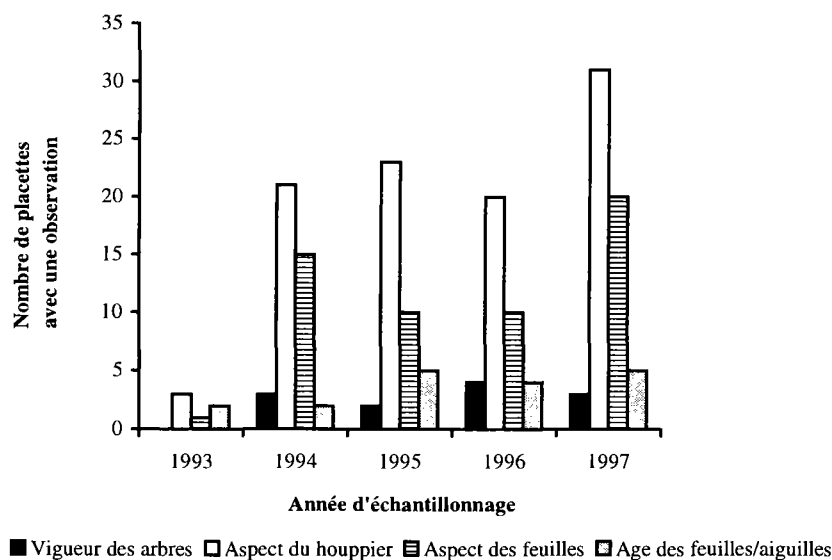


Figure 4: Nombre annuel de placettes avec une ou plusieurs observations d'un type donné (cf. Tableau 5, p.17).

Figure 4: *Number of plots per year for which the Regional Technical Centers (STIR) transmitted observations made during foliar sampling (black bar : observation on tree vigour ; white bar : on crown condition ; horizontally striped bar : on leaf condition; dotted bar : on leaf/needle age). See also Table 5.*

La fréquence des autres types d'observations au cours des cinq premières années d'échantillonnage est illustrée ci-dessous (**Figure 4**, p.17). La majorité des observations est liée à l'aspect des houppiers et à l'état des feuilles et correspond le plus souvent à des observations de type sanitaire. Ces observations sont en augmentation depuis 1993, probablement en relation avec la familiarisation et la sensibilisation progressives des préleveurs à l'importance de ces informations. En cas de présence d'oïdium, de jaunissement ou de nécroses il n'est pas toujours précisé si cela concerne aussi les feuilles de l'échantillon. Cette information est pourtant importante pour l'interprétation des résultats des analyses chimiques.

2. Préparation des échantillons pour l'analyse

2.1. Procédure générale

Les échantillons foliaires sont envoyés au laboratoire immédiatement après leur prélèvement (soit le même jour, soit le lendemain de la récolte). Dans certains cas ils ont pu être momentanément stockés au réfrigérateur avant d'être envoyés.

Une fois au laboratoire les échantillons destinés aux analyses chimiques sont séchés à l'étuve à 40 °C afin d'éviter toute évolution chimique ou toute dégradation due à l'humidité. Ils sont ensuite pesés puis broyés pour les analyses. Les échantillons moyens par placette sont constitués du mélange d'un poids identique de chacun des 8 échantillons individuels.

D'autre part, un échantillon de 100 feuilles ou de 400 aiguilles par placette est constitué séparément en prenant le même nombre (ou un nombre proche) de feuilles dans chacun des 8 sacs. Ce deuxième échantillon est séché à l'étuve à 80 °C pour déterminer le poids sec de 100 feuilles ou de 1000 aiguilles.

2.2. Test de lavage des échantillons

L'analyse des éléments foliaires est couramment réalisée à partir d'échantillons non lavés. Or les éléments totaux dosés dans les feuilles se retrouvent également dans les dépôts atmosphériques et peuvent introduire un biais dans les analyses foliaires. On peut penser que ce risque est limité dans le cas des macronutriments (azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, et magnésium) qui se trouvent à des teneurs assez élevées dans les feuilles et les aiguilles (de l'ordre du mg/g jusqu'à environ 20 mg/g selon les éléments). Par contre, les micronutriments (sodium, chlore, aluminium, fer, manganèse, cuivre, et zinc) sont présents dans les feuilles à des teneurs plus faibles (de quelques µg/g jusqu'à quelques mg/g selon les éléments) et le biais induit par l'intégration des dépôts atmosphériques dans leur dosage risque d'être plus conséquent. Pour obtenir une première évaluation de l'importance de cette pollution des feuilles par des éléments non constitutifs, des tests de lavage d'échantillons ont été réalisés en 1996 et en 1997 sur trois placettes de pin maritime du réseau.

2.2.1. Protocole

En 1996 et en 1997, trois placettes de pins maritimes (PM 17, PM 72, et PM 85) ont été sélectionnées pour prélever des échantillons foliaires sur 10 arbres non numérotés et situés à l'extérieur de la zone neutre mais à proximité de chaque placette. Le protocole habituel de prélèvement a été respecté.

Au laboratoire, chaque échantillon frais a été séparé en deux fractions dont une n'a pas été lavée, et l'autre a été lavée en 3 étapes: (1) immersion rapide (quelques secondes) dans une solution à 1 ‰

HNO₃ + 0,1 ‰ de TRITON X (mouillant neutre), (2) trempage rapide dans un bain d'eau bipermutée, et (3) rinçage dans un bain d'eau distillée.

Les deux sous-échantillons ont ensuite été séchés à 40 °C puis broyés et analysés selon le protocole habituel. Les 13 éléments foliaires analysés chaque année pour l'ensemble des placettes RENECOFOR ont été dosés dans ces tests.

Le plan d'expérience se résume donc à la comparaison des teneurs foliaires sur des échantillons appariés (lavés - non lavés) pour trois placettes et deux années. Des tests "t" unilatéraux basés sur l'analyse des différences de teneur entre échantillons appariés ont été utilisés. Une première série de tests a permis de mettre en évidence l'effet (ou l'absence d'effet) du lavage en 1996 et en 1997 sur les teneurs foliaires des trois placettes considérées globalement. Ensuite, les mêmes tests ont été réalisés sur chaque placette individuellement et pour chaque année pour discerner une éventuelle relation avec le site de prélèvement.

2.2.2. Résultats

Le lavage des aiguilles n'a pas eu d'effet significatif sur les teneurs foliaires en macronutriments foliaires, aussi bien en 1996 qu'en 1997 à l'exception du soufre en 1996 (**Tableau 6**, p.20).

Au niveau des micronutriments, le lavage des aiguilles a provoqué une diminution significative des teneurs en Na, et Cl indépendamment de l'année de prélèvement et fonction de l'année de prélèvement pour les teneurs en Fe, et Cu (différence en 1996 et pas de différence en 1997). Le lavage entraîne une diminution des teneurs foliaires en chlore, en sodium, en fer, et en cuivre respectivement d'environ 13 %, 7 %, 8 %, et 21 %.

Les tests de lavage ont ensuite été réalisés séparément sur les trois placettes PM 17, PM 72, et PM 85 (**Tableau 7**, p.21). L'effet "lavage" est nettement différent entre placettes et selon les années. On note également que certains tests montrent une augmentation significative des teneurs analysées dans les échantillons lavés (PM 17, N en 1997; PM 72, Cu en 1997, PM 85, P et K en 1996). Cela pourrait résulter d'un problème d'homogénéisation des échantillons avant leur division en "échantillons lavés" et "échantillons non lavés". En dehors de ces résultats, le lavage a provoqué une diminution significative de l'azote (en 1996) et pour le cuivre (seulement en 1997) pour PM 17. Cet effet "lavage" est très marqué pour la placette PM 85 en 1996 (Mg, S, Na, Cl, Fe), et pratiquement inexistant en 1997 où seules les quantités de chlore dosées sont diminuées par le lavage. Pour la placette PM 72, le lavage entraîne une diminution significative des quantités dosées de sodium (1997), de fer (1996) et de cuivre (1996).

2.2.3. Conclusions

Ces premiers tests montrent que l'absence de lavage des aiguilles de pin maritime affecte plus les micronutriments que les macronutriments. Des résultats similaires ont été obtenus pour l'épicéa (Krivan et Schaldach, 1986; Mitschick et Fiedler, 1991) et le sapin (Mitschick and Fiedler, 1991). Parmi les macroéléments, nos tests montrent que le soufre semble globalement le plus sensible à ce type de biais, tandis que le phosphore et le potassium peuvent ponctuellement être affectés par ce biais selon le site et l'année.

Parmi les 7 micronutriments analysés, 3 n'ont montré aucune différence avec ou sans lavage (Al, Mn, et Zn), et 4 autres ont présenté une surévaluation de 10 % à 20 % dans les échantillons non lavés (Na, Cl, Fe, et Cu).

Tableau 6: Résultats des tests de lavage des aiguilles de pin maritime par test "t" apparié sur les teneurs en nutriments foliaires. Les teneurs en macronutriments sont exprimées en mg/g, celles des micronutriments en µg/g. Les trois placettes de pin maritime (PM 17, PM 72, et PM 85) sont regroupées dans ces tests. Les tests unilatéraux montrant une différence significative à 5 % entre les échantillons lavés et non lavés sont indiqués en gras souligné. (Moy = moyennes, Var = variances, n = effectifs, t = "t" calculé de Student, et P(T ≤ t) = probabilité que la valeur théorique "T" soit ≤ à la valeur calculée "t").

Table 6 : Results of washing tests on nutrient concentrations in needles for three plots of *Pinus pinaster* in 1996 and 1997 (paired unilateral "t" tests). For Macronutrients, concentrations are in mg/g and for micronutrients, in µg/g. Only significant differences between washed and un-washed samples are marked (**Bold underscored**). (Moy = average, Var = Std dev, t = calculated "t" Student).

Eléments	Traitements	1996					1997				
		Moy	Var	n	t	Test P(T ≤ t)	Moy	Var	n	t	Test P(T ≤ t)
N	Lavé	7,64	2,57	30	-1,10	0,140	7,74	2,30	30	0,54	0,296
	Non lavé	7,82	2,83	30			7,65	2,03	30		
P	Lavé	0,62	0,04	30	0,91	0,186	0,72	0,03	30	0,06	0,475
	Non lavé	0,61	0,04	30			0,72	0,03	30		
K	Lavé	3,40	0,63	30	1,11	0,138	4,56	0,94	30	-1,07	0,146
	Non lavé	3,33	0,75	30			4,68	1,33	30		
Ca	Lavé	3,57	0,83	30	-0,43	0,334	2,55	0,37	30	0,13	0,449
	Non lavé	3,60	0,89	30			2,54	0,33	30		
Mg	Lavé	1,53	0,11	30	-0,93	0,181	1,55	0,09	30	-0,47	0,320
	Non lavé	1,55	0,13	30			1,56	0,09	30		
S	Lavé	0,96	0,02	30	-1,90	0,034	0,96	0,01	30	0,56	0,289
	Non lavé	0,99	0,02	30			0,95	0,01	30		
Na	Lavé	749,2	191,2	30	-1,99	0,028	570,5	77,2	30	-2,43	0,011
	Non lavé	798,4	224,3	30			612,2	103,3	30		
Cl	Lavé	437,1	101,6	30	-3,10	0,002	490,7	52,5	30	-2,06	0,024
	Non lavé	523,9	170,0	30			538,9	90,0	30		
Al	Lavé	95,2	1,6	30	-0,84	0,205	92,9	2,6	30	1,35	0,094
	Non lavé	97,1	1,9	30			84,5	2,7	30		
Fe	Lavé	51,2	0,1	30	-3,71	0,000	34,0	0,1	30	-1,45	0,078
	Non lavé	55,9	0,1	30			35,2	0,1	30		
Mn	Lavé	150,4	33,2	30	0,21	0,419	105,6	11,6	30	-0,42	0,340
	Non lavé	149,3	29,7	30			106,7	12,7	30		
Cu	Lavé	1,9	0,3	30	-2,64	0,007	2,5	0,7	30	-0,48	0,316
	Non lavé	2,4	1,1	30			2,6	1,2	30		
Zn	Lavé	27,4	68,9	30	-0,15	0,441	30,3	36,0	30	0,33	0,371
	Non lavé	27,5	71,8	30			30,1	35,1	30		

Ces résultats concordent globalement avec ceux obtenus par Mitschick and Fiedler (1991) en ce qui concerne Al, Mn, Cu, et Fe, mais les différences plus importantes dans leur cas entre échantillons non traités et échantillons lavés (20-40 % pour Fe, 10-30 % pour Al, 15-40 % pour Cu) pourraient être due à la technique de lavage. Dans une étude sur épicéa, Krivan et Schaldach (1986) ont montré que, selon les éléments (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Sb, Sc, et Th), selon le site de prélèvement, et selon l'âge des aiguilles, entre 20 et 95 % de ce qui est analysé et qui est généralement considéré comme le contenu total des feuilles correspond en réalité aux dépôts de surface.

La technique de lavage que nous avons réalisé pose d'autre part la question suivante: quelle proportion d'éléments réellement présents à la surface des aiguilles est éliminée par ce procédé? Krivan et Schaldach (1986) apportent un élément de réponse en évaluant cette proportion à 10-80 % selon les éléments pour l'épicéa. Le lavage au chloroforme leur a permis d'éliminer la quasi totalité des dépôts de surface. La valeur de référence était dans cette étude un décapage complet de la

surface des aiguilles. Ces valeurs indiquent finalement que le risque de sous-estimer la surévaluation des teneurs foliaires en nutriments en effectuant un simple lavage des aiguilles à l'eau peut être important selon les éléments. Un complément d'information dans le cadre du réseau RENECOFOR semble donc souhaitable.

Nos tests montrent également que le biais dû à l'absence de lavage des aiguilles dépend fortement des sites de prélèvements, et de l'année. Les études citées ci-dessus rapportent les mêmes conclusions. Malgré le nombre réduit de placettes et d'années d'analyse, un rapprochement avec les valeurs de dépôts atmosphériques totaux (sous couvert ou hors couvert) enregistrées sur (ou à proximité des mêmes placettes (sous-réseau CATAENAT du réseau RENECOFOR), montre que plus les dépôts sont importants, plus le biais dû à l'absence de lavage des aiguilles est important. Ce constat est valable en 1996 pour le chlore et le sodium aussi bien par rapport aux dépôts hors couvert que sous couvert, pour le potassium (hors couvert), et le fer (sous couvert) (les valeurs de dépôts totaux peuvent être consultées dans Ulrich et al. 1998). En 1997, les mêmes constatations sont valables pour le chlore. Par contre, le test "lavage" qui était significatif pour le sodium dans la placette PM 85 en 1996, ne l'est plus en 1997. On remarque dans ce cas que les dépôts totaux de Na en 1997 sont à leur niveau le plus bas depuis 1993 (hors couvert 89 Kg/ha/an en 1997, 129-142 Kg/ha/an entre 1993 et 1996).

Finalement les tests réalisés montrent que le biais dû à l'absence de lavage des feuilles peut être une source d'erreur non négligeable pour l'analyse de certains nutriments foliaires. Avant de proposer une modification du protocole de préparation des échantillons pour toutes les analyses foliaires du réseau RENECOFOR, une évaluation plus précise de ce biais pour les différents nutriments paraît donc souhaitable notamment en fonction (1) des essences, (2) du site et (3) de l'année de prélèvement. D'autre part, il semble exister une relation entre les dépôts atmosphériques mesurés sous couvert et l'importance du biais sur les analyses foliaires quand les échantillons ne sont pas lavés avant analyse. La modélisation de cette relation permettrait d'appliquer des facteurs correctifs sur les analyses foliaires déjà réalisées.

Tableau 7: Résultats du test de lavage des aiguilles de pin maritime par test t apparié sur les teneurs foliaires en nutriments. Les tests portent séparément sur les trois placettes de pin maritime (PM 17, PM 72, et PM 85). Seules les différences significatives au seuil de 5 % (tests unilatéraux) entre les échantillons lavés et non lavés sont indiqués par un S.

Table 7: Results of washing tests nutrient concentrations in needles for three plots of *Pinus pinaster* (PM 17, PM 72, and PM 85) in 1996 and 1997 (paired unilateral "t" test). Only significant differences between washed and un-washed samples are marked (S).

Eléments	PM 17		PM 72		PM 85	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997
N	S	S				
P					S	
K					S	
Ca						
Mg					S	
S					S	
Na				S	S	
Cl					S	S
Al						
Fe			S		S	
Mn						
Cu		S	S	S		
Zn						

3. Analyse des échantillons foliaires

Le Laboratoire d'Etudes et de Recherches Méthodologiques en Analyses Végétales et Environnementales (LERMAVE)⁴ est issu de la fusion de l'ancien Laboratoire d'Analyse des Végétaux (LAV) et de la Station d'Agronomie de Bordeaux. Il est constitué de l'équipe du LAV et de l'ancienne équipe " analyse des éléments en traces de la Station d'Agronomie ".

Ce laboratoire est un laboratoire de référence de l'Union Européenne dans le cadre de la division " Normes, mesures et essais " (ex. BCR = Bureau Communautaire de Référence), à ce titre il participe à la certification d'échantillons de référence et à la mise au point de méthodes nouvelles en vue de leur normalisation.

L'activité principale du laboratoire est l'analyse pour les chercheurs de l'INRA et pour les organismes professionnel ou d'état tels que l'ONF, le GEVES, l'ITCF ou l'ADEME...

C'est à ce titre que le LAV puis le LERMAVE ont effectués les analyses foliaires relatives au programme RENECOFOR⁵.

3.1. Matériel et techniques analytiques

Prise en charge : les échantillons après avoir été répertoriés sont identifiés avec un numéro interne du laboratoire et font l'objet d'un archivage sur serveur central.

Pesées : balances de précision de différentes sensibilités selon les besoins :

- balance du type " Delta range " d'une portée de 8000 g avec une précision de 10 mg entre 0 et 800 g et de 100 mg au delà pour les pesées d'échantillons importants frais ou secs avant broyage.
- balance de précision du type " Delta range " d'une portée de 200 g avec une précision de 0,01 mg entre 0 et 62 g et de 0,1 mg au delà pour les dosages d'azote " DUMAS ".
- balances de précision d'une portée de 200 g avec une précision de 0.1 mg pour les autres déterminations.

Toutes les balances sont connectées à un ordinateur lui-même relié au serveur central. La saisie des pesées est entièrement informatisée.

La salle des balances est climatisée afin d'éviter toute dérive de pesée liée à des variations de température. Les balances font l'objet d'une révision annuelle et d'un étalonnage par un service spécialisé extérieur au laboratoire. Le laboratoire dispose de masses de référence permettant de vérifier régulièrement la justesse des balances utilisées.

Etuves ventilées : pour effectuer les opérations de séchage des échantillons, le laboratoire utilise divers types d'étuves ventilées. Le réglage des températures correspond aux types de détermination devant être effectuées : <50°C pour les déterminations comportant des éléments volatils, 80°C pour l'ensemble des autres éléments, 105°C pour la détermination de l'humidité résiduelle.

Broyages : le laboratoire dispose de différents types de broyeurs. Pour les échantillons à caractère environnemental deux broyeurs sont utilisés:

- broyeur planétaire équipé de bols de broyage et de billes en oxyde de zirconium. Ce mode de broyage garantit l'absence de pertes élémentaires et de pollution; en outre après broyage l'échantillon est parfaitement homogénéisé. Ce type de broyeur permet de traiter

⁴ Le Directeur a été entre 1993 et 1995 Monsieur A. Schneider. Depuis 1995 c'est Monsieur A. Gomez., ingénieur-chimiste, ingénieur de recherches à l'INRA et expert européen en matière d'analyses minérales environnementales. Il est membre du comité d'animation du réseau AQUACON, président de la Commission " Eléments en traces " du BIPEA en France.

⁵ Sauf indication contraire, le matériel ou les techniques présentés ci-après ont été mis en œuvre depuis le début des analyses en 1993.

des échantillons d'une masse allant d'une centaine de grammes (bols de 500 ml) à quelques grammes (bols de 50 ml). (depuis 1995)

- Vibro-broyeur oscillant équipé de bols et de billes en oxyde de zirconium. Ce broyeur présente les mêmes avantages que le précédent mais le volume réduit des bols (10 ml) permet de traiter des échantillons de petites tailles (<1 g). Il est plus particulièrement utilisé pour les échantillons sur lesquels on effectue la détermination du carbone. (depuis 1997)

Pour les échantillons du réseau RENECOFOR, des broyeurs à couteaux en acier peuvent être utilisés sans incidence sur la qualité de l'échantillon.

Fours à moufle ventilés : le laboratoire dispose de plusieurs fours à moufle permettant d'effectuer la calcination de poudre végétale dans des capsules en porcelaine. Une température de 450°C est utilisée pour calciner les échantillons avec reprise pour dosage ultérieur; on travaille à 550°C pour déterminer la matière organique par perte au feu et les matières minérales. Ces fours sont pilotés par un programmeur électronique externe (depuis 1997).

Plaques chauffantes : Les plaques chauffantes utilisées au laboratoire sont du type " bloc chauffant en graphite ". Cette particularité assure l'absence de pollution métallique, toujours possible en milieu acide lorsque le bloc chauffant est constitué de fonte. Elles sont placées sous hottes aspirantes, dont l'une d'entre elle est spécialement conçue pour le travail en milieu acide fluorhydrique. Elle est utilisée pour les éléments nécessitant cette attaque : Al et Mo (à titre indicatif car cet élément n'est pas analysé dans les échantillons RENECOFOR).

Minéralisations en voie humide : le laboratoire dispose de différents types de minéralisateurs :

- minéralisateurs du type bloc chauffant en fonte d'aluminium pilotés par microprocesseur et pouvant compter 20 étapes de chauffe. Ce type de minéralisateur est équipé de tubes de 100 ml et d'un système de captage des vapeurs. Il est utilisé pour des minéralisations Kjeldahl.
- minéralisateurs du type bloc chauffant en fonte d'aluminium pilotés par microprocesseur et pouvant compter 20 étapes de chauffe. Ce type de minéralisateur est équipé de tubes de 200 ml, de réfrigérants à reflux et d'un dispositif relevant les tubes en fin de minéralisation. Cet ensemble assure une parfaite reproductibilité des processus de minéralisation. Il est utilisé pour la minéralisation de la plupart des éléments hormis l'azote, le bore et l'aluminium.
- minéralisateurs à micro-ondes pilotés par ordinateur. Ces appareils sont dotés d'un carrousel à 16 postes recevant des tubes en Téflon et d'un automate de transfert permettant de chauffer par micro-ondes successivement les tubes selon un ou plusieurs programmes de chauffe. Ce dispositif permet les attaques en milieu fluorhydrique pour la détermination de l'aluminium. Il est également utilisé pour les analyses comportant la détermination du bore par attaque acide nitrique/eau oxygénée.

Filtration et dilutions : le laboratoire est équipé de rampes de filtration sous hotte aspirante permettant une mise en solution dans des conditions de sécurité optimales pour les échantillons et le personnel. Pour effectuer d'éventuelles dilutions, le laboratoire utilise des dilueurs à programmation électronique dotés de différents jeux de seringues calibrées permettant une large gamme de dilution dans des conditions de justesse et de reproductibilité optimales.

Appareils de mesures :

Tous les appareils de mesure sont situés dans des salles climatisées afin d'éviter des dérives liées à des variations de température.

Dosage de l'azote :

- Azote Dumas: le laboratoire possède un appareillage de type CHN spécialement conçu pour le dosage de l'azote total après combustion des échantillons dans un flux d'oxygène à haute température et séparation chromatographique de N₂ après piégeage de l'eau, de CO₂ et SO₂. Cet appareil, piloté par ordinateur, est relié à une balance de précision permettant de calculer directement les pourcentages d'azote. Les résultats sont édités sur support papier ou informatique, sous cette dernière forme ils sont directement exploités par le serveur central.
- Azote Kjeldahl: cette forme d'azote est dosée par distillation à l'aide d'un appareil de distillation à titration automatique.

En ce qui concerne les échantillons du réseau RENECOFOR, il n'y a pas de différences significatives entre les résultats des deux méthodes.

Dosage de Cl :

Le dosage du chlore est effectué par chromatographie ionique. La chaîne chromatographique comprend: un système informatique de gestion, des pompes à gradient, un détecteur conductimétrique, un suppresseur chimique, une précolonne et une colonne anionique, une boucle d'injection de 25µl et un passeur d'échantillons à 60 places.

Le dosage est effectué après calibration par mesure de surface de pics puis directement exploité par le serveur du laboratoire.

Dosage de P, K, Ca, Mg, S, Al, Mn, Cu, Zn, Na, Fe :

Pour ces éléments, l'un des appareils de dosage utilisés est le spectromètre d'émission plasma à couplage inductif par haute fréquence (ICP). Fonctionnant sous vide partiel d'argon pour pouvoir effectuer des mesures dans les courtes longueurs d'ondes, cet appareil permet de déterminer de façon séquentielle les différents éléments à des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de µg/l. Le dosage séquentiel permet d'optimiser les paramètres de travail élément par élément selon un programme préétabli et piloté par ordinateur. L'appareil est doté d'un passeur d'échantillons à 240 postes pouvant fonctionner sous contrôle informatique, soit en mode d'injection directe, soit en mode "ajouts dosés"⁶. Il est possible de programmer des opérations de dilution par le passeur d'échantillons. Le système informatique permet une recalibration périodique de l'appareil, il permet également de doser selon une séquence préétablie le même échantillon à des moments différents ce qui permet de détecter d'éventuelles dérives du système. Le logiciel de gestion des analyses comporte une séquence "contrôle de la qualité" conforme aux spécifications de l'agence américaine de protection de l'environnement (U.S.E.P.A.)

L'acquisition début 1997 d'un spectromètre d'émission plasma à couplage inductif par haute fréquence et visée axiale (ICP axiale) équipé d'un nébuliseur ultrasonique permet des gains de sensibilité de l'ordre de 100 à 150. Doté du même passeur d'échantillons que la torche précédente, il allie rapidité et sensibilité et autorise le dosage d'éléments traces (Cu par exemple) que seule la technique de spectrophotométrie d'absorption atomique par électrothermie permettait de doser jusqu'à présent, avec un rythme analytique très faible.

⁶ Cette technique revient à utiliser des quantités connues de substances étalon **dans des fractions d'échantillon** à analyser pour réaliser les calibrations. Une autre technique est de réaliser les calibrations avec des **solutions pures de substances étalon**, avec le risque que la calibration soit différente de celle réalisée dans le mélange de l'échantillon à analyser.

Techniques alternatives disponibles au laboratoire

Le laboratoire dispose d'autres appareillages permettant de doser de façon alternative les éléments suivants :

- Azote Kjeldahl : cette forme d'azote peut être dosée sur chaîne à flux continu par colorimétrie piloté par informatique. L'utilisation de la chaîne à flux continu permet l'exploitation informatique directe des résultats par le serveur.
- Dosage du soufre : servo-coulomètre équipé d'un four à combustion par induction. L'échantillon végétal en poudre est brûlé dans un creuset sous flux d'oxygène, les gaz de combustion sont entraînés dans une cellule à électrolyse munie d'électrode de mesure de potentiel électrochimique. Une électrolyse du milieu est effectuée automatiquement jusqu'au retour au potentiel d'origine (avant l'injection des gaz de combustion) correspondant à pH 4. La quantité de courant nécessaire pour cette opération est proportionnelle à la quantité de soufre présente dans la cellule.
- Dosage du phosphore : colorimètres à introduction manuelle ou faisant partie d'une chaîne à flux continu permettent d'effectuer des réactions colorimétriques spécifiques du phosphore (complexe bleu du phosphomolybdate réduit, réaction au vert de malachite). Chromatographe ionique (voir précédemment).
- Dosage du chlore : ionométrie à électrodes spécifiques piloté par microprocesseur et fonctionnant sur le principe de dosage des ajouts dosés.
- Dosage du Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, Fe : spectrophotomètres d'absorption atomique en flamme et spectrophotomètres d'absorption atomique par électrothermie (four graphite). Lorsque les concentrations de Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Fe sont de l'ordre du mg/l, il est possible de les doser en flamme; pour Al et lorsque les concentrations des cations précités sont trop faibles, le dosage est effectué au four graphite. Le laboratoire dispose de deux spectrophotomètres d'absorption atomique en flamme munis d'un dispositif de correction de fond non spécifique avec lampe au deutérium, le tout piloté par ordinateur. Il dispose de trois spectrophotomètres d'absorption atomique par électrothermie (four graphite) pilotés par ordinateur et correspondant à trois modes de correction de fond non spécifique (lampe au deutérium, effet Zeeman transversal et effet Zeeman longitudinal). Ces appareils sont équipés de passeurs d'échantillons pilotés par informatique permettant le dosage direct, en mode " ajouts dosés ". Le logiciel de gestion des analyses comporte une séquence " contrôle de la qualité " conforme aux spécifications de l'agence américaine de protection de l'environnement (U.S.E.P.A.)
- Dosage de K et Na : le potassium et le sodium peuvent être dosés en spectrométrie d'émission de flamme, dans ce cas, les spectrophotomètres d'absorption atomique sont équipé en spectrophotomètres d'émission.

Ces méthodes alternatives sont mises en œuvre en cas de contestation ou de doute sur les résultats.

3.2. Calculs, contrôle de qualité et édition des résultats

Pour effectuer les calculs inhérents aux analyses effectuées, le laboratoire a mis en place un réseau d'ordinateurs reliés à un serveur. Deux logiciels sont utilisés pour la gestion des échantillons et des résultats :

- " GESTQUAL " qui par l'intermédiaire de cartes de contrôles informatiques permet de suivre les valeurs obtenues sur des échantillons de référence et sur des blancs d'attaque. L'examen des valeurs moyennes obtenues et des écarts types permet de valider ou non la série analytique. Trois échantillons de référence et trois blancs d'attaque sont systématiquement introduits dans toute série analytique. Une série analytique est

constituée de 60 à 100 échantillons; actuellement nous la limitons à 60 échantillons pour assurer un meilleur contrôle)

- “STARLIMS” qui assure la traçabilité des échantillons tout au long de la chaîne analytique, et qui permet d’effectuer toutes les opérations de calcul et d’édition des résultats.

3.3. Méthodes analytiques

3.3.1. Précautions d’ordre général concernant l’analyse élémentaire

1. Tous les réactifs utilisés pour les analyses sont de qualité “Baker pour analyses” et comportent une fiche d’analyses indiquant les teneurs maximales élémentaires par lot de fabrication. Au moment du changement de bouteilles de réactifs des blancs d’attaque sont systématiquement constitués et analysés.
2. Lorsqu’une série analytique comprend des éléments en traces, l’eau utilisée est de l’eau distillée fabriquée à partir d’eau bipermutée. Les pissettes utilisées pour les filtrations sont affectées à titre personnel aux agents du laboratoire et sont rangées dans un placard fermé à clé.
3. Pour éliminer le risque de contamination par les distributeurs de réactifs, la procédure est la suivante : le distributeur est placé en position “0” en fin d’utilisation pour éviter de laisser en contact avec le corps du distributeur le réactif; au début de l’utilisation le distributeur est rincé deux fois et le réactif ainsi obtenu est jeté. De façon aléatoire, en cours de série, des blancs d’attaque sont constitués afin de vérifier une éventuelle pollution. Les distributeurs de réactifs sont conçus de manière à ne pas prendre les fonds de flacons, ce qui évite de pomper des impuretés qui se seraient déposées. L’eau oxygénée n’est pas distribuée par un distributeur pour des raisons de conservation de son pouvoir oxydant, mais à l’aide d’une pipette à piston munie d’un embout plastique jetable; entre deux utilisations le flacon est stocké au réfrigérateur.
4. Le problème de la vaisselle est traité de la façon suivante :
 - Tubes d’attaque par voie humide : lavage manuel (à cause des risques de bris, les tubes ne sont pas passés en machine), stockage dans un placard fermé à clé sous papier filtre, avant utilisation trempage 24 h dans une solution d’acide nitrique à 10 %, triple rinçage à l’eau bipermutée, rinçage à l’eau distillée.
 - Fioles jaugées, bouchons en polypropylène haute densité, entonnoir de filtration : lavage en machine comportant plusieurs rinçages finaux à l’eau bipermutée. Stockage dans une armoire fermée à clé sous papier filtre, avant utilisation trempage 24 h dans une solution d’acide nitrique à 10 %, triple rinçage à l’eau bipermutée, rinçage à l’eau distillée. Les bouchons en polypropylène ont tendance à devenir poreux avec le temps et peuvent piéger des éléments. L’utilisation de blancs d’attaque permet de détecter ce phénomène et d’éliminer les lots de bouchons défectueux.
 - Le séchage de cette vaisselle n’est pas effectué dans une armoire commune de la laverie, mais dans une armoire spécialement réservée pour ce type de vaisselle. Les réfrigérants des blocs de minéralisation sont rincés à l’acide nitrique 30 %, puis à l’eau permutée et à l’eau distillée. Les réfrigérants sont du type à serpentín intérieur (réfrigérant de Graham) ce qui permet un lavage plus efficace que pour les réfrigérants à boules.

3.3.2. Procédures analytiques relatives à la détermination des éléments

1. **Pesées** : Les pesées sont effectuées dans un local spécialement conçu à cet effet. Les balances font l’objet d’un entretien et d’une vérification annuelle par une société spécialisée. Lors des vérifications effectuées depuis 1994, aucune anomalie n’a été

détectée. Des vérifications régulières sont effectuées à l'aide de poids de référence, à ce jour il n'a jamais été trouvé de dérive de pesée sur nos balances.

La saisie des valeurs de pesée est effectuée par voie informatique, ce qui exclut toute erreur de transcription.

Au moment de la pesée, si les échantillons sont réputés homogènes, il est procédé à un brassage de l'échantillon à l'aide d'une spatule pour vérifier visuellement l'homogénéité. Si les échantillons présentent une hétérogénéité, on ajoute une bille en oxyde de zirconium à l'échantillon et on le met en agitation pendant un minimum de deux heures sur un agitateur rotatif vertical. Si l'hétérogénéité est liée à une granulométrie incompatible avec la prise d'essai, il est procédé à un nouveau broyage de l'échantillon.

Dans le cas de minéralisation par voie humide, la pesée est effectuée dans le tube de minéralisation.

- 2. Minéralisation :** les réactifs acides sont ajoutés à l'aide de distributeurs à volume fixe en respectant la procédure décrite plus haut. Les tubes sont placés sous hotte et recouvert de papier filtre ou directement installés sur les blocs de minéralisation munis de leur réfrigérant (minéralisation devant démarrer de nuit) pour une phase de prédigestion de 12 h. La minéralisation proprement dite est effectuée sous le contrôle d'un programmeur électronique garantissant la répétabilité des opérations de chauffe. En cas de coupure d'électricité, le programme est remis à zéro et l'appareil s'arrête. Pour chaque type de minéralisation (HNO₃ - H₂O₂, eau régale, réactif de Dénigès-Hg), un programme a été établi, testé avec des échantillons de référence de composition certifiée. La vérification de l'homogénéité de la température de chauffe a été effectuée à l'aide d'une sonde placée dans les différents tubes situés sur le bloc de minéralisation : aucune différence notable n'a pu être détectée. Les méthodes de minéralisation (ou d'extraction) n'ont pas changé entre 1993 et 1998 pour l'azote, le soufre, et le chlore (**Tableau 8**, p. 27). Pour tous les autres éléments, la minéralisation a été faite par voie sèche jusqu'en 1995, et par voie humide ensuite.

Tableau 8 : Evolution des méthodes de minéralisation (extraction à l'eau pour le chlore) des échantillons foliaires du réseau RENECOFOR entre 1993 et 1998.

Table 8 : *Change in mineralization methods from 1993 to 1998 for foliar sampling in the RENECOFOR network.*

Eléments	1993	1994	1995	1996	1997	1998
N Kjeldahl	NF V18-100	NF V18-101	NF V18-102	NF V18-103	NF V18-104	NF V18-105
S	VH HClO ₄ /HNO ₃	VH HClO ₄ /HNO ₃	VH HClO ₄ /HNO ₃	VH HClO ₄ /HNO ₃	VH HClO ₄ /HNO ₃	VH HClO ₄ /HNO ₃
Cl	EXE	EXE	EXE	EXE	EXE	EXE
P	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
K	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Ca	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Mg	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Na	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Al	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Fe	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Mn	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Cu	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF
Zn	VS reprise HF	VS reprise HF	VS reprise HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF	VH HNO ₃ /H ₂ O ₂ /HF

VH: Minéralisation par voie humide. VS: Minéralisation par voie sèche. EXE: extraction à l'eau.

- 3. Extraction :** Pour la détermination du chlore, il a été procédé à une extraction sur poudre végétale à l'aide d'eau bipermutée par agitation sur agitateur rotatif vertical. Des essais effectués sur un grand nombre d'échantillons ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre chlore total et chlore soluble.
- 4. Contrôle qualité :** dans toute série analytique, on ajoute trois blancs d'attaque et trois échantillons de contrôle. Ces derniers sont positionnés en début, milieu et fin de série

analytique. Depuis la première campagne de 1993, les échantillons de contrôle (CRM = Certified Reference Materials) utilisés pour les analyses du réseau RENECOFOR sont constitués par deux échantillons du BCR : CRM 100 (feuilles de hêtre) et 101 (aiguilles d'épicéa). Les valeurs de teneurs foliaires sont certifiées quand les analyses réalisées dans au moins 3 laboratoires différents et avec au moins 3 techniques d'analyses différentes par laboratoire conduisent à des valeurs très proches. Une valeur moyenne est alors indiquée avec son écart type.

Tableau 9: Eléments foliaires certifiés (bonne cohérence interlaboratoire), non certifiés (simples valeurs indicatives), ou pour lesquels aucune valeur n'a été établie par le Bureau communautaire de référence dans le cas des échantillons de référence CRM 100 et CRM 101.

Table 9 : Foliar nutrients which are certified (satisfactory inter-laboratory consistency), un-certified (only indicative values), or with no value given by the Community Bureau of Reference (CBR) for reference samples CRM 100 and CRM 101 .

Eléments	Certifié		Non certifié		Aucune valeur proposée	
	Hêtre ⁽¹⁾	Epicéa ⁽²⁾	Hêtre	Epicéa	Hêtre	Epicéa
N	X	X				
P	X	X				
S	X	X				
Cl	X	X				
Ca	X	X				
Mg	X	X				
Al	X	X				
K	X			X		
Mn		X	X			
Zn		X	X			
Fe			X	X		
Cu			X	X		
Na					X	X

⁽¹⁾ CRM 100, ⁽²⁾ CRM 101. Source BCR (Bureau Communautaire de référence) Reference materials, 1999.

Des valeurs indicatives sont données (1) quand moins de 3 laboratoires (ou moins de 3 techniques par laboratoire), ou (2) quand l'échantillon est trop hétérogène (**Tableau 9**, p.28). L'ensemble de ces valeurs sont régulièrement tenues à jours pour l'ensemble du matériel végétal de référence par l'institut pour les matériels de références et des mesures (IRMM). Les références prises en compte dans ce rapport pour les feuilles de hêtre et les aiguilles d'épicéa sont extraites du catalogue "BRC Référence materials" de 1999. Dans le cadre du contrôle qualité le laboratoire de l'INRA participe à des réseaux d'essais interlaboratoires nationaux ou internationaux, notamment au réseau relatif à des échantillons forestiers " ICP Forests ".

Les résultats obtenus dans les différents réseaux sont satisfaisants, toutefois en 1998, avant la campagne d'analyse du réseau RENECOFOR, les résultats obtenus avec les échantillons du réseau ICP Forests n'ont pas eu la qualité habituelle. Après enquête, il est apparu que le groupe d'échantillons mis en cause avait été minéralisé sur un appareil où avait été détecté ultérieurement un dysfonctionnement aléatoire de la sonde de température. La sonde a été changée et il a été décidé de modifier le protocole de manière à ce que sur chaque appareil de minéralisation soit traité un échantillon de référence ou de contrôle, ainsi qu'un blanc d'attaque pour chaque série analytique, en vue de détecter immédiatement toute anomalie. Ceci se traduit par une réduction du nombre d'échantillons par série qui est passé de 100 à 60. Le dysfonctionnement de l'appareil est lié au déménagement du laboratoire survenu peu de temps avant la campagne d'analyses d'échantillons ICP Forests. Cet événement se situe après la campagne d'analyses

d'échantillons RENECOFOR 1997 et avant celle de 1998 pour laquelle la nouvelle procédure a été utilisée, ceci explique l'accroissement notable du nombre d'échantillons de référence cette année-là. On peut donc estimer que les analyses relatives aux échantillons du réseau RENECOFOR ont bénéficié d'un contrôle qualité optimal.

5. Déterminations élémentaires : en dehors de l'azote, du carbone et de certains anions, l'ensemble des déterminations sont effectuées par ICP radiale ou axiale sinon par spectrométrie d'absorption atomique four graphite ou vapeur froide (Hg) (Tableau 10, p.29). Les limites de travail de ces techniques ont été établies et sont notamment sous la dépendance des matrices des échantillons. Les limites de travail sont définies par rapport aux concentrations en solution, lorsque la solution est issue d'un échantillon en faible quantité (ex. 100 mg) la limite de travail est différente de celle d'un échantillon pour lequel on disposait de 1000 mg.

Exemple : si la limite de travail est de 1 ng/ml (ppb) pour un échantillon mis en solution dans 100 ml, un calcul simple montre que la limite de travail pour un échantillon de 100 mg est de $(1 \times 100) / 0.100 = 1000$ ng/g soit 1 µg/g (ppm), alors que pour un échantillon de 1 g on trouve $(1 \times 100) / 1.000 = 100$ ng/g soit 0.1 µg/g. En d'autres termes, plus la quantité d'échantillon fourni est faible plus la limite de travail par rapport à l'échantillon solide sera élevée.

Les échantillons du réseau RENECOFOR font l'objet d'une minéralisation voie humide (HNO₃-H₂O₂) suivi d'une reprise HF après minéralisation du filtre et d'éventuels insolubles par voie sèche pour ce qui concerne les éléments minéraux.

3.3.3. Dosages élémentaires

Pour effectuer les dosages élémentaires, on utilise des gammes étalons de composition garantie. Le LERMAVE utilise des étalons de marque "Merck ou Baker" pour préparer ses gammes. La préparation met en oeuvre, outre l'étalon, de l'eau distillée et de l'acide nitrique de qualité analytique "Baker", la concentration finale en acide est normalement 5 % (volume/volume). Toutes les gammes sont préparées par pesées, ce qui garantit une grande précision dans la définition des points

Tableau 10: Evolution des méthodes analytiques et des méthodes de transmission des données au serveur central entre 1993 et 1998 pour les échantillons foliaires du réseau RENECOFOR.

Table 10: Change in analytical methods and data transmission to the central computer between 1993 and 1998 for the foliar samples from the RENECOFOR network.

Eléments	1993		1994		1995		1996		1997		1998	
	A	T	A	T	A	T	A	T	A	T	A	T
N Kjeldahl	Distillateur Kje	1	Distillateur Kje	1	Distillateur Kje	1	Distillateur Kje	1	Distillateur Kje	1	Distillateur Kje	1
Cl	HPLC beeckm	1	HPLC beeckm	1	HPLC dionex	1	HPLC dionex	1	HPLC dionex	1	HPLC dionex	1
P	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
K	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Ca	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Mg	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Na	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
S	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Al	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Fe	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Mn	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Cu	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2
Zn	ICP JY38+	2	ICP JY38+	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2	ICP Liberty200	2

A: Méthode analytique utilisée. T: Mode de transmission des données entre l'appareil de mesure et le serveur central (1 = manuel, 2 = fichier).

de gamme. Chaque type de solution est placée dans une fiole en polyéthylène haute densité marquée aux concentrations correspondantes de façon définitive. Les gammes étalons sont multi-

élémentaires et préparées dans le même milieu que les échantillons (iso-concentration en acide par exemple).

Les gammes étalons font l'objet de deux types de contrôle : comparaison avec des solutions issues d'échantillons de composition certifiée, comparaison des performances instrumentales dans le temps (émission ou absorption), comparaison avec le lot d'étalons d'une gamme précédente. Ces contrôles sont stockés dans une base de données ce qui permet de dépister d'éventuelles dérives instrumentales.

1. **Dosages par ICP** : deux types de spectromètres ICP sont utilisés : à torche radiale avec nébuliseur du type V-groove dont le domaine de travail va de quelques dizaines de ng/ml à quelques centaines de µg/ml, à torche axiale avec nébuliseur du type V-groove dont le domaine de travail est inférieur d'un ordre de grandeur (10^{-1}) à celui de la torche précédente ou avec nébuliseur ultrasonique ce qui permet de gagner environ une autre décimale.

Pour chaque type de spectromètre, de torche et de nébuliseur des études ont été conduites à l'aide de solutions étalons et de solutions issues d'échantillons de référence. Ceci a permis d'établir les limites de travail correspondant à chaque technique, ainsi que les éventuelles interférences spectrales inter-élémentaires conditionnant le choix des raies d'émission permettant les dosages dans les conditions les mieux appropriées. Lors du dosage d'échantillons de composition inconnue, on procède à un passage successif sur les deux types de spectromètres en utilisant les différentes torches et types de nébuliseur en partant de la technique la moins sensible jusqu'à la plus sensible. Si la technique la plus performante ne permet pas le dosage dans de bonnes conditions analytiques, le dosage est effectué en spectrométrie d'absorption atomique par électrothermie.

Les programmes de dosage utilisés sur ces appareils mettent en oeuvre, outre une vérification de la valeur des blancs et des échantillons de contrôle, une vérification des gammes étalons au cours du temps (environ tous les dix échantillons). Le calage des raies de travail en référence au spectre de raie du mercure est effectué systématiquement en début de programme de dosage et en cours d'analyse pour les longues séries.

2. **Dosages par spectrométrie d'absorption atomique par électrothermie** : cette technique requiert une compétence toute particulière et des procédures de contrôle très strictes. Elle nécessite une longue pratique du dosage sur de nombreux types d'échantillons, ainsi qu'une bonne compréhension des problèmes pouvant se présenter lors de l'utilisation des modificateurs de matrice. Outre les vérifications habituelles en matière de dosage, l'analyste vérifie la forme des pics d'absorption afin de s'assurer de la possibilité de travailler en mode " hauteur de pics ". En présence de pics mal constitués on peut être amené à modifier le programme thermique de traitement de l'échantillon et/ou à changer le modificateur. On vérifie également la similitude des pics relatifs aux points de gamme et aux échantillons ainsi que leur temps de sortie. En cas de différence, le dosage ne peut être effectué. Il faut modifier le programme thermique et/ou le modificateur jusqu'à concordance parfaite des pics. Si cela ne peut être réalisé, on utilise la méthode des « ajouts dosés » ce qui permet généralement de résoudre le problème.

La vérification des pics est assurée par le personnel du laboratoire de spectrométrie, la modification des programmes est effectuée uniquement par des personnes qualifiées et expérimentées.

La limite de dosage d'un élément dépend de la nature de l'élément et de la matrice accompagnatrice. Elle varie de la fraction de ng/ml à quelques ng/ml. L'utilisation des multi-injections permet parfois de préciser les valeurs des faibles concentrations. L'utilisation d'échantillons de contrôle et de référence est absolument nécessaire pour cette technique mais ne peut constituer une garantie absolue de justesse compte tenu des interférences chimiques liées aux effets de matrice, en cas de doute une vérification mettant en jeu les ajouts dosés s'impose.

Bien souvent, pour des échantillons de faible concentration, on procède à un dosage ICP axiale/nébuliseur ultrasonique et à un dosage par spectrométrie d'absorption atomique par électrothermie lorsque l'on se trouve à la limite de dosage de l'ICP. Cela constitue une vérification/validation supplémentaire des résultats.

Pour chaque série analytique dosée par spectrométrie d'absorption atomique par électrothermie, on effectue une édition des conditions opératoires.

3.3.4. *Calculs*

Les calculs de teneurs sont effectués à l'aide des logiciels des différents appareillages, puis après validation avec les cartes de contrôle sont traités et édités à l'aide du logiciel "Starlims". Les valeurs extrêmes, donc à priori suspectes, sont détectées à l'aide de l'introduction d'une gamme de valeurs probables dans le programme de vérification des analyses. Toutefois l'expérience passée démontre qu'une valeur "suspecte" peut être exacte.

3.3.5. *Contestations*

En cas de sortie de valeurs improbables ou de contestation des résultats, on procède aux opérations suivantes dans l'ordre : vérifications des calculs et des unités, vérifications des bordereaux d'édition des résultats instrumentaux, puis si aucune erreur n'a pu être dépistée traitement de l'échantillon par des voies alternatives (si cela est possible) et dosage "en aveugle" par un technicien différent de celui ayant pratiqué la précédente analyse.

3.4. **Résultats du suivi de l'assurance qualité**

De 1993 à 1998, le suivi de l'assurance qualité s'est effectué en introduisant (1) les échantillons de référence du Bureau Communautaire de Référence (BCR): le CRM 100 = feuilles de hêtre, et le CRM 101 = aiguilles d'épicéa au sein des séries d'échantillons du réseau RENECOFOR, et (2) des blancs d'attaque. Les échantillons du réseau RENECOFOR ont fait l'objet de séries analytiques distinctes de celles d'autres clients. L'utilisation d'échantillons de contrôle de la qualité "échantillon de référence de composition certifiée" (CRM) n'est pas une pratique courante car elle est très onéreuse, mais elle apporte une garantie supplémentaire à l'assurance qualité.

Un récapitulatif par année des valeurs mesurées par le laboratoire (moyennes, écart type) pour les deux types d'échantillons de référence CRM 100 et 101 est donné pour les macronutriments (**Figure 5**, p.32) et pour les micronutriments (**Figure 6**, p.34). Les valeurs indiquées correspondent aux résultats, déduction faite des valeurs des "blancs d'attaque". La moyenne par élément est également reportée pour la période 1993-1998, et à titre de comparaison, les valeurs certifiées (BCR) sont indiquées sur les mêmes figures. La variabilité interanalyse a été décrite pour chaque année à l'aide du coefficient de variation CV (rapport de l'écart type à la moyenne, en pourcentage). La moyenne de ces CV sur la période 1993-1998 donne une idée de la variabilité interanalyse moyenne pour chaque élément.

3.4.1. *Macronutriments*

La stabilité des mesures des deux échantillons de référence CRM 100 et CRM 101 est très bonne entre 1993 et 1998 pour l'azote et le phosphore (**Figure 5**, p.32). Pour le soufre, on observe des variations erratiques dans le cas du CRM 100. Le potassium, le calcium et le magnésium présentent un "creux de vague" en 1997 pour les deux types d'échantillons.

La variabilité interanalyse est globalement faible pour les macronutriments. Elle est en moyenne de 2,3 % quel que soit l'échantillon de référence. Des disparités non négligeables selon les éléments et

les années doivent cependant être soulignées. Le CV moyen varie entre 1,3 % pour l'azote (CRM 100) et 4,1 % pour le soufre (CRM 100). Cette valeur pour le soufre est due à un pic de variabilité

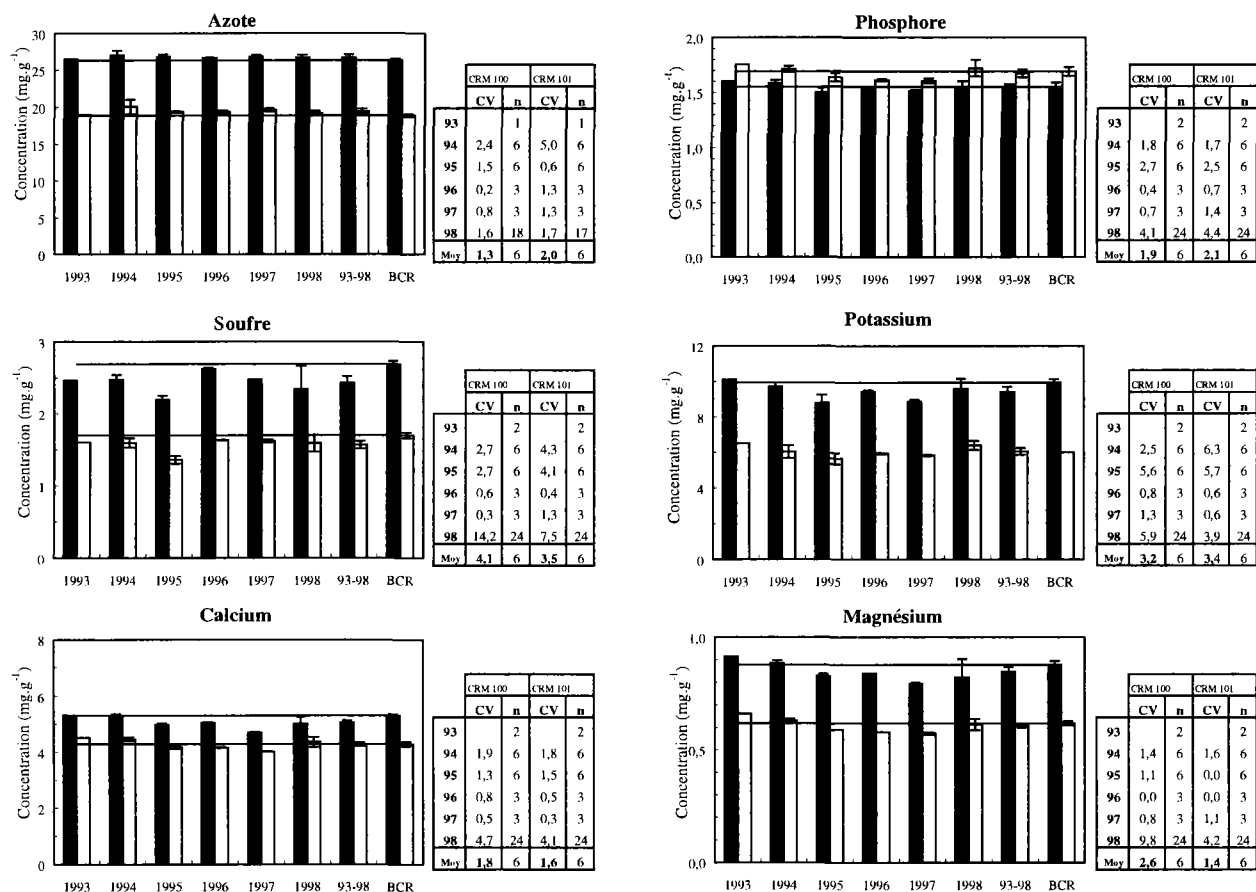


Figure 5: Suivi de l'assurance qualité de 1993 à 1998 pour les macronutriments. En noir: échantillons de référence CRM 100 (hêtre), en blanc: échantillons de référence CRM 101(épicéa). Moyennes, écart types, coefficients de variation (CV) et effectifs (n) par année. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs certifiées des deux références (noter l'absence de valeur certifiée pour le potassium chez l'épicéa).

Figure 5: Quality assurance control between 1993 and 1998 for macronutrients. In black: reference sample CRM 100 (beech leaves), in white: reference sample CRM 101 (spruce needles). Averages, standard deviation, coefficient of variation (CV), and number (n) for each year. Horizontal lines are certified values for the two references (there are no certified values for K in spruce needles).

en 1998, aussi bien pour le CRM 100 (CV = 14,2 %, n = 24) que pour le CRM 101 (CV = 7,5 %, n = 24). Une telle variabilité ne peut être expliquée, ni par un changement de méthode de minéralisation (cf. **Tableau 8**, p.27), ni par un changement de méthode analytique (cf. **Tableau 10**, p.29). D'autre part, le nombre élevé d'échantillons analysés cette année là (n = 24) écarte *a priori* le problème de manque de représentativité des analyses. Une autre source de variabilité reste donc à déterminer pour comprendre la variabilité interanalyse élevée du soufre en 1998. Par rapport aux autres années, l'année 1998 présente la variabilité interanalyse la plus forte non seulement pour le soufre, mais également pour le phosphore (CV = 4,1 % et 4,4 % pour le CRM 100 et 101), le

calcium (CV = 4,7 % et 4,1 % pour le CRM 100 et 101), et le magnésium (CV = 9,8 % et 4,2 % pour le CRM 100 et 101).

La comparaison des analyses des échantillons de références avec les valeurs certifiées montre globalement deux cas de figure. Le premier correspond à un centrage étroit des valeurs mesurées chaque année de part et d'autre de la valeur certifiée (Azote et phosphore: pour les deux échantillons de référence, et CRM 101: pour tous les autres éléments). Le deuxième cas de figure correspond à une sous-évaluation globale des valeurs mesurées chaque année par rapport aux valeurs certifiées (Soufre, potassium, calcium, magnésium pour le CRM 100).

Ces résultats ne présentent qu'une faible incidence sur nos analyses qui restent assez comparables entre elles. Par contre, l'incidence sur une éventuelle intercomparaison européenne est non négligeable.

3.4.2. Micronutriments

La stabilité des mesures des deux échantillons des référence CRM 100 et CRM 101 au cours du temps, entre 1993 et 1998 est bonne pour le sodium (CRM 100) (**Figure 6**, p.34). La mesure du chlore présente une valeur maximum en 1997 pour le CRM 100. Les valeurs des autres éléments suivent toutes la même évolution entre 1993 et 1998, avec notamment un minimum en 1997, aussi bien dans le cas du CRM 100 que du CRM 101.

La variabilité interanalyse est globalement plus forte que pour les macronutriments, mais reste assez faible. Elle est en moyenne de 6,6 % (contre 2,3 % pour les macronutriments), exception faite du sodium, et quel que soit l'échantillon de référence. La stabilité des teneurs en sodium dans les feuilles de hêtre mentionnée ci-dessus est accompagnée d'une variabilité interanalyse élevée (en moyenne CV = 19,6 % pour le CRM 100, et CV = 71,6 % pour le CRM 101). Le coefficient de variation interanalyse moyen pour la période 1993-1998 s'échelonne de 4,1 % pour le zinc (CRM 100), à 12,9 % pour le cuivre (CRM 101). Les différences entre années sont globalement importantes. A titre d'exemple, le coefficient de variation est compris entre 1,8 % et 11,4 % pour l'aluminium (CRM 100). Dans le cas de l'aluminium (CRM 100), du manganèse, et du cuivre (CRM 100 et 101), le maximum de variabilité interanalyse est observé en 1998. Pour les autres éléments, ce maximum est observé en 1994 (Chlore) ou 1995 (Fer et zinc).

Etant donné la variabilité interanalyse importante des teneurs foliaires en sodium, aucune valeur certifiée n'a été proposée par le BCR pour cet élément. La source de ce problème est vraisemblablement liée à la solubilité très importante de cet élément. La moindre pollution au niveau de la verrerie se traduit en effet au niveau de l'analyse. L'absence de valeur certifiée pour Mn, Zn, Fe, et Cu (hêtre), et pour Fe et Cu pour l'épicéa doit inciter à la prudence quand à la valeur des dosages pour ces éléments.

On remarque cependant que la comparaison des analyses sur les échantillons de références avec les valeurs certifiées montre globalement deux cas de figure. Le premier correspond à un centrage étroit des valeurs mesurées chaque année de part et d'autre de la valeur certifiée (Chlore). Le deuxième cas de figure correspond à une faible sous-évaluation globale des valeurs mesurées chaque année par rapport aux valeurs certifiées (Aluminium, fer, manganèse, cuivre, et zinc) aussi bien pour le CRM 100 que pour le CRM 101.

La variabilité interanalyse moyenne a été appréciée par le coefficient de variation (CV) pour chaque élément dans le cas des échantillons de référence CRM 100 et CRM 101 (**Tableau 11**, p.35). Trois groupes d'éléments ressortent de ce tableau. Le premier est constitué par N, P, S, K, Ca et Mg qui

présentent en moyenne une variabilité interanalyse faible, inférieure à 4 %. Le deuxième est constitué par Al, Cl, Fe, Mn, Cu, Zn qui présentent une variabilité interanalyse plus importante, en moyenne, entre 4 et 13 %. Le troisième groupe est représenté par Na, dont la variabilité interanalyse est très forte, elle atteint en moyenne 19,6 % pour le CRM 100, et 71,6 % pour le CRM 101.

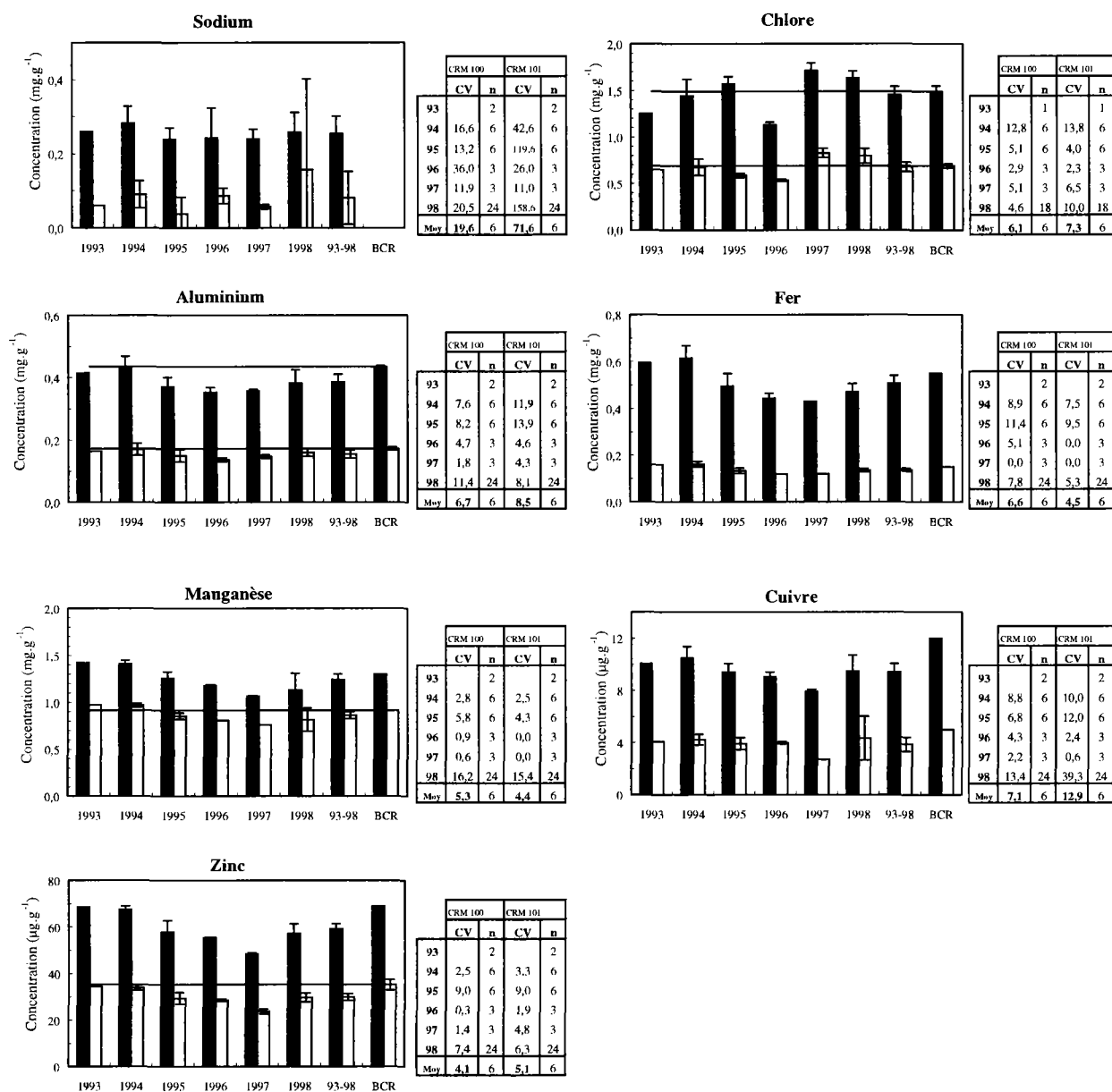


Figure 6: Suivi de l'assurance qualité de 1993 à 1998 pour les micronutriments. En noir: échantillons de référence CRM 100 (hêtre), en blanc: échantillons de référence CRM 101(épicéa). Moyennes, écarts-types, coefficients de variation (CV) et effectifs (n) par année. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs certifiées des deux références (noter l'absence de valeurs certifiées pour Na, Fe, Mn, Cu, et Zn, cf. Tableau 9).

Figure 6: Quality assurance control between 1993 and 1998 for micronutrients. In black: reference sample CRM 100 (beech leaves), in white: reference sample CRM 101 (spruce needles). Averages, standard deviation, coefficient of variation (CV), and number (n) for each year. Horizontal lines are certified values for the two references (there are no certified values for Na, Fe, Mn, Cu, and Zn, cf. Table 9).

Tableau 11: Variabilité entre analyses des teneurs foliaires en nutriment des échantillons de référence du BCR (CRM 100: feuilles de hêtre, et CRM 101: aiguilles d'épicéa) : coefficients de variation moyens, minimum, maximum, et nombre (Nb) d'analyses pris en compte par année. ⁽¹⁾ éléments non certifiés par le BCR, ⁽²⁾ aucune valeur donnée par le BCR.

Table 11: *Inter-analysis variation coefficients of foliar nutrient concentrations in CBR reference samples (CRM 100: beech leaves, and CRM 101: spruce needles): average, minimum and maximum variation coefficients and number (Nb) of analyse which were made each year. ⁽¹⁾ elements not certified by the CBR, ⁽²⁾ no value given by the CBR.*

Eléments	CRM 100				CRM 101			
	CV Moyen	CV Min	CV Max	Nb	CV Moyen	CV Min	CV Max	Nb
Macronutriments								
Azote	1,3	0,2	2,4	3-18	2,0	0,6	5,0	3-17
Calcium	1,8	0,5	4,7	3-24	1,6	0,3	4,1	3-24
Phosphore	1,9	0,4	4,1	3-24	2,1	0,7	4,4	3-24
Magnésium	2,6	0,0	9,8	3-24	1,4	0,0	4,2	3-24
Potassium	3,2	0,8	5,9	3-24	3,4 ⁽¹⁾	0,6	6,3	3-24
Soufre	4,1	0,3	14,2	3-24	3,5	0,4	7,5	3-24
Micronutriments								
Zinc	4,1 ⁽¹⁾	0,3	9,0	3-24	5,1	1,9	9,0	3-24
Manganèse	5,3 ⁽¹⁾	0,6	16,2	3-24	4,4	0,0	15,4	3-24
Chlore	6,1	2,9	12,8	3-18	7,3	2,3	13,8	3-18
Fer	6,6 ⁽¹⁾	0,0	11,4	3-24	4,5 ⁽¹⁾	0,0	9,5	3-24
Aluminium	6,7	1,8	11,4	3-24	8,5	4,3	13,9	3-24
Cuivre	7,1 ⁽¹⁾	2,2	13,4	3-24	12,9 ⁽¹⁾	0,6	39,3	3-24
Sodium	19,6 ⁽²⁾	11,9	36,0	3-24	71,6	11,0	158,6	3-24

A titre d'exemple, le nombre d'analyses nécessaire pour obtenir une précision donnée (P) de la moyenne des teneurs pour les échantillons de référence au risque de première espèce (α) est calculé pour l'année 1998 (**Tableau 12**, p.36). La variabilité interanalyse est globalement la plus forte cette année là pour l'ensemble des éléments. Ce choix permet de calculer le nombre maximal d'analyses nécessaire, et pas le nombre moyen d'analyses. Le détail de la méthode de calcul est donné en **annexe 13**.

Dans le cas des macronutriments, le nombre d'analyses nécessaire par type d'échantillon pour obtenir une erreur relative de 5 % au seuil de confiance de 95 % est compris entre 3 et 6 pour le phosphore, le calcium, et le potassium (CRM 100 et 101), et pour le magnésium (CRM 101). Dans les mêmes conditions il suffit d'une seule analyse pour l'azote, ou de 11 (CRM 100) à 14 (CRM 101) analyses pour atteindre une précision de 1 % à un seuil de confiance de 95 %. Dans le cas du soufre, 35 (CRM 100), et 10 (CRM 101) analyses sont nécessaires dans les mêmes conditions.

Dans le cas des micronutriments, le chlore (CRM 100), le zinc et le fer (CRM 101) nécessitent de 4 à 7 analyses par type d'échantillon pour atteindre 5 % de précision au seuil de confiance de 95 %. Pour le zinc, le fer (CRM 100), le chlore et l'aluminium (CRM 101) entre 10 et 18 analyses sont nécessaires dans les mêmes conditions. Dans les autres situations il faut entre 23 et 73 analyses. Deux situations sont particulièrement critiques: le cuivre dans les aiguilles d'épicéa (CRM 101) avec 265 analyses nécessaires, et le sodium dans les feuilles de hêtre (CRM 100) avec 4306 analyses nécessaires.

La précision des mesures au seuil α de 5 % basée sur la mesure de 17 à 24 échantillons effectivement utilisés par le laboratoire LERMAVE en 1998 est supérieure à 1 % pour l'azote, entre 1 et 5 % pour P, Ca, K, Mg, Cl, Zn, Fe (CRM 100 et 101), Al et S (CRM 101), entre 5 et 10 % pour

S, Al, Cu, Na (CRM 100), Mn (CRM 100 et 101), entre 10 et 20 % pour Cu (CRM 101), et de 70 % pour Na (CRM 101, données non montrées).

Tableau 12: Nombre d'analyses nécessaires pour les échantillons de référence CRM 100 et CRM 101 et pour chaque élément foliaire afin d'obtenir une précision (P = 1, 5, 10 ou 20 % sur la moyenne des teneurs au risque de première espèce (α) de 5, 10, ou 20 %. Le calcul des effectifs a été réalisé sur les analyses de 1998.

Table 12: Number of analyse required for each nutrient in the reference samples (CRM 100 and CRM 101) to achieve a given accuracy (P = 1, 5, 10 or 20 %) on concentration averages with a risk α of 5, 10 or 20 %. Calculations were done using 1998 data.

Eléments	Risque	Précision P (%)							
	α (%)	1	5	10	20	1	5	10	20
Macronutriments		CRM 100				CRM 101			
NTK	5	11	1	1	1	14	1	1	1
	10	8	1	1	1	9	1	1	1
	20	5	1	1	1	6	1	1	1
P	5	72	3	1	1	84	4	1	1
	10	50	2	1	1	58	3	1	1
	20	30	2	1	1	35	2	1	1
Ca	5	96	4	1	1	72	3	1	1
	10	66	3	1	1	49	2	1	1
	20	39	2	1	1	29	2	1	1
K	5	149	6	2	1	65	3	1	1
	10	103	5	2	1	45	2	1	1
	20	61	3	1	1	27	2	1	1
Mg	5	410	17	5	2	74	3	1	1
	10	281	12	3	1	51	3	1	1
	20	167	7	2	1	31	2	1	1
S	5	863	35	9	3	243	10	3	1
	10	593	24	6	2	167	7	2	1
	20	352	15	4	1	99	4	1	1
Micronutriments									
Cl total	5	94	4	1	1	445	18	5	2
	10	64	3	1	1	303	13	4	1
	20	38	2	1	1	178	8	2	1
Zn	5	237	10	3	1	171	7	2	1
	10	163	7	2	1	118	5	2	1
	20	97	4	1	1	70	3	1	1
Fe	5	259	11	3	1	121	5	2	1
	10	178	8	2	1	83	4	1	1
	20	106	5	2	1	50	2	1	1
Al	5	552	23	6	2	280	12	3	1
	10	379	16	4	1	192	8	2	1
	20	225	9	3	1	114	5	2	1
Cu	5	765	31	8	2	6618	265	67	17
	10	525	21	6	2	4542	182	46	12
	20	312	13	4	1	2694	108	27	7
Mn	5	1126	46	12	3	1010	41	11	3
	10	773	31	8	2	694	28	7	2
	20	459	19	5	2	412	17	5	2
Micronutriments									
Na	5	1801	73	19	5	107632	4306	1077	270
	10	1236	50	13	4	73866	2955	739	185
	20	733	30	8	2	43810	1753	439	110

3.5. Conclusions

L'introduction de deux échantillons de référence: des feuilles de hêtre (CRM 100) et des aiguilles d'épicéa (CRM 101) dans les séries d'analyses des échantillons RENECOFOR ont permis d'évaluer (1) la présence éventuelle d'une dérive au cours du temps des analyses qui pouvait induire un biais dans le suivi des teneurs foliaires, (2) l'ordre de grandeur de la variabilité interanalyse pour chaque année du suivi et (3) la comparabilité des analyses avec les éléments certifiés par le BCR (Bureau Communautaire de Référence, Reference materials, 1999) dans le but de comparer le suivi en France avec celui d'autres pays Européen. Une évaluation du nombre d'analyses nécessaire pour obtenir une précision donnée a également été réalisée avec les données de 1998.

Les cinq premières années d'analyse (1993-1997) ont montré globalement une qualité satisfaisante des analyses avec l'absence de dérives très marquées au cours du temps (à l'exception du fer: -33 %), une variabilité interanalyse peu importante (au maximum 6,6 %) et des valeurs généralement proches des valeurs certifiées par le BCR. On note cependant des différences non négligeables entre les macronutriments et les micronutriments. D'autre part, le sodium présente des difficultés d'analyse qui induisent une variabilité interanalyse très importante pour cet élément (jusqu'à 72 % pour le CRM 101) et qui rendent cet élément difficilement utilisable dans l'optique d'un suivi au cours du temps.

L'absence de dérives au cours des 5 premières années d'analyse est globalement vérifiée pour les macronutriments (N, P, S, K, Ca et Mg) pour les deux échantillons de référence. Une diminution modérée des teneurs foliaires (au maximum de 10 %) par rapport aux valeurs certifiées a cependant été notée entre 1995 et 1997 pour le potassium, le magnésium et le calcium, alors que la stabilité des teneurs a été remarquable pour l'azote et le phosphore. Par contre, les micronutriments (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu et Zn) présentent, à l'exception du sodium et du chlore, une dérive manifeste entre 1995 et 1997 ou 1998 avec des valeurs plus faibles pendant cette période en particulier dans le cas du hêtre. Par rapport aux analyses réalisées en début de période on note dans le cas de l'échantillon certifié de hêtre une diminution des teneurs en 1997 comprise entre 16 % pour l'aluminium et 33 % pour le fer. L'interprétation de cette dérive est toutefois difficile car il manque souvent les valeurs certifiées permettant de savoir si la dérive traduit une surévaluation des teneurs les premières années du suivi ou au contraire une sous-évaluation entre 1995 et 1998. Les quelques valeurs certifiées existantes tendent à montrer qu'il s'agirait plutôt d'une sous-évaluation entre 1995 et 1998. Cette dérive représente une difficulté surtout dans la perspective de comparaisons avec d'autres pays européens mais elle ne compromet pas la qualité du suivi au sein du réseau RENECOFOR étant donné que l'ensemble des analyses est affecté par ce problème.

La variabilité interanalyse évaluée par le coefficient de variation est globalement faible pour les macronutriments (CV moyen entre 1995 et 1998 = 2,3 %). Elle est d'autre part homogène sur l'ensemble de la période sauf pour le soufre et le magnésium dans les feuilles de hêtre en 1998 (CV respectivement 14 et 10 %). La précision des analyses est de l'ordre de 5 % à un risque de première espèce α compris entre 5 % et 20 % pour l'azote, 10 % pour le phosphore, le calcium, le potassium (CRM 101), le magnésium (CRM 101) et le soufre (CRM 101) et 20 % pour le magnésium (CRM 100) et le soufre (CRM 100). La variabilité interanalyse des micronutriments est plus importante mais reste en moyenne assez faible (CV = 6,6 %) sauf dans le cas du sodium (CV = 19,6 % et 71,6 % pour les CRM 100 et 101). La précision des analyses (pour α compris entre 5 % et 20 %) est de 10 % pour le chlore (CRM 100), de 20 % pour Zn, Fe, Al et Cu (CRM 100) et au delà de 20 % pour le cuivre (CRM 101) et Mn. Ces résultats montrent finalement que l'imprécision due aux techniques d'analyses est en moyenne faible mais qu'elle peut être assez différente selon les années en particulier pour les micronutriments.

La comparabilité des analyses avec les valeurs certifiées par le BCR a pu être évaluée seulement pour les macronutriments (sauf le potassium: CRM 101), le chlore, l'aluminium (CRM 100 et CRM 101), le manganèse et le zinc (CRM 101). Sur l'ensemble de la période considérée, les teneurs foliaires en azote, en phosphore, en calcium (CRM 101) et en magnésium (CRM 101) sont très proches des valeurs certifiées. Par contre les teneurs foliaires en soufre, en potassium, en calcium (CRM 100), en magnésium (CRM 100), en aluminium, en manganèse et en zinc sont en moyenne inférieures aux valeurs certifiées. Comme mentionné ci-dessus, les teneurs les plus faibles ont été obtenues entre 1995 et 1997 ou 1998. Seules les teneurs en chlore sont selon les années tantôt supérieures, tantôt inférieures aux valeurs certifiées.

DEUXIEME PARTIE: ETUDE DES TENEURS, DES MINERALOMASSES^{100f (1000a)} FOLIAIRES ET DE LA MASSE FOLIAIRE^{100f (1000a)}

1. Introduction

La première étape d'un suivi à long terme des teneurs foliaires en nutriments est de caractériser l'état initial de ces teneurs sur les placettes d'étude et d'évaluer certaines sources de variabilité qui peuvent interférer avec une éventuelle évolution à long terme. Les premières analyses foliaires réalisées entre 1993 et 1997 sur le réseau RENECOFOR permettent de répondre à ces objectifs.

Après avoir précisé les ordres de grandeur des teneurs foliaires en macro et micronutriments, la comparaison de ces valeurs à deux systèmes de seuil indicatifs (seuils^{Eu} et seuils indicatifs^{Fr} cf. **Tableau 1**, p.4) est utilisée pour mettre en évidence d'éventuels problèmes nutritionnels sur les placettes d'étude. Dans l'optique d'une évolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments, trois sources de variabilité (intraplacette, interplacette et interanalyse) ont été évaluées et comparées à la variabilité interannuelle.

2. Analyse des teneurs foliaires en nutriments, de la masse foliaire^{100f (1000a)} et de la minéralomasse^{100f (1000a)}

Rappel: dans cette deuxième partie, l'attention du lecteur est attirée sur le fait que la masse foliaire et la minéralomasse foliaire sont déterminées pour 100 feuilles (noté: ^{100f}) ou pour 1000 aiguilles (noté: ^{1000a}). Il n'est donc pas question de la biomasse foliaire d'un arbre, qui désigne la masse foliaire totale d'un arbre (ou d'un peuplement), ni de la minéralomasse foliaire, qui se rapporte également à la quantité totale d'éléments nutritifs foliaires au niveau de l'arbre entier (ou du peuplement). En l'absence de données sur le LAI (leaf area index) dans le cadre du réseau RENECOFOR, aucun commentaire sur la productivité des placettes ne peut donc être avancé.

Dans ce chapitre, les valeurs de masse foliaire^{100f (1000a)} et des teneurs associées à chaque espèce correspondent à la moyenne de $n \times 5$ observations, n étant le nombre de placettes de l'espèce en question et 5 le nombre d'années d'observation (de 1993 à 1997). Ces valeurs sont présentées pour la masse foliaire^{100f (1000a)} et pour chacun des 13 nutriments analysés en annexe (**Tableau A 6**, p.159). Le détail par année de ces valeurs est également présenté en annexe en regroupant les macronutriments (**Tableau A 7**, p.161) et les micronutriments (**Tableau A 8**, p.164).

2.1. Masse foliaire^{100f (1000a)}

La masse de 100 feuilles varie du simple au double entre le hêtre (12,6 g/100 feuilles) et les chênes (21,5 g/100 feuilles pour le chêne pédonculé et 28,7 g/100 feuilles pour le chêne sessile) (**Figure 7**, p.40). Les deux peuplements mélangés de chênes sessile et pédonculé ont une masse foliaire^{100f} (27,6 g/100 feuilles) plus proche de celle des peuplements de chêne sessile.

Dans le cas des résineux, le mélèze a la plus faible masse foliaire^{1000a} (1,0 g/1000 aiguilles) et la plus grande variabilité (coefficient de variation = 85,4 %). Le sapin pectiné, le douglas et l'épicéa forment un groupe homogène avec des masses foliaires comprises entre 4,0 à 5,0 g/1000 aiguilles.

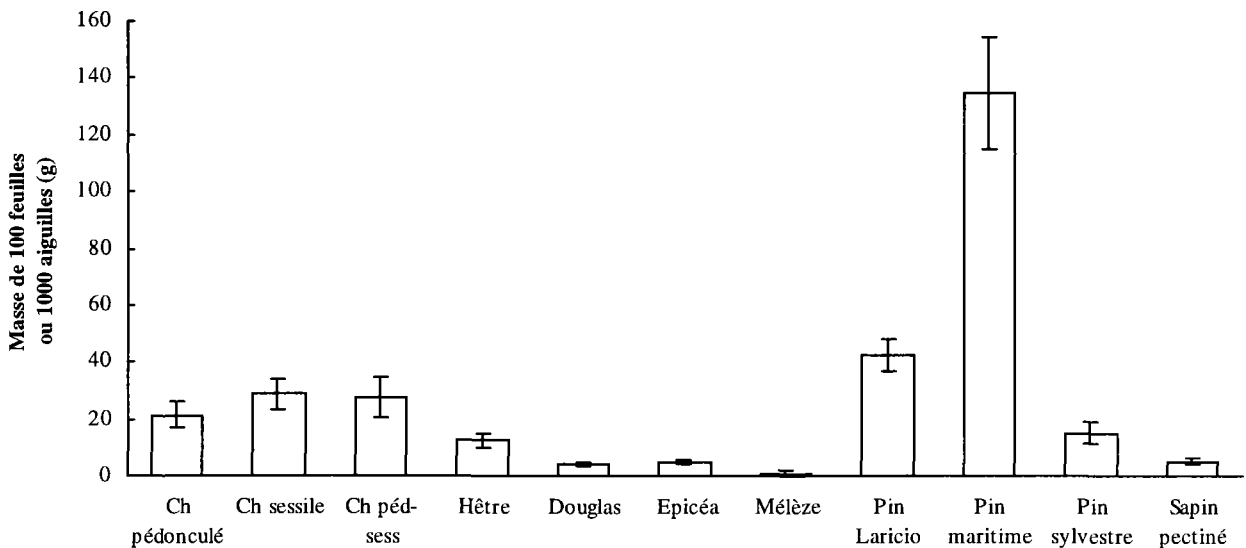


Figure 7: Valeurs moyennes entre 1993 et 1997, et écart-types du poids sec de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (masse foliaire^{100f(1000a)}) pour chaque essence du réseau RENECOFOR.

Figure 7: Average values and standard deviations in the dry weight of 100 leaves or 1000 needles for each species in the RENECOFOR network.

Les masses foliaires des pins sont très variables selon les espèces. Le pin sylvestre a la plus faible masse foliaire^{1000a} (15,0 g/1000 aiguilles) et le pin maritime la plus forte (135,0 g/1000 aiguilles).

La variabilité interannuelle des masses foliaires est, excepté dans le cas du mélèze, relativement réduite. Elle reste inférieure à 25 %.

2.2. Teneurs en macroéléments

Les teneurs foliaires en azote et en soufre sont très variables selon les espèces (**Figure 8**, p.41). Celles des feuillus sont près de deux fois supérieures à celles des résineux pour l'azote, avec 26,0 mg.g⁻¹ en moyenne pour les feuillus et 14,0 mg.g⁻¹ pour les résineux sans le douglas ni le mélèze qui sont caractérisés par des valeurs intermédiaires (respectivement 21,0 et 18,0 mg.g⁻¹ pour l'azote et 1,4 et 1,2 mg.g⁻¹ pour le soufre). L'espèce la plus frugale en azote dans le réseau est le pin maritime avec des teneurs foliaires variant de 6,0 à 14,0 mg.g⁻¹. Pour le soufre, les feuillus ont une teneur foliaire moyenne de 1,5 mg.g⁻¹ et les résineux (sans le mélèze et le douglas) de 0,9 mg.g⁻¹.

Si l'on met de côté le mélèze et le pin maritime qui présentent des valeurs extrêmes, les teneurs en phosphore varient assez peu selon les espèces (1,2 mg.g⁻¹ à 1,5 mg.g⁻¹). Le peuplement de mélèze a une teneur moyenne de 2,5 mg.g⁻¹, soit le double des valeurs des autres essences. Les peuplements de pin maritime du réseau ont les plus faibles teneurs (0,8 mg.g⁻¹ en moyenne).

Les teneurs en potassium sont également supérieures chez les feuillus et surtout chez les chênes qui ont les valeurs les plus fortes (8,7 à 9,8 mg.g⁻¹). Les peuplements de douglas ont des teneurs proches de celles des peuplements de hêtre du réseau (respectivement 7,5 et 7,8 mg.g⁻¹). Les autres résineux ont des valeurs qui oscillent autour de 6,0 mg.g⁻¹ et qui descendent jusqu'à 4,7 mg.g⁻¹ pour le pin maritime.

Les feuillus et le sapin pectiné ont des teneurs foliaires en calcium supérieures à celles des résineux (respectivement de 6,4 à 9,0 mg.g⁻¹ et de 2,3 à 4,6 mg.g⁻¹). Parmi les résineux, les pins ont les plus

faibles teneurs (moins de $3,0 \text{ mg.g}^{-1}$). De grandes variations des teneurs entre placettes caractérisent les peuplements de hêtre, les peuplements de sapin pectiné et d'épicéa. Ceci montre que les variations des teneurs foliaires en calcium entre les peuplements du réseau sont probablement plus liées à un effet site, et plus précisément sols (calcaires ou non), qu'à un effet espèce (voir la troisième partie). Cependant ces deux facteurs sont intimement liés puisque la localisation de la plupart des peuplements dépend de l'autécologie des essences.

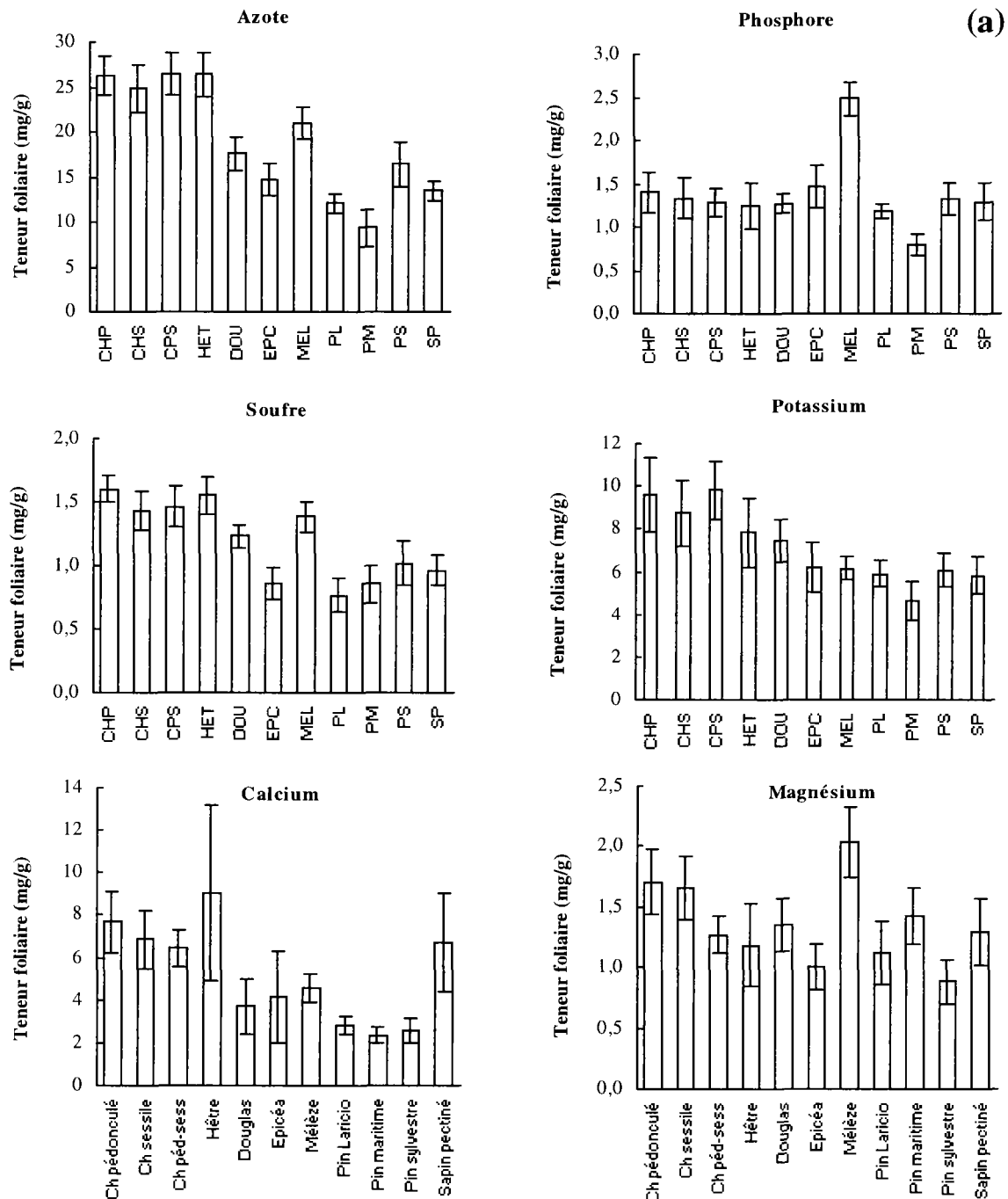


Figure 8: Valeurs moyennes (1993-1997) et écart-types des teneurs foliaires des macronutriments (a) et des micronutriments (b) analysés pour chaque essence du réseau RENECOFOR.

Figure 8: Average values (1993-1997) and standard deviations in the macro-nutrient (a) and micro-nutrient (b) foliar concentrations for each species in the RENECOFOR network.

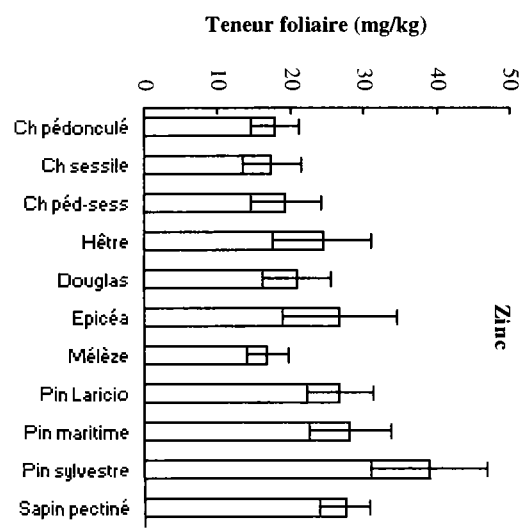
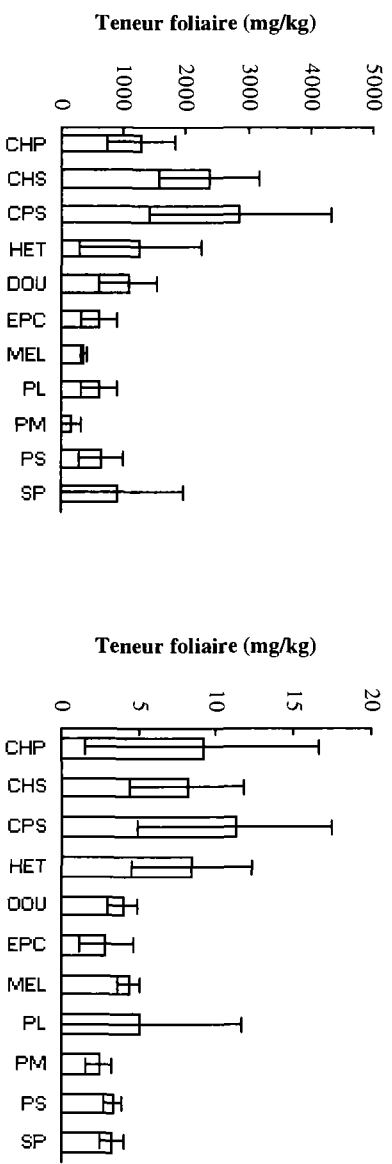
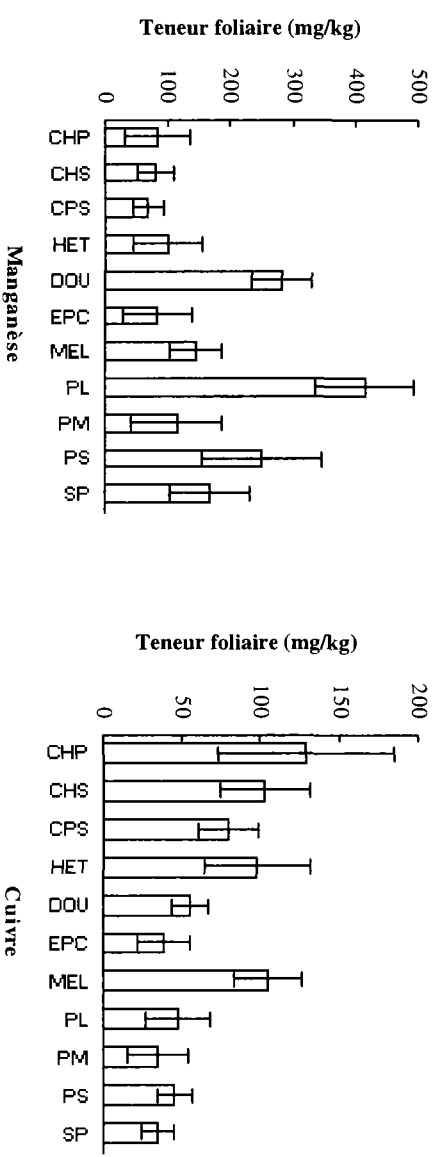
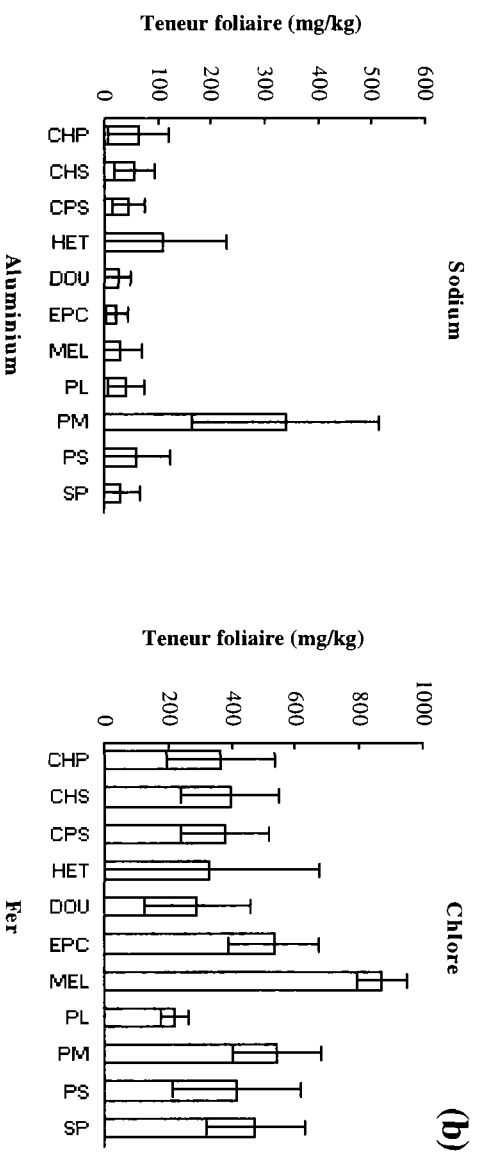


Figure 8 (suite)

Concernant le magnésium, le peuplement de mélèze et les peuplements de chênes ont les plus fortes teneurs foliaires (respectivement 2,0 et 1,7 mg.g⁻¹). Les différences entre les autres espèces ne sont pas importantes et probablement non significatives. Les peuplements de pin sylvestre et d'épicéa ont les plus faibles valeurs (respectivement 0,9 et 1,0 mg.g⁻¹).

2.3. Teneurs en microéléments

Les teneurs en microéléments sont d'une manière générale plus variables entre placettes que celles des macroéléments. Pour certains éléments il est donc plus difficile de mettre en évidence des différences entre espèces (**Figure 8**, p.41). Cette variabilité intègre également la variabilité liée à l'analyse chimique : de plus faibles teneurs sont plus difficiles à maîtriser au niveau de la reproductibilité (cf. chapitre matériels et méthodes: suivi de l'assurance qualité).

Le zinc est le microélément le moins variable entre placettes, entre années et entre espèces. La plus forte valeur est observée chez le pin sylvestre (39 µg.g⁻¹). Pour les autres essences, les teneurs moyennes se situent entre 17 et 24 µg.g⁻¹.

A l'opposé, le sodium est l'élément dont la teneur varie le plus entre placettes d'une même essence, ce qui est en partie lié au problème de reproductibilité des analyses pour cet élément. Le pin maritime a la plus forte teneur moyenne en sodium du réseau (339 µg.g⁻¹ en moyenne et 649 µg.g⁻¹ pour la valeur maximale observée). C'est aussi la seule essence dont les placettes sont situées à proximité du littoral. Le hêtre est également caractérisé par une teneur élevée (109 µg.g⁻¹ en moyenne et 549 µg.g⁻¹ pour la valeur maximale observée). Un peu moins de la moitié des placettes de hêtre (11 placettes sur 20) sont situées à proximité du littoral atlantique ou méditerranéen. Il existe une bonne relation entre la teneur foliaire moyenne en sodium des peuplements du réseau et leur distance à l'océan atlantique appréciée par la coordonnée Lambert X (longitude) des placettes (**Figure 9**). Cette relation existe aussi pour le chlore. Les deux placettes les plus à l'est, sont les placettes corses. Seule l'une d'entre elles (PM 20) semble soumise aux apports méditerranéens en sodium. Les placettes les plus à l'ouest (coordonnées Lambert X inférieures à 400) n'ont pas toutes des teneurs foliaires élevées en sodium.

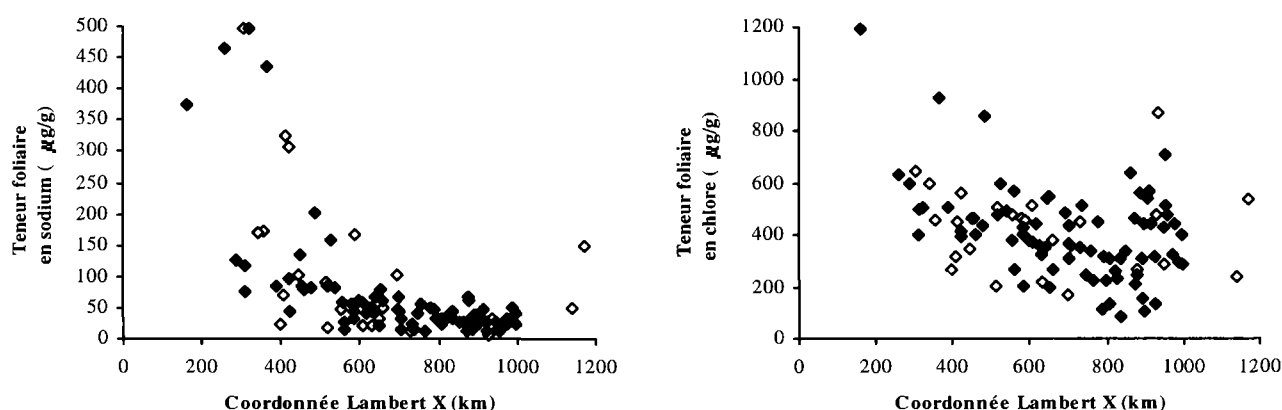


Figure 9: Teneurs foliaires des placettes en sodium (à gauche) et en chlore (à droite) en fonction de leur longitude (n=102). En blanc sont représentées les placettes les plus méridionales (latitude < 44°51') et en noir les placettes plus septentrionales.

Figure 9: Average foliar concentrations for sodium (on left) and chlorine (on right) per plot according to their longitude (n=102). The white symbols are for the southern plots (latitude < 44°51') and the black symbols for the more northern ones.

Une étude plus détaillée permet de montrer que les placettes caractérisées par les plus fortes teneurs en sodium (supérieures à $400 \mu\text{g.g}^{-1}$) sont des placettes de pin maritime et de hêtre. Bien qu'il y ait un effet de proximité de l'océan, la teneur foliaire en sodium est également liée à l'espèce.

Concernant le chlore, la variabilité entre placettes pour une essence donnée est telle qu'aucune différence entre espèces ne peut être mise en évidence, à part dans le cas du peuplement de mélèze qui présente une teneur très élevée ($871 \mu\text{g.g}^{-1}$ en moyenne) par rapport aux autres essences du réseau dont les teneurs moyennes varient de 220 à $541 \mu\text{g.g}^{-1}$.

Pour les autres microéléments, les teneurs foliaires varient selon les espèces mais aussi beaucoup selon les placettes, probablement en relation avec le type de sol. Les essences représentées par des peuplements situés essentiellement sur des sols acides comme le douglas, le pin laricio et le pin sylvestre ont des teneurs foliaires en aluminium élevées ($> 200 \mu\text{g.g}^{-1}$).

Les teneurs en cuivre et en fer sont plus élevées chez les feuillus, mais ce n'est qu'une tendance, en particulier pour le cuivre, car ces valeurs varient fortement entre placettes (cf. **Figure 8**, p.41). Dans le cas du fer, le peuplement de mélèze a des teneurs moyennes proches de celles des feuillus (respectivement $104 \mu\text{g.g}^{-1}$ et de 79 à $129 \mu\text{g.g}^{-1}$). Les teneurs en manganèse sont particulièrement faibles dans les peuplements de pin maritime ($161 \mu\text{g.g}^{-1}$).

2.4. Minéralomasses^{100f(1000a)}

Les feuilles des chênes sessile et pédonculé contiennent la minéralomasse^{100f} la plus importante, globalement au-delà de 420 mg d'azote pour 100 feuilles. Ensuite le hêtre est en position intermédiaire avec des valeurs comprises entre 210 et 420 mg d'azote pour 100 feuilles. L'épicéa et le pin sylvestre contiennent le moins d'azote foliaire avec des valeurs proches de 210 mg pour 1000 aiguilles. Ce schéma de répartition des gammes de valeurs entre les différentes essences est très proche pour le potassium et le soufre (données non représentées). Les minéralomasses^{100f (100a)} foliaires de potassium et de soufre sont les plus élevées pour les chênes, et les plus faibles pour l'épicéa. Au niveau du calcium foliaire, les minéralomasses^{100f} dans les feuilles de chêne sont plus élevées que dans les feuilles de hêtre. On observe d'autre part que la variabilité interplacette de cet élément chez le hêtre est plus importante que chez les chênes. Les mêmes observations peuvent être faites pour la minéralomasse^{100f} foliaire de magnésium chez les chênes et le hêtre.

2.5. Conclusions

Les teneurs en micronutriments sont plus variables entre espèces mais aussi entre placettes que celles des macronutriments, en partie à cause d'une plus forte variabilité analytique. Les teneurs foliaires en chlore et en sodium sont nettement influencées par les apports maritimes. Pour certains éléments comme l'aluminium la variabilité des teneurs dépend aussi de la richesse minérale des sols. Dans le cas des macronutriments, les teneurs en azote, soufre et potassium varient selon les espèces et présentent de plus fortes valeurs chez les feuillus. Par contre, les teneurs foliaires en phosphore, magnésium et calcium semblent moins dépendre de l'espèce que des types de sols.

Ces conclusions ne concernent que l'échantillon des 102 peuplements du réseau et ne peuvent être généralisés à toute la France. Il est donc important de garder à l'esprit qu'un effet "essence" pour les teneurs en nutriments foliaires ne peut pas être mis en évidence, notamment quand le nombre de placette par essence est réduit (Mélèze, $n = 1$; Pin laricio, $n = 2$, Mélange chêne sessile et pédonculé, $n = 2$), ou quand une majorité des placettes d'une essence est dans la même région (Pin maritime, 3 placettes sur 5 sont landaises, mais on note pour cette essence que l'essentiel de la surface boisée en France est dans les landes). Dans ce dernier cas les insuffisances en phosphore, en cuivre et en

manganèse sont relativement bien connues. L'effet "essence" peut alors être fortement influencé par un effet "station".

3. Comparaison des teneurs foliaires aux seuils de référence

3.1. Seuils européens

Les "normes" européenne des teneurs foliaires en nutriments (désignées dans la suite du texte par "seuils^{Eu} ") sont définies pour différents groupes d'essences forestières par rapport aux valeurs observées dans 16 pays européens (Stefan et al., 1997). Ces seuils^{Eu} ne se réfèrent en aucun cas à la croissance des arbres ou à leur état sanitaire. L'objectif principal de ces seuils^{Eu} est de pouvoir comparer les analyses foliaires des différents pays à un système de référence actuel homogène (cf. **Tableau 1**, p.4).

La plupart des pays disposent de seuils de référence pour les teneurs foliaires mais ces seuils ne sont pas toujours définis selon les mêmes critères. Pour certains pays, le niveau critique correspond déjà à un état de carence alors que pour d'autres à ce niveau la carence n'est pas encore atteinte. Le groupe d'experts européens qui travaille sur les analyses foliaires au sein du Programme Coopératif International d'évaluation et de suivi des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (ICP-Forests) a établi en 1995 des seuils de composition foliaire pour l'Europe à partir des observations réalisées dans les placettes de niveau 1 et 2 dans 16 pays ne comprenant pas la France (Stefan et al., 1997). Ces seuils sont constitués de trois niveaux de teneurs : faible (classe 1), moyen (classe 2) et élevé (classe 3) sans signification physiologique particulière du point de vue de la croissance ou de la santé des arbres afin d'éviter toute ambiguïté. Ils constituent une condition nécessaire mais non suffisante pour définir l'état de nutrition des peuplements. En effet, pour une même espèce, un seuil de nutrition donné ne sera pas toujours associé à la même réponse physiologique selon les conditions édaphiques et climatiques qui caractérisent le peuplement.

Au niveau européen, ces seuils de référence ont été établis pour le hêtre (seule espèce représentée: *Fagus sylvatica*), les chênes (45 % des placettes de *Q. ilex*; 25 % de *Q. robur*; 7 % de *Q. suber*; 6 % de *Q. petraea*; 6 % de *Q. cerris*; et 11 % d'autres espèces de chêne), le genre *Pinus* (74 % des placettes de *P. sylvestris*; 7 % de *P. nigra*; et 7 % de *P. halepensis*), et le genre *Picea* (89 % des placettes de *P. abies*; et 11 % de *P. sitchensis*). Ils ont été fixés pour les 6 macroéléments suivants : N, P, K, S, Mg et Ca qui sont analysés dans tous les pays membres du programme ICP-Forests (**Tableau 13**, p.46). Dans le cas des chênes, les valeurs seuil du soufre n'ont pas été définies. En 1997, lors de la 4^{ème} réunion annuelle des experts européens en analyse foliaire, des valeurs seuil ont été proposées pour les micronutriments suivants : Zn, Mn, Fe et Cu.

Pour les rapports entre éléments, la gamme de valeurs correspondant à un équilibre "harmonieux" entre deux éléments a été calculée à partir des deux valeurs seuil de chaque élément (Stefan et al., 1997). La valeur seuil inférieure du rapport entre les éléments A et B (A/B) correspond au rapport entre la valeur seuil inférieure de A et la valeur seuil supérieure de B (et inversement pour la valeur seuil supérieure du rapport entre ces deux éléments). La comparaison des teneurs foliaires en nutriments avec ces seuils^{Eu} a été réalisée pour chaque essence du réseau RENECOFOR (**Tableau 14**, p.47).

Azote

Les placettes de hêtre et de chênes du réseau RENECOFOR sont caractérisées par des teneurs foliaires en azote moyennes à fortes (plus de 15 mg.g⁻¹ pour les chênes et plus de 18 mg.g⁻¹ pour le hêtre). Le pourcentage de placettes de chêne pédonculé en classe 3 (73 % en moyenne sur les 5 ans) est supérieur à celui des placettes de chêne sessile (47 %). En ce qui concerne le hêtre, 45 à 86 % des placettes selon les années, sont caractérisées par des teneurs élevées ([N] > 25 mg.g⁻¹).

Tableau 13: Seuils de référence des teneurs foliaires en éléments nutritifs pour l'Europe (selon les résolutions prises lors du 3^e meeting du groupe d'experts sur les analyses foliaires, Stefan et al., 1997). La classe 1 correspond aux valeurs de teneur \leq bi, la classe 2 aux valeurs comprises entre bi et bs et la classe 3 aux valeurs $>$ bs (bi = borne inférieure, bs = borne supérieure).

Table 13: *European classification of the threshold values for foliar nutrition (=European thresholds) according to the 3rd meeting of the foliar experts' panel (Stefan et al., 1997). Class 1 values are concentrations at \leq bi, class 2 lies between bi and bs and class 3 values are $>$ bs (bi = lower limit, bs = upper limit).*

Groupes d'essence		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
		(mg.g ⁻¹)	(mg.g ⁻¹)	(mg.g ⁻¹)	(mg.g ⁻¹)	(mg.g ⁻¹)	(mg.g ⁻¹)	(μ g.g ⁻¹)	(μ g.g ⁻¹)	(μ g.g ⁻¹)	(μ g.g ⁻¹)
Chênes	bi	15	1,0	- ⁽¹⁾	5	3	1,0	60	60	5	15
	bs	25	1,8	- ⁽¹⁾	10	8	2,5	200	2500	10	50
Hêtre	bi	18	1,0	1,3	5	4	1,0	60	60	5	20
	bs	25	1,7	2,0	10	8	1,5	200	2500	10	50
Épicéas	bi	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	bs	17	2,0	1,8	9	6	1,5	200	2000	7	60
Pins	bi	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	bs	17	2,0	1,8	10	4	1,5	200	800	10	70

⁽¹⁾ Pas de valeurs proposées dans ce cas

La majorité des placettes de pin sylvestre et d'épicéa ont des teneurs foliaires en azote moyennes (classe 2). Par contre, les placettes de pin Laricio et de pin maritime ont des teneurs plutôt faibles. Toutefois, le regroupement de tous les pins pour élaborer des seuils^{Eu} communs à ces essences est assez discutable. Du point de vue de la composition foliaire, le pin sylvestre est relativement proche de l'épicéa tandis que le pin maritime et le pin laricio, à cause de leurs d'aiguilles plus grandes et contenant beaucoup de tissus de soutien, sont nettement plus pauvres en nutriments (Bonneau, communication personnelle).

L'année 1995 est caractérisée par des teneurs foliaires en azote élevées par rapport aux autres années, notamment chez les chênes et le hêtre. En 1995, les teneurs foliaires en azote dépassent 25 mg.g⁻¹ (classe 3) dans toutes les placettes de chêne pédonculé.

Phosphore

Plus de 80 % des placettes de chênes, de hêtre, de pin sylvestre et de pin Laricio ont des teneurs foliaires en phosphore moyennes (classe 2). Quelques placettes de hêtre sont caractérisées par de faibles teneurs sur l'ensemble de ces 5 années de suivi. Ce sont les placettes HET 21 (rendzine), HET 52 (rendzine), HET 55 (sol ocre podzolique sur gaize) et HET 64 (sol brun eutrophe). Les placettes HET 21 et HET 52 sont caractérisées par des sols de faible épaisseur et par la présence de calcaire dans la terre fine qui peut diminuer la disponibilité en azote, en phosphore et en potassium (Brêthes et Ulrich, 1997). Les placettes HET 55 et HET 64 sont sur des sols non carbonatés, acides en surface.

Les placettes de pin maritime ont des teneurs foliaires en phosphore globalement faibles. Ces placettes sont sur des sols pauvres. A l'opposé les placettes d'épicéa sont caractérisées par de fortes teneurs en phosphore foliaire.

Soufre

Toutes les placettes d'épicéa et de pin laricio du réseau, 97 % des placettes de pin maritime et 70 % des placettes de pin sylvestre ont de faibles teneurs foliaires en soufre. C'est probablement le corollaire de leur faible teneur en azote (rapport S/N en poids normalement voisin de 0,069 dans les protéines), mais ces teneurs foliaires en soufre plutôt faibles ne doivent pas être interprétées comme une insuffisance en soufre. Ce constat est surprenant si on le compare aux dépôts soufrés issus des émissions industrielles qui ont été très élevés en Europe pendant les 50 dernières années.

La majorité des placettes de hêtre (95 %) ont des teneurs foliaires en soufre moyennes.

Tableau 14: Pourcentage moyen, minimum et maximum de placettes RENECOFOR répartis entre les 3 classes de teneur foliaire en éléments nutritifs définies pour l'Europe (Seuils^{Eu}). Les moyennes sont calculées sur 5 ans (1993 à 1997), les % minimums et maximums se rapportent à une seule année.

Table 14: Average, minimum and maximum percentage of RENECOFOR plots situated within the 3 foliar nutrient concentration classes established for European stands (European thresholds). The average is based on five years of foliar analysis (1993 to 1997), minimum and maximum % refer to only one year.

Eléments	Essences	% en Classe 1			% en Classe 2			% en Classe 3			Nombre placettes
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	
Azote	Chêne pédonculé	0	0	0	27	0	56	73	44	100	9
	Chêne sessile	0	0	0	53	21	68	47	32	79	19
	Epicéa	2	0	9	89	82	100	9	0	18	11
	Hêtre	0	0	0	34	14	55	66	45	86	20
	Pin maritime	89	57	100	11	0	43	0	0	0	7
	Pin sylvestre	6	0	7	59	29	86	36	7	64	14
Phosphore	Chêne pédonculé	7	0	11	91	89	100	2	0	11	9
	Chêne sessile	6	0	11	87	84	90	6	0	11	19
	Epicéa	2	0	9	16	9	27	82	73	91	11
	Hêtre	17	9	27	81	68	91	3	0	5	20
	Pin maritime	89	71	100	11	0	29	0	0	0	7
	Pin sylvestre	3	0	14	97	86	100	0	0	0	14
Soufre	Epicéa	100	100	100	0	0	0	0	0	0	11
	Hêtre	4	0	14	96	86	100	1	0	5	20
	Pin maritime	97	86	100	3	0	14	0	0	0	7
	Pin sylvestre	70	43	86	30	14	57	0	0	0	14
Potassium	Chêne pédonculé	0	0	0	62	33	89	38	11	67	9
	Chêne sessile	0	0	0	77	63	100	23	0	37	19
	Epicéa	0	0	0	100	100	100	0	0	0	11
	Hêtre	3	0	9	89	80	96	9	0	20	20
	Pin maritime	9	0	29	91	71	100	0	0	0	7
	Pin sylvestre	0	0	0	100	100	100	0	0	0	14
Calcium	Chêne pédonculé	0	0	0	58	33	78	42	22	67	9
	Chêne sessile	0	0	0	78	63	100	22	0	37	19
	Epicéa	4	0	18	80	73	91	16	9	27	11
	Hêtre	6	0	18	46	41	55	47	41	59	20
	Pin maritime	0	0	0	100	100	100	0	0	0	7
	Pin sylvestre	1	0	7	97	93	100	1	0	7	14
Magnésium	Chêne pédonculé	0	0	0	100	100	100	0	0	0	9
	Chêne sessile	0	0	0	100	100	100	0	0	0	19
	Epicéa	0	0	0	100	100	100	0	0	0	11
	Hêtre	32	25	36	52	41	64	16	0	27	20
	Pin maritime	0	0	0	66	43	86	34	14	57	7
	Pin sylvestre	4	0	7	96	93	100	0	0	0	14

Tableau 14 (suite) :

Eléments	Essences	% en Classe 1			% en Classe 2			% en Classe 3			Nombre placettes
		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	
Fer	Chêne pédonculé	0	0	0	93	89	100	7	0	11	9
	Chêne sessile	3	0	11	95	84	100	2	0	5	19
	Epicéa	2	0	9	98	91	100	0	0	0	11
	Hêtre	10	0	32	88	68	100	2	0	9	20
	Pin maritime	14	0	43	86	57	100	0	0	0	7
	Pin sylvestre	0	0	0	100	100	100	0	0	0	14
Manganèse	Chêne pédonculé	0	0	0	96	78	100	4	0	22	9
	Chêne sessile	0	0	0	58	42	84	42	16	58	19
	Epicéa	0	0	0	100	100	100	0	0	0	11
	Hêtre	0	0	0	89	80	100	11	0	20	20
	Pin maritime	0	0	0	100	100	100	0	0	0	7
	Pin sylvestre	0	0	0	70	57	100	30	0	43	14
Cuivre	Chêne pédonculé	2	0	11	82	56	100	16	0	44	9
	Chêne sessile	1	0	5	90	74	100	10	0	26	19
	Epicéa	16	0	36	78	55	100	6	0	18	11
	Hêtre	3	0	14	84	68	100	14	0	32	20
	Pin maritime	34	14	57	66	43	85,7	0	0	0	7
	Pin sylvestre	0	0	0	100	100	100	0	0	0	14
Zinc	Chêne pédonculé	18	0	56	82	44	100	0	0	0	9
	Chêne sessile	35	0	84	65	16	100	0	0	0	19
	Epicéa	15	0	27	86	73	100	0	0	0	11
	Hêtre	26	0	50	75	50	100	0	0	0	20
	Pin maritime	14	0	29	86	71	100	0	0	0	7
	Pin sylvestre	0	0	0	100	100	100	0	0	0	14

Potassium

Les teneurs foliaires en potassium sont moyennes pour la majorité (plus de 80 %) des placettes de chênes, de hêtre, d'épicéa et de pins.

En 1995 et 1996, le pourcentage de placettes en classe 2 est plus important que les autres années. Les teneurs foliaires en potassium ont baissé dans plusieurs placettes passant de la classe 3 à la classe 2.

Calcium

La plupart des placettes d'épicéa, des pins et de chêne sessile ont des teneurs en calcium moyennes (classe 2). Près de la moitié des placettes de hêtre et de chêne pédonculé ont des teneurs moyennes et l'autre moitié des teneurs élevées. Les teneurs foliaires en calcium les plus élevées se rencontrent préférentiellement sur les sols calcaires ou calciques chez le hêtre (cf. troisième partie).

Magnésium

Toutes les placettes de chênes, d'épicéa et de pin laricio et 96 % des placettes de pin sylvestre ont des teneurs foliaires en magnésium moyennes (classe 2). Les placettes de pin maritime ont des teneurs moyennes à élevées pour PM 85 et PM 20. Bien que les sols et les humus des placettes PM 85 (sol peu évolué d'apport sur sables dunaires calcaires) et PM 20 (sol brun humifère sur arène granitique) soient très différents, ils présentent les plus fortes teneurs en magnésium échangeable, ce qui semble expliquer le niveau des teneurs foliaires de ces deux peuplements par rapport aux autres peuplements de pin maritime du réseau.

Dans un tiers des placettes de hêtre les teneurs foliaires moyennes en magnésium sont inférieures à 1 mg.g⁻¹ (classe 1).

Fer

Quelques placettes de hêtre et de pin maritime sont caractérisées par de faibles teneurs foliaires en fer. Pour les chênes, l'épicéa, le pin laricio et le pin sylvestre les teneurs en fer sont correctes.

Manganèse

Une part non négligeable de placettes de chêne sessile (42 %), de pin laricio (30 %) et de pin sylvestre (30 %) a des teneurs foliaires en manganèse élevées. Pour les autres essences, les teneurs sont à un niveau correct.

Zinc

Les teneurs foliaires en zinc sont faibles pour plusieurs placettes de chêne, d'épicéa, de hêtre et de pin maritime.

Par contre elles sont moyennes pour le pin laricio et le pin sylvestre.

Cuivre

Les teneurs foliaires en cuivre des placettes de chêne, de hêtre, de pin laricio et de pin sylvestre sont de niveau moyen. Quelques placettes d'épicéa sont caractérisées par de faibles teneurs en 1995 et 1996 ($\leq 2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Les peuplements de pin maritime PM 85 et PM 17 situés sur dunes calcaires ont également de faibles teneurs foliaires en cuivre ($\leq 2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).

Par rapport aux seuils européens de teneur en nutriments foliaires, les valeurs obtenues pendant les 5 premières années de suivi sur les placettes du réseau RENECOFOR montrent globalement peu de cas préoccupants.

3.2. Seuils indicatifs^{Fr}

Les "normes" françaises des teneurs foliaires en nutriments (désignées dans la suite du texte par "seuils indicatifs symptomatiques" abrégés en "seuils indicatifs^{Fr}") s'appuient sur des résultats expérimentaux (essais de fertilisation, relations nutrition/production) obtenus en France et à l'étranger. Elles ont été proposées (Bonneau, 1995) par rapport (1) à la croissance et (2) à des symptômes de dysfonctionnement (jaunissement, et défoliation), puis modifiées d'après van den Burg (1985 et 1990) pour être utilisées dans le cadre du réseau RENECOFOR. L'objectif principal de ces seuils est d'être un système d'appréciation de l'état physiologique des arbres. L'état actuel des connaissances sur ces seuils reste très fragmentaire, et les valeurs citées dans ce rapport sont données à titre indicatif. Elles représentent une base de travail destinée à être améliorée et complétée, notamment par rapport aux facteurs qui peuvent les modifier (âge, station, altitude ...). Pour la terminologie utilisée dans ce rapport, le lecteur se reportera à l'introduction (Tableau 1, p.4).

Bonneau (1988, 1995) a proposé des seuils de composition foliaire en éléments nutritifs à partir de données issues de différentes expériences réalisées en France et à l'étranger. Trois seuils de teneur ont été proposés pour les principaux nutriments et pour cinq groupes d'essence (résineux à grandes aiguilles, résineux à petites aiguilles, mélèze, feuillus peu exigeants et feuillus exigeants) : un seuil de carence, un seuil critique et une teneur optimale. Ces seuils ont été proposés essentiellement pour des arbres jeunes (moins de 10-15 ans). Ils ont été transposés au cas des peuplements adultes après consultation de Bonneau et Montpied (comm. pers.) et en reprenant les valeurs de van der Burg (1985, 1990). Lorsque les seuils indicatifs^{Fr} étaient définis par une fourchette de valeurs, nous avons choisi la borne inférieure de cet intervalle comme valeur limite. Ce choix réalisé dans un souci de

simplification ne doit cependant pas faire oublier que l'optimum correspond plus à une plage de valeurs plus ou moins large et pas à un seuil bien précis.

Les valeurs indicatives que nous avons utilisées comme référence pour les teneurs foliaires en nutriments des peuplements du réseau RENECOFOR sont présentées ci-après (**Tableau 15**).

Tableau 15: Seuils indicatifs^{Fr} des teneurs foliaires en éléments nutritifs utilisés pour le réseau RENECOFOR (adaptés d'après Bonneau, 1995 et van den Burg, 1985 et 1990). Le seuil de carence et le seuil critique sont des limites supérieures, la valeur de l'optimum une limite inférieure.

Table 15: French thresholds for foliar nutrients used in order to assess RENECOFOR data (adapted from Bonneau, 1995, and van den Burg, 1985 and 1990). The values shown for deficiency ("carence") and critical thresholds are at upper limits of range, whereas the optimum level value is at lower limit of range of concentration.

Essences	Seuils	Macronutriments						Micronutriments			
		N (mg.g ⁻¹)	P (mg.g ⁻¹)	S (mg.g ⁻¹)	K (mg.g ⁻¹)	Ca (mg.g ⁻¹)	Mg (mg.g ⁻¹)	Fe (µg.g ⁻¹)	Mn (µg.g ⁻¹)	Cu (µg.g ⁻¹)	Zn (µg.g ⁻¹)
Chêne pédonculé	carence	15	-	1	4	3	0,9	-	-	-	-
	critique	20	1,1	1,3	6	5	1,2	-	-	-	-
	optimum	22	1,5	-	8,5	-	1,4	-	-	-	-
Chêne sessile	carence	15	-	1	4	3	0,9	-	-	-	-
	critique	20	1,1	1,3	6	5	1,2	-	-	-	-
	optimum	22	1,5	-	8,5	-	1,4	-	-	-	-
Hêtre	carence	15	0,8	1,3	5	3	0,8	-	-	-	-
	critique	20	-	1,5	7	5	-	-	-	-	-
	optimum	23	2	-	9	-	1,5	-	-	-	-
Douglas	carence	13	1	1	4	1	0,6	-	-	-	-
	critique	15	1,4	1,2	6	2	1	-	-	2,5	16
	optimum	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-	-
Epicéa	carence	11	1	0,8	4	1	0,6	30	20	2	10
	critique	13	1,3	1	4,5	2	1	-	-	3	20
	optimum	15	1,5	1	5,5	4	1,4	100	150	-	-
Mélèze	carence	14	1	1,3	5	2,5	0,5	-	-	-	-
	critique	18	1,4	1,5	6	4	1	-	-	-	-
	optimum	20	2,2	-	7	6	-	-	-	-	-
Pin Laricio	carence	8	0,6	0,7	3,5	0,8	0,7	-	-	-	-
	critique	10	0,9	0,8	4,5	1	1	-	-	-	-
	optimum	-	1,2	1	5	1,9	-	-	200	-	-
Pin maritime	carence	7	0,6	0,7	3	0,8	0,6	-	-	-	-
	critique	9	0,9	0,8	4,5	1	1	-	50	-	-
	optimum	12	1,2	1,2	-	-	-	-	400	-	-
Pin sylvestre	carence	13	1	0,7	3	1	0,4	30	-	2,5	5
	critique	15	1,5	1	4	1,5	0,7	-	20	-	-
	optimum	-	1,8	-	6	2	1	-	100	4	20
Sapin pectiné	carence	10	0,8	0,8	3	0,8	0,7	30	25	-	-
	critique	13	1,2	1	4,5	3,8	1	-	-	-	-
	optimum	16	1,5	-	6	5	1,4	100	150	-	-

3.2.1. Résultats par élément et par espèce

Les pourcentages cités ci-après correspondent à une moyenne établie pour les 5 années de mesures de 1993 à 1997 (**Figure 10**, p.59, **Cartes 2 à 7**, p.53 à 58 et **Tableau A 9**, p.167).

Azote

Les teneurs foliaires en azote sont supérieures à la teneur optimale dans la majorité des placettes de chênes, de hêtre et dans la placette de mélèze (4 fois en 5 ans). Dans le cas de l'épicéa 60 % des placettes ont des teneurs inférieures à la teneur optimale.

Toutes les placettes de sapin pectiné ont des teneurs foliaires en azote inférieures à la teneur optimale et 4 sur 10 par an en moyenne ont des teneurs inférieures au seuil critique. La majorité des placettes de pin maritime a des teneurs moyennes inférieures à la teneur optimale et la moitié a des teneurs inférieures au seuil critique. Dans le cas du pin sylvestre, 27 % des placettes (4 placettes sur 14) ont des teneurs inférieures au seuil critique.

Phosphore

Les teneurs foliaires en phosphore sont inférieures à la teneur optimale dans la majorité des placettes et inférieures au seuil critique dans 13 à 87 % d'entre elles selon les essences. Les placettes de douglas, de pin sylvestre et de pin maritime sont caractérisées par de faibles teneurs, presque toutes inférieures au seuil critique. La placette de mélèze et la moitié des placettes d'épicéa ont des teneurs supérieures à la teneur optimale.

Soufre

Les teneurs foliaires moyennes en soufre sont inférieures au seuil critique dans la majorité des placettes d'épicéa et dans la placette de mélèze. Pour les autres essences, sauf le chêne pédonculé, 18 à 52 % des placettes ont des teneurs inférieures au seuil critique.

Potassium

Les teneurs foliaires en potassium sont proches ou dépassent la teneur optimale dans la plupart des placettes de chêne pédonculé, d'épicéa et pour les deux placettes de pin laricio. Elles sont inférieures au seuil critique dans 29 % des placettes de hêtre et dans 43 % des placettes de pin maritime. Pour les autres essences les teneurs se situent entre ces deux seuils.

Calcium

Les teneurs foliaires en calcium sont inférieures au seuil critique dans 24 % des placettes de hêtre (5 sur 20). Le peuplement de mélèze a des valeurs inférieures à la teneur optimale alors qu'il est situé sur un sol riche en calcium. Le seuil que nous avons choisi pour cette essence n'est peut-être pas adapté à ce type de peuplement situé en altitude. Pour les autres essences les teneurs sont optimales dans la majorité des placettes.

Magnésium

Les teneurs foliaires en magnésium sont inférieures au seuil critique dans la moitié des peuplements d'épicéa et inférieures à la teneur optimale dans 83 % des peuplements de hêtre, 73 % des peuplements de pin sylvestre et 64 % des peuplements de sapin pectiné.

Fer

Nous ne disposons de seuils indicatifs^{Fr} que pour le pin sylvestre, l'épicéa et le sapin pectiné. Parmi ces trois essences, 42 % des peuplements d'épicéa et 39 % des peuplements de sapin pectiné ont des teneurs foliaires en fer inférieures au seuil de carence.

Manganèse

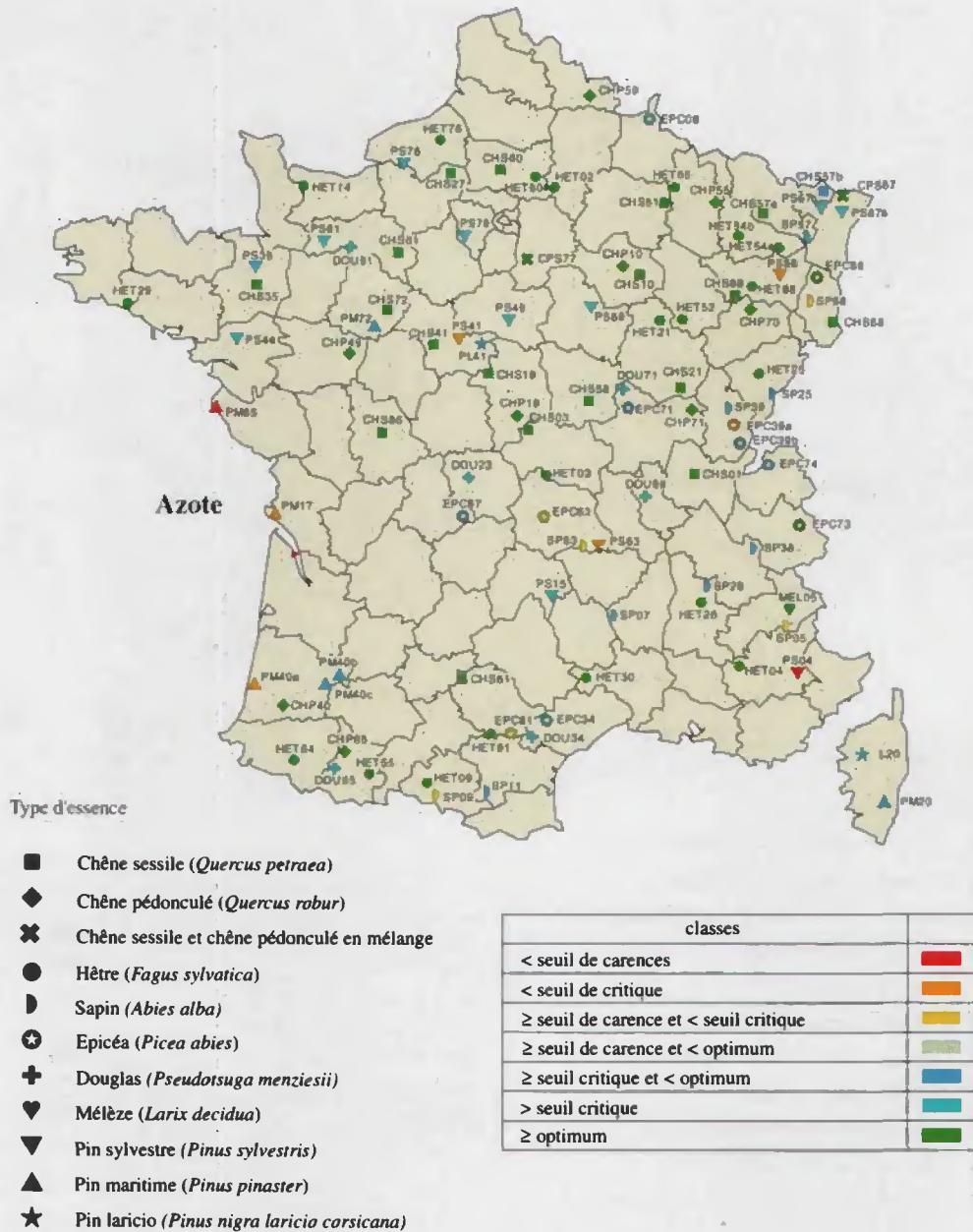
Les teneurs foliaires en manganèse des peuplements d'épicéa, de pin laricio, de pin sylvestre et de sapin pectiné sont supérieures à la teneur optimale. Par contre, celles des peuplements de pin maritime sont majoritairement inférieures à la teneur optimale, voire inférieures au seuil critique pour 2 placettes sur 5 par an en moyenne.

Cuivre

Les valeurs seuil du cuivre ne sont définies que pour le douglas, l'épicéa et le pin sylvestre. Dans la majorité des peuplements de pin sylvestre (90 %), les teneurs foliaires en cuivre sont inférieures à la teneur optimale. Elles sont inférieures au seuil critique dans 65 % des peuplements d'épicéa.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée

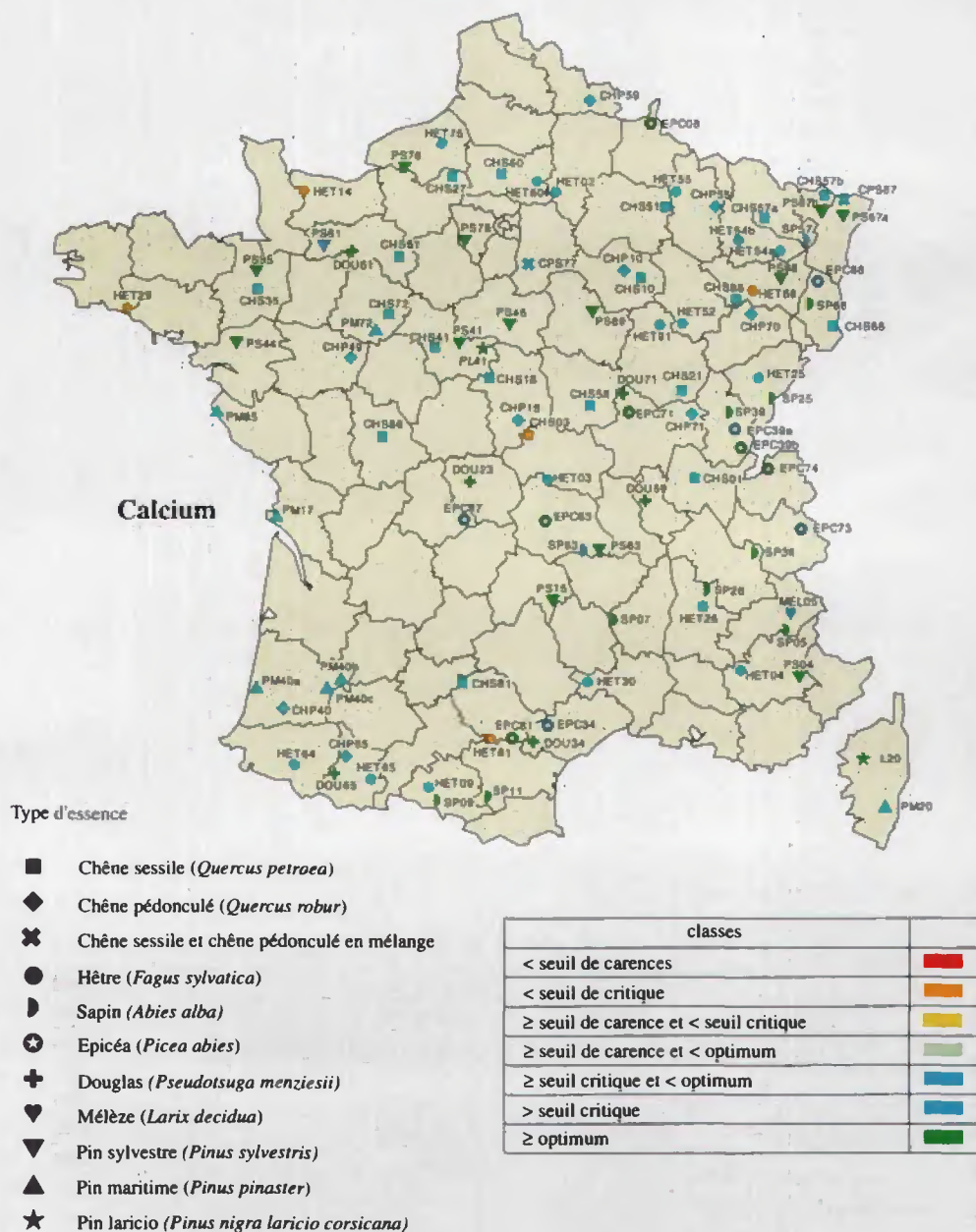


Carte 2: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en azote des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 2: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for N for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée

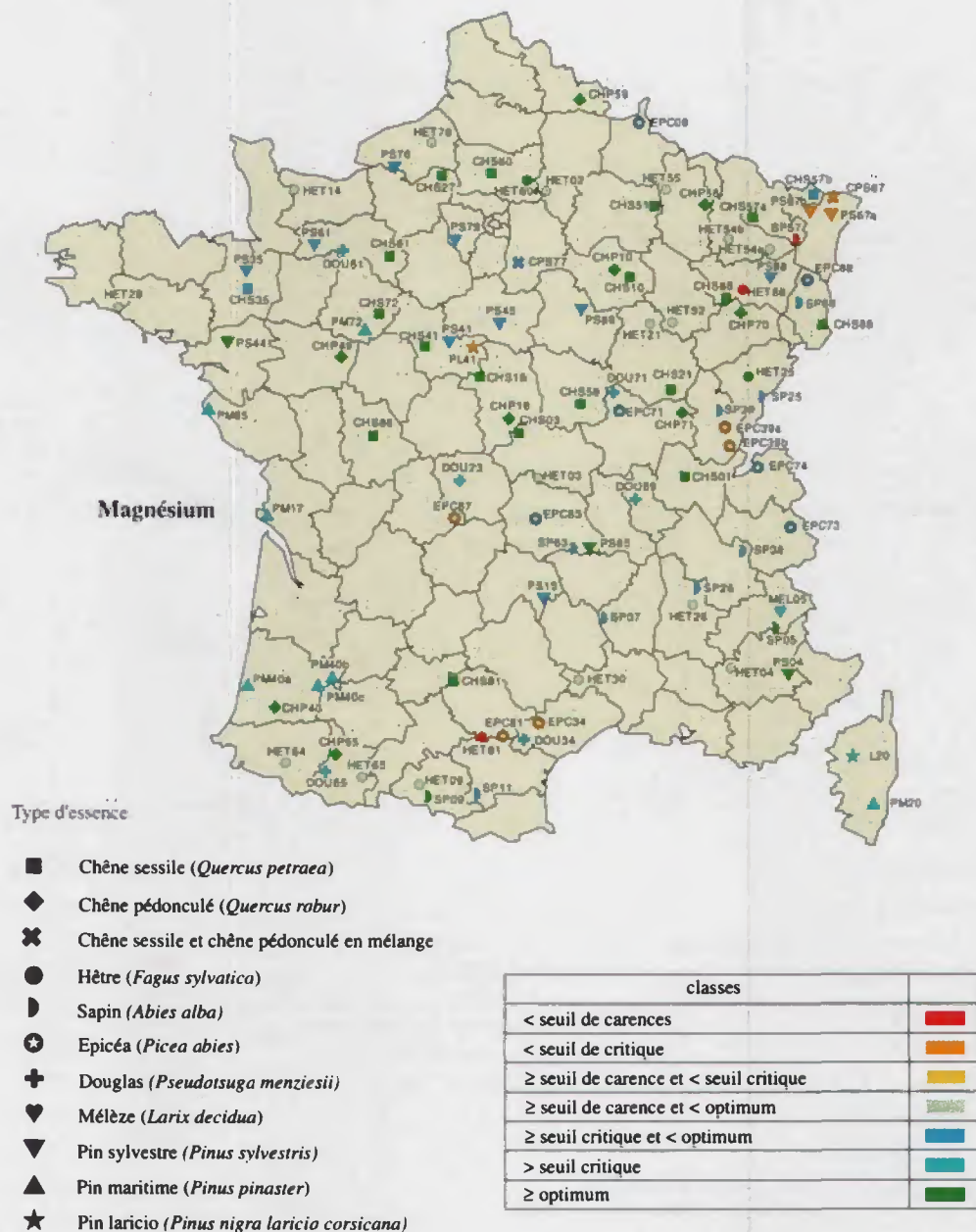


Carte 6: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en calcium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 6: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for Ca for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée

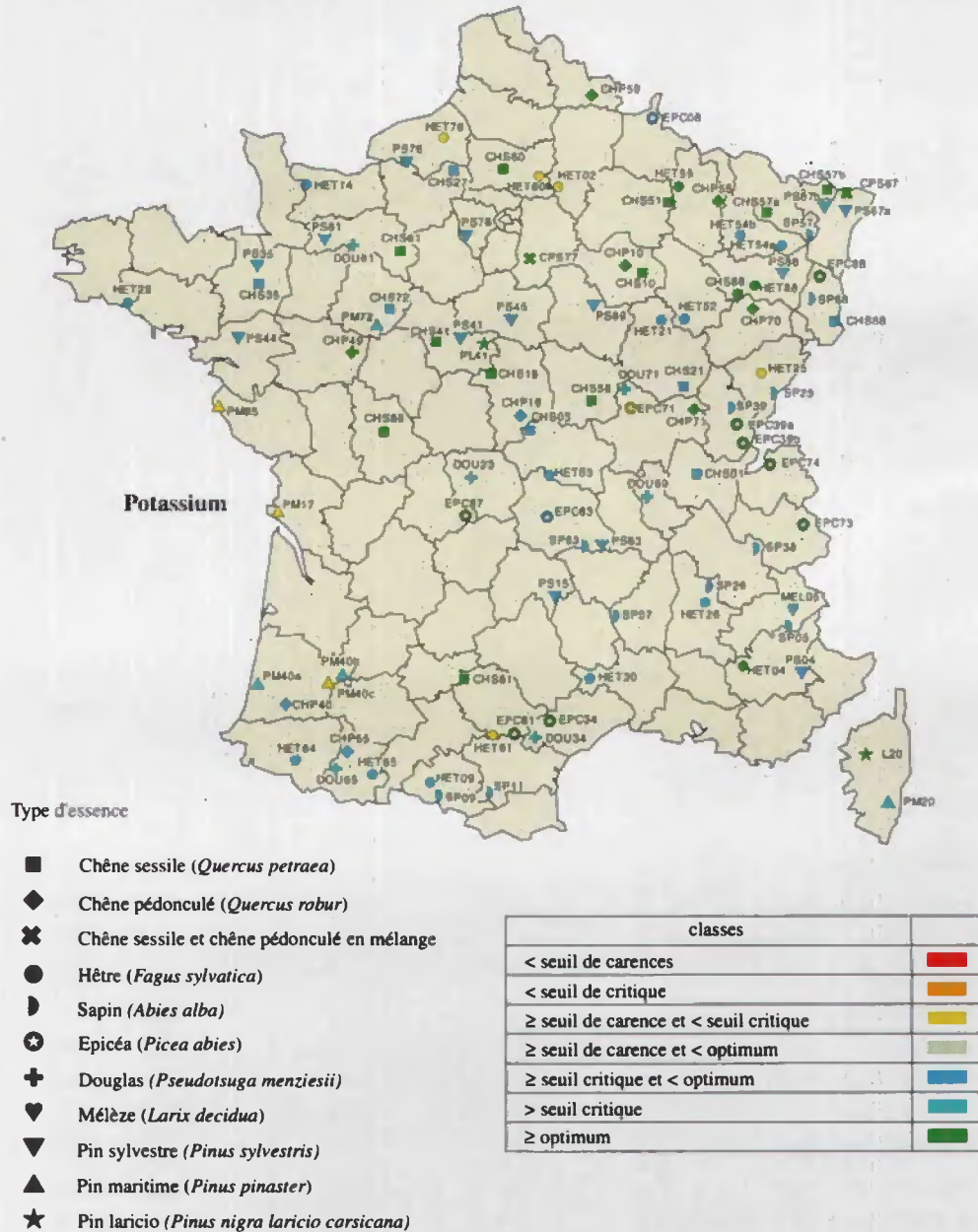


Carte 4: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en magnésium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 4: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for Mg for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée

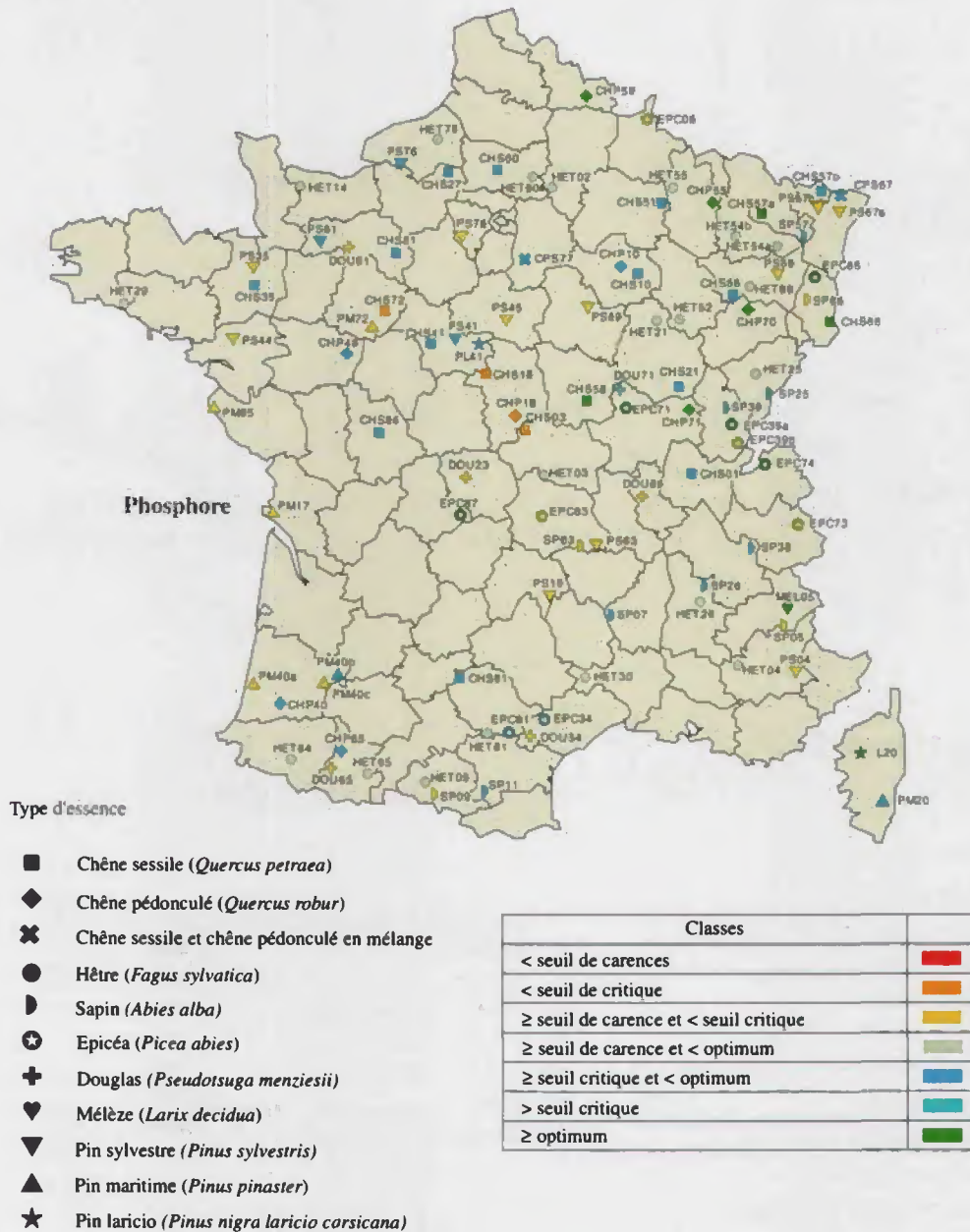


Carte 5: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en potassium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 5: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for K for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée

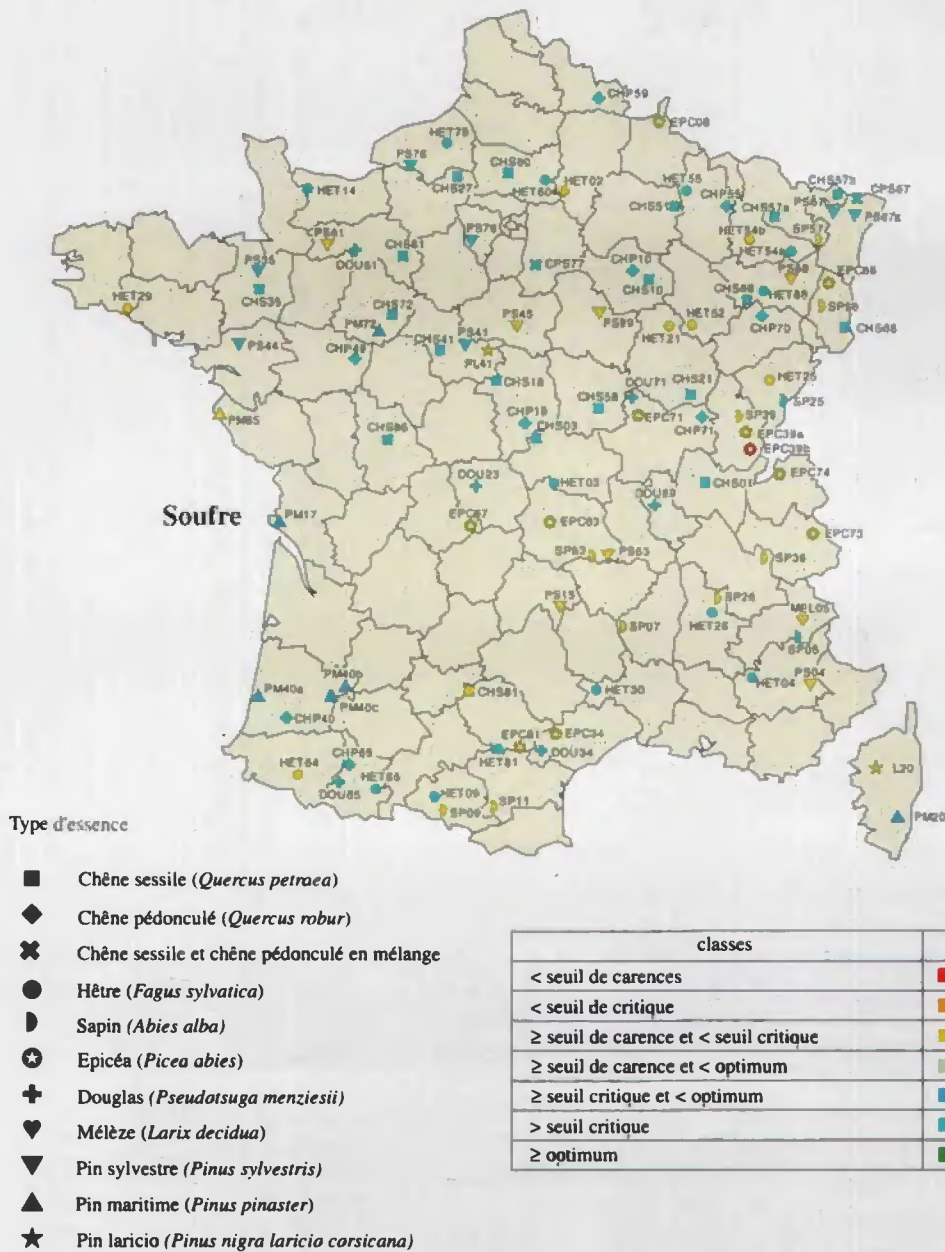


Carte 3: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en phosphore des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 3: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for P for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

Note importante

- Les valeurs de seuil retenues pour comparer les teneurs en nutriments foliaires observées sur les placettes du réseau RENECOFOR sont indicatives et sujettes à des ajustements
- En l'absence d'étude approfondie, toute extrapolation spatiale de ces comparaisons est totalement infondée



Carte 7: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en soufre des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} (cf. **Tableau 15**, p.50).

Map 7: Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for S for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.

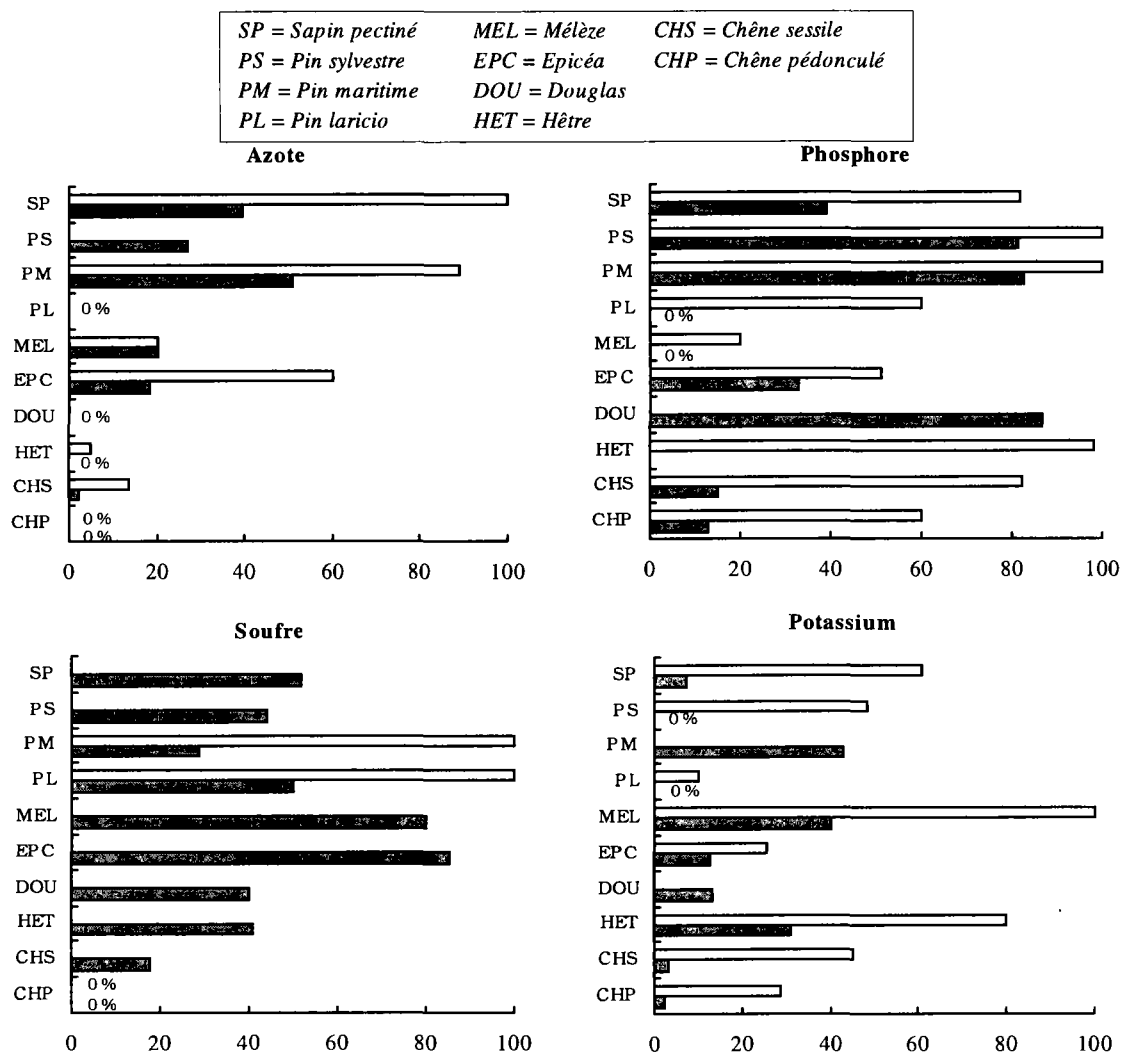


Figure 10: Pourcentage de placettes par essence dont les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 sont inférieures à la teneur optimale (blanc), au seuil critique (gris), et au seuil de carence (noir) (Comparaisons avec les seuils indicatifs^{Fr} indiqués dans le **Tableau 15**, p.50) . Ce dernier cas concerne uniquement les microéléments (Fe, Mn, Cu et Zn). L'absence de barre signifie que la valeur seuil n'a pas été définie et "0 %" signifie qu'aucune teneur n'est inférieure au seuil donné.

Figure 10: For each species, percentage of plots where the average foliar concentrations are below the optimum concentration (white), the critical threshold (grey), and the deficiency threshold (black) for Fe, Mn, Cu and Zn only (For comparison with French thresholds see Table 15, p.50). No bars means that no threshold value was defined, "0 %" means that none of the concentrations are below the given threshold value.

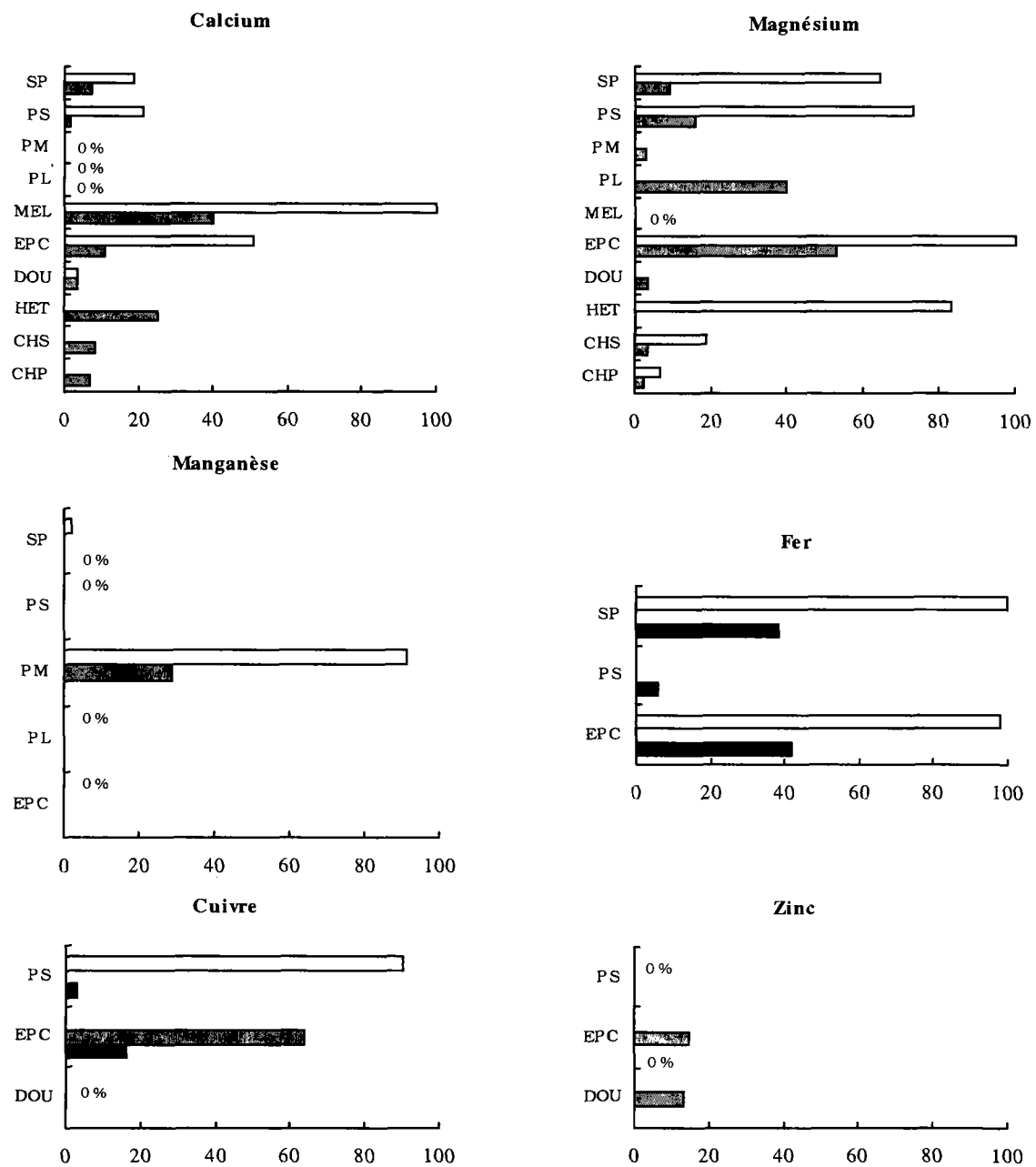


Figure 10 (suite et fin)

Zinc

Les valeurs seuil du zinc ne sont définies que pour le douglas, le pin sylvestre et l'épicéa. Sur les 6 placettes de douglas du réseau et les 11 placettes d'épicéa, 1 à 2 placettes ont des teneurs foliaires en zinc inférieures au seuil critique. Les teneurs foliaires en zinc des peuplements de pin sylvestre sont optimales.

3.2.2. Placettes dont les teneurs foliaires sont inférieures au seuil de carence ou au seuil critique

Les placettes dont la teneur foliaire en un élément donné est inférieure au seuil critique ou au seuil de carence au moins trois fois en cinq ans ont été identifiées (Tableau 16, p.61). Ce tableau n'est pas exhaustif car les seuils de nutrition n'ont pas été fixés pour tous les éléments, ni pour toutes les essences. Ce n'est donc pas parce qu'une case du tableau est vide qu'il faut conclure que tous les

peuplements ont un niveau correct de nutrition pour l'élément donné. Ce tableau ne peut être interprété sans se référer en même temps aux seuils indicatifs (**Tableau 15**, p.50).

Chêne pédonculé

La teneur foliaire en phosphore du peuplement CHP 18 est inférieure au seuil critique en relation avec de très faibles teneurs en phosphore dans le sol.

Le peuplement CHP 65 a la plus faible teneur foliaire en calcium (inférieure au seuil critique). Il est situé sur un sol brun colluvial à faible fertilité minérale, surtout vis-à-vis du potassium (Brêthes et Ulrich, 1997).

Tableau 16: Placettes dans lesquelles la nutrition foliaire est au-dessous du seuil critique (caractère normal) ou du seuil de carence (en gras) au moins trois fois en cinq ans (Les chiffres correspondent au code du département). Un tiret signifie qu'aucun seuil n'a été défini pour ce nutriment (cf. **Tableau 15**, p.50).

Table 16 : Plots showing nutrient concentrations under the critical threshold (normal type face) or the deficiency threshold (**bold**) at least three times in five years (The numbers indicate the Departments in which the plot is situated). A hyphen indicates that no threshold levels were defined for that nutrient (see also Table 15, p.50).

Essences	Azote	Phosphore	Soufre	Potassium	Calcium	Magnésium	Fer	Manganèse	Cuivre	Zinc
Chêne pédonculé (9 placettes)		18			65		-	-	-	-
Chêne sessile (19 placettes)		03, 18, 72	81		03		-	-	-	-
Hêtre (20 placettes)			02, 21, 25, 29, 52, 54b, 64, 76	02, 25, 60, 76, 81	03, 09, 14, 81, 88	03, 81, 88	-	-	-	-
Douglas (6 placettes)		23, 34, 61, 65, 69, 71	34				-	-		65
Épicéa commun (11 placettes)	39b, 73	39a, 39b, 71, 74	08, 34, 39a, 39b, 63, 71, 73, 74, 81, 87, 88	39b, 63		08, 34, 39a, 71, 74, 81	39a, 39b, 63, 74, 87		08, 34, 39a, 39b, 63, 71, 73, 74, 81, 87, 88	81, 87
Mélèze (1 placette)			05				-	-	-	-
Pin Laricio (2 placettes)			20			41	-	-	-	-
Pin maritime (7 placettes)	17, 40a, 85	17, 40a, 40c, 72, 85	40b	17, 40c, 85			-	40c, 85	-	-
Pin sylvestre (14 placettes)	41, 63, 04	04, 15, 35, 44, 45, 63, 67a, 67b, 78, 88, 89	04, 45, 61, 63, 88			67a, 67b				
Sapin pectiné (11 placettes)	05, 09, 63, 68	09, 11, 26, 63, 68	05, 09, 11, 26, 39, 57, 63, 68	26	63	57	25, 39, 63		-	-

Chêne sessile

Les chênaies sessiles du réseau sont situés sur des sols acides et pauvres en éléments minéraux pour la plupart. Néanmoins, les teneurs en nutriments foliaires indiquent peu de valeurs basses, proches des seuils de carence. Le peuplement CHS 03 est caractérisé par de faibles teneurs foliaires en phosphore et en calcium. Son sol a de faibles teneurs en bases échangeables et une très faible teneur en phosphore (Brêthes et Ulrich, 1997). Les teneurs foliaires en phosphore sont particulièrement basses aussi pour les peuplements CHS 18 et CHS 72.

Hêtre

Les trois peuplements de hêtre carencés en magnésium sont sur situés des sols acides à très faibles teneurs en magnésium échangeable. Ils ont également de faibles teneurs foliaires en calcium. Le peuplement HET 03 est caractérisé par un sol brun acide sur micaschistes, le peuplement HET 81 par un sol ocre podzologique/podzol ocrique sur granodiorites et le peuplement HET 88 par un sol brun faiblement lessivé à pseudogley et un sol brun acide sur grès (Brêthes et Ulrich, 1997). Les peuplements HET 55 et HET 76 sont également caractérisés par de faibles teneurs foliaires en magnésium, mais restant supérieures au seuil de carence, et de très faibles teneurs du sol en magnésium échangeable.

Sur les 20 peuplements de hêtre du réseau, 8 ont des teneurs foliaires en soufre inférieures au seuil critique ($< 1,5 \text{ mg.g}^{-1}$) au moins 3 fois en 5 ans, mais l'ensemble des teneurs est faible. Les teneurs moyennes, pour la période 1993-1997, varient entre placettes de 1,42 à 1,77 mg.g^{-1} , ce qui ne représente pas une grande variation. Cette variation est du même ordre que la variation interannuelle. Sur les huit peuplements ayant les plus faibles teneurs en soufre, 6 sont sur sols calcaires.

Quelques peuplements (5) ont de faibles teneurs en potassium.

Le peuplement HET 81 est caractérisé par de faibles teneurs foliaires en magnésium, potassium et calcium.

Epicéa commun

Cinq peuplements sur 11 sont carencés en fer ($[\text{Fe}]_{\text{fol}} \leq 30 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$). Les 6 autres peuplements ont des teneurs foliaires en fer inférieures ou proches de $50 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$ donc relativement faibles aussi. Pour les peuplements sur sols calcaires (EPC 39a et EPC 39b) cette carence peut s'expliquer par l'abondance du calcium dans le sol qui entraîne une diminution de l'absorption du fer (Heller et al., 1993).

La limite des faibles teneurs fixée par l'Europe ($20 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$) est inférieure au seuil de carence ($30 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$). Par conséquent les peuplements carencés, en référence aux seuils indicatifs^{Fr}, ont des teneurs moyennes vis-à-vis des seuils^{Eu}.

Le peuplement EPC 39b a des problèmes de nutrition en azote, phosphore, soufre, magnésium, cuivre et fer. Il est sur un sol humo-calciq ue très caillouteux gênant la prospection des racines. La décomposition de la matière organique est limitée par des conditions climatiques défavorables d'où une faible fertilité minérale du sol. Cependant ce peuplement ne montre aucun signe apparent de dépérissement.

La teneur foliaire en azote du peuplement EPC 73 est inférieure au seuil critique alors que Brêthes et Ulrich (1997) annoncent une minéralisation de l'azote acceptable dans le sol. Ce peuplement est sur sol brun acide, très caillouteux, et est soumis à des conditions climatiques défavorables qui limitent probablement son alimentation azotée.

Les 4 peuplements avec de faibles teneurs foliaires en phosphore sont aussi caractérisés par des teneurs en phosphore du sol faibles à très faibles (Brêthes et Ulrich, 1997 ; Ponette et al., 1997).

Le sol du peuplement EPC 63, tout comme celui de EPC 39b, est pauvre en potassium échangeable. Cela pourrait expliquer les faibles teneurs en potassium foliaire.

Il en va de même pour le magnésium avec les peuplements EPC 08, EPC 34, EPC 71 et EPC 81. Par contre, le peuplement EPC 74 est carencé alors que son sol est riche en magnésium échangeable et qu'il ne présente aucun signe apparent de dépérissement. Le peuplement EPC 39a a une faible teneur foliaire alors que la teneur de son sol en magnésium est moyenne. Ces deux derniers peuplements ont également des problèmes d'alimentation en phosphore. L'absorption de ces éléments est peut-être perturbée par la teneur élevée du sol en calcium échangeable (phénomène d'antagonisme) (Lemée, 1978). On peut rappeler à titre de comparaison, que les peuplements d'épicéa étudiés pendant le programme DEFORPA et situés dans le Jura et dans le Puy de Dôme présentaient aussi de faibles teneurs foliaires en N, P, K, et Mn (Bonneau, communication personnelle).

Les seuils indicatifs^{Fr} paraissent trop élevés et plus particulièrement pour les peuplements d'altitude. En effet, les résultats trouvés pour EPC 39a, EPC 39b, EPC 73 et EPC 74 sont à la limite ou au-dessous du seuil critique alors que ces peuplements ont une croissance normale.

Sapin pectiné

Trois peuplements de sapin pectiné sont carencés en fer : SP 25, SP 39 et SP 63. Les deux premiers sont sur sols calcaires et le dernier sur un sol brun acide en altitude. Il est aussi caractérisé par une faible teneur foliaire en calcium.

Les 5 peuplements caractérisés par des teneurs foliaires en phosphore inférieures au seuil critique sont sur des sols pauvres en phosphore, sauf SP 68 (Brêthes et Ulrich, 1997).

La teneur foliaire en magnésium du peuplement SP 57 est inférieure au seuil de carence en relation avec un sol brun acide désaturé (sur grès vosgiens) pauvre en magnésium et potassium échangeables. Ce sont les plus faibles teneurs observées pour les placettes de sapin pectiné. Le peuplement SP 38 est également caractérisé par de faibles teneurs du sol en magnésium et potassium mais sa teneur foliaire est correcte.

Quatre peuplements, SP 05, SP 09, SP 63 et SP 68, ont des problèmes apparents de nutrition azotée (teneur foliaire inférieure au seuil critique) malgré une bonne à moyenne minéralisation de l'azote dans le sol. Ce sont des peuplements d'altitude, caractérisés par des conditions climatiques défavorables. D'après l'étude floristique des placettes réalisée par Dobremez et al. (1997), le coefficient d'Ellenberg pour l'azote indique pour la placette SP 68 un sol relativement riche en azote. Les problèmes de nutrition azotée de cette placette seraient dus à des problèmes d'absorption plutôt qu'à des problèmes de disponibilité. Pour SP 05, SP 09 et SP 63, le coefficient d'Ellenberg indique un sol moyennement riche, à pauvre, en azote.

Les teneurs foliaires en potassium et en phosphore du peuplement SP 26 sont inférieures au seuil critique en relation avec de faibles teneurs du sol en ces mêmes éléments et un complexe adsorbant saturé par le calcium.

Huit peuplements sur 11 ont des teneurs foliaires en soufre inférieures au seuil critique (1 mg.g^{-1}) sans que cela se traduise pour la plupart d'entre eux par un dysfonctionnement apparent. Les valeurs moyennes (sur 5 ans) pour chaque peuplement sont comprises entre 0,95 et $1,04 \text{ mg.g}^{-1}$ et donc toutes inférieures ou proches du seuil critique. *Ce seuil est probablement trop élevé pour cette essence.*

Pins

Cinq peuplements de pin maritime et 11 peuplements de pin sylvestre ont des teneurs foliaires en phosphore inférieures au seuil critique. Les teneurs des autres peuplements sont très proches du

seuil critique. Cependant, ces teneurs sont moyennes si l'on se réfère aux seuils^{Eu} (entre 1 et 2 mg.g⁻¹). Tous ces peuplements sont sur des sols à faibles, voire très faibles, teneurs en phosphore sauf PS 41 dont la richesse en phosphore est correcte (Brêthes et Ulrich, 1997).

D'une manière générale, les peuplements des pins du réseau sont installés sur des formations sableuses, issues de roches métamorphiques pour la plupart, donnant des sols acides, très pauvres, caractérisés par une faible activité biologique (beaucoup d'humus de type mor) et une grande sensibilité à la sécheresse, d'où les problèmes de nutrition observés pour l'azote et le phosphore en particulier (Brêthes et Ulrich, 1997).

Les deux peuplements de pin maritime (PM 17 et PM 85) situés sur dune calcaire ont des problèmes de nutrition en azote, phosphore et potassium. Leur teneur foliaire en azote est inférieure au seuil critique pour PM 17 et inférieure au seuil de carence pour PM 85. Le peuplement PM 40a situé sur sol acide est également caractérisé par une faible teneur foliaire en azote. Des 3 peuplements landais, PM 40c a les teneurs du sol et les teneurs foliaires en potassium plus faibles.

Le peuplement corse de pin laricio PL 20 a une faible teneur foliaire en soufre. Il est sur un sol riche en matière organique brute à C/N élevé et très pauvre en phosphore.

La teneur foliaire en magnésium du peuplement PL 41 est inférieure au seuil critique. Ce peuplement est sur un sol acide désaturé.

Les deux peuplements alsaciens de pin sylvestre (forêts de Hagenau et d'Ingwiller, Bas-Rhin) caractérisés par un sol ocre podzolique sensible à la sécheresse et fortement désaturé sont déficitaires en magnésium. Leur teneur foliaire est inférieure au seuil critique.

Douglas

La teneur foliaire en zinc du peuplement DOU 65 est inférieure au seuil critique. C'est le peuplement de douglas le moins acide du réseau avec DOU 34 (pH_{CaCl2}>4), or la disponibilité en zinc diminue en milieu basique (Lemée, 1978).

Les teneurs foliaires en phosphore sont inférieures au seuil critique dans les 6 peuplements du réseau alors que les teneurs du sol sont moyennes d'après l'étude pédologique des placettes (Brêthes et Ulrich, 1997).

Ces peuplements sont toutefois en bonne santé et très productifs, il serait sans doute nécessaire de réviser ces seuils à la baisse.

La teneur foliaire en soufre du peuplement DOU 34 (1,19 mg.g⁻¹) est inférieure au seuil critique. Celles des 5 autres peuplements sont également faibles et proches du seuil critique (1,20 mg.g⁻¹). Elles varient de 1,20 à 1,31 mg.g⁻¹.

3.3. Conclusions

En résumé, d'après les seuils de composition foliaire proposés pour l'Europe, et les seuils indicatifs^{Fr}, les teneurs foliaires en *azote* des peuplements de hêtre et de chênes du réseau sont élevées. Elles sont par contre moyennes à faibles dans les peuplements de sapin en référence aux seuils indicatifs^{Fr}.

Les teneurs foliaires en *phosphore* sont moyennes à faibles dans les peuplements de chênes, de hêtre, et de sapin. Concernant les peuplements de pin sylvestre et d'épicéa, les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr} diffèrent suffisamment pour donner des conclusions différentes. Les valeurs seuils indicatifs^{Fr} sont supérieures à celles préconisées par les experts européens (seuils^{Eu}). Par conséquent, selon les seuils indicatifs^{Fr}, l'ensemble des peuplements de pin sylvestre et la moitié des peuplements d'épicéa ont de faibles teneurs foliaires en *phosphore*, alors que selon les seuils^{Eu} les

peuplements de pin sylvestre ont des teneurs foliaires en *phosphore* moyennes et les peuplements d'épicéa des teneurs foliaires en *phosphore* élevées.

Les peuplements de pin maritime du réseau sont situés sur des sols pauvres. Ils sont caractérisés par de faibles teneurs foliaires en *azote* et en *phosphore*.

D'après les seuils^{Eu}, les teneurs foliaires en *soufre* sont faibles pour l'ensemble des espèces, excepté le hêtre (teneurs moyennes). D'après les seuils indicatifs^{Fr}, ces teneurs sont comprises entre le seuil critique et l'optimum pour les peuplements de pins et pour une grande partie des peuplements de hêtre et de sapin, mais sont inférieures au seuil critique pour certains peuplements de hêtre et pour les peuplements d'épicéa. Il faut toutefois attirer l'attention sur le fait que les seuils pour le soufre restent assez mal connus.

Dans un tiers des peuplements de hêtre, tous situés sur des sols pauvres en magnésium, les teneurs foliaires en *magnésium* sont faibles.

D'après les seuils indicatifs^{Fr} (1 mg.g⁻¹), qui sont supérieurs à ceux de l'Europe (0,6 mg.g⁻¹), les peuplements d'épicéa ont des teneurs foliaires en *magnésium* proches ou inférieures au seuil critique.

En ce qui concerne les microéléments, les teneurs foliaires en *manganèse* sont élevées pour toutes les espèces excepté dans les peuplements de pin maritime. Les teneurs foliaires en *cuivre* sont faibles dans la plupart des peuplements d'épicéa d'après les seuils indicatifs^{Fr} et moyennes d'après les seuils^{Eu}. Les seuils indicatifs^{Fr} seraient-ils trop élevés pour cette essence ? De même, dans le cas du *fer*, certains peuplements d'épicéa (3 sur 11) sont carencés si l'on se réfère aux seuils indicatifs^{Fr} alors que les seuils^{Eu} indiquent des valeurs moyennes.

Au vu de ces résultats, il apparaît que les seuils^{Eu}, et les seuils indicatifs^{Fr} ne sont pas toujours concordants, ce qui peut conduire à des différences importantes de classement. C'est notamment le cas pour l'épicéa où les seuils indicatifs^{Fr} de l'azote, du phosphore, du soufre, du magnésium, du cuivre et du fer, semblent trop élevés pour les peuplements d'altitude. Les exigences de ces peuplements sont probablement plus faibles que pour les peuplements de plaine et par conséquent les seuils devraient être plus bas pour ces peuplements. L'altitude est vraisemblablement à prendre en compte pour ajuster les seuils.

4. Relations entre éléments et avec la masse foliaire^{100f (1000a)}

4.1. Etude des corrélations

4.1.1. Corrélations entre la masse foliaire^{100f (1000a)} et les teneurs en nutriments

Hêtre

Le poids sec de 100 feuilles est négativement corrélé ($r = -0,5$) à la teneur foliaire en azote et en soufre (**Tableau A 10**, p.169). Par ailleurs, ces deux éléments sont positivement corrélés entre eux. Si l'on distingue les placettes de montagne (altitude > 500 m) des placettes de plaine, deux tendances inversées apparaissent au lieu d'une seule tendance négative (**Figure 11**, p.66). Dans le cas des placettes de plaine, la teneur en azote semble augmenter avec le poids sec des feuilles et dans le cas des placettes de montagne, la teneur en azote semble diminuer quand le poids sec des feuilles augmente et ce, quel que soit le type de sols. Cette corrélation négative en montagne entre un indice de "vigueur" (hauteur, ou dans notre cas la masse de 100 feuilles) et la teneur en azote est assez classique, elle a été fréquemment observée (Le Tacon et Oswald sur épicéa en Ardèche,

Chichery sur sapin dans les Hautes Vosges ... Bonneau, communication personnelle). L'altitude deviendrait plus vite limitante pour la vigueur que pour la minéralisation de l'azote. Il faut cependant mentionner ici que chez le hêtre, la masse surfacique des feuilles dépend fortement du niveau d'éclaircissement, et par conséquent de la hauteur de prélèvement. La masse de 100 feuilles diminue donc rapidement du haut vers le bas, ce qui peut induire une variabilité importante si les prélèvements ne sont pas tous réalisés au même niveau dans l'arbre.

Dans son étude sur les hêtraies du nord-est de la France, Duquesnay (1998) montre que les teneurs foliaires en azote et en phosphore sont plus élevées dans les placettes de montagne que dans les placettes de plaine. Inversement les teneurs en potassium et en manganèse sont plus faibles. Les teneurs en phosphore sont très élevées dans les sols des placettes de montagne et les humus très riches en azote.

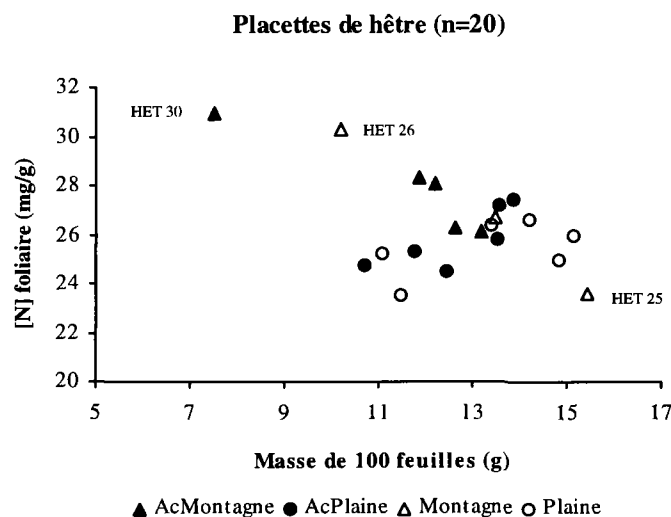


Figure 11: Teneur foliaire en azote (mg.g^{-1}) et masse de 100 feuilles (g) dans les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. Moyennes des 5 années de suivi. "Ac" correspond aux placettes sur sols acides.

Figure 11: Foliar nitrogen concentration (mg.g^{-1}) and dry weight of 100 leaves (g) for the 20 beech plots in the RENECOFOR network. Averages for 5 years of monitoring. ("Ac" = plots are located on acidic soils Montagne = Mountain ; Plaine = Plain).

Sapin pectiné

La teneur foliaire en azote est positivement corrélée au poids sec de 1000 aiguilles. Un arbre bien alimenté en azote a donc des aiguilles plus grandes et des teneurs foliaires en azote plus élevées.

Pin sylvestre

Le poids sec de 1000 aiguilles est corrélé positivement à la teneur foliaire en soufre, en fer et en sodium et négativement à la teneur en magnésium et en aluminium. D'autre part, la teneur foliaire en magnésium est positivement corrélée à celle de l'aluminium et négativement à celle du manganèse.

La corrélation de la masse de 1000 aiguilles avec la teneur foliaire en sodium montre que les placettes proches du littoral (PS 35, PS 61, PS 76) et la placette PS 78 (région parisienne) ont les plus fortes masses de 1000 aiguilles et semblent être mieux alimentées en soufre que les autres. Les placettes PS 76 et PS 78 sont à proximité d'une grande agglomération (Le Havre et Paris) et de nombreuses industries.

L'apport de sulfates d'origine marine ou d'origine anthropique (pollution atmosphérique) peut être à l'origine de l'augmentation de la teneur foliaire en soufre pour ces placettes et par conséquent de la

masse foliaire^{1000a}. Ces placettes sont aussi caractérisées par une plus faible teneur foliaire en magnésium et en aluminium.

La teneur foliaire en magnésium est liée à la teneur en magnésium échangeable du sol.

Dans une étude portant sur de jeunes individus de *Pinus nigra*, Cenni et al. (1998) ont trouvé une corrélation négative entre les teneurs foliaires en fer et en manganèse et le poids secs de 100 aiguilles. Dans notre cas, la teneur en fer est corrélée positivement avec le poids sec de 1000 aiguilles et l'aluminium est corrélé négativement, probablement car les niveaux de teneur en fer des peuplements de pin sylvestre du réseau RENECOFOR sont faibles et donc loin d'être toxiques pour les peuplements, ce qui n'est par contre pas le cas pour l'aluminium.

Pin maritime

La teneur foliaire en phosphore et en zinc est négativement corrélée avec le poids sec de 1000 aiguilles. Les teneurs en phosphore foliaire sont inférieures au seuil critique dans la plupart des placettes. Les sols de ces peuplements sont pauvres en phosphore assimilable (Brêthes et Ulrich, 1997). Les teneurs foliaires en zinc sont au dessous de la teneur optimale ($70 \mu\text{g.g}^{-1}$) et proches du seuil de carence ($20 \mu\text{g.g}^{-1}$) fixé par la commission européenne. Lorsque la masse de 1000 aiguilles augmente, la quantité de phosphore et de zinc n'augmente pas, ce qui se traduit par une diminution de la teneur en ces éléments dans les tissus foliaires par dilution. Les corrélations positives, d'une part, entre S et Mn, K et Fe, Cu et Al, et N et Cu, et négatives d'autre part, entre N et Na, Cu et Na, et Al et Na (non significatif, $r = -0,72$) laissent supposer que là où les ions acides sont "abondants", la masse de 1000 aiguilles est réduite, d'où une teneur plus faible des macroéléments (S, N, K). Il semble exister un antagonisme entre ces ions acides et le sodium.

Les placettes les plus proches du littoral ont une teneur foliaire en sodium et un poids sec foliaire plus élevés. D'autre part, l'acidité totale de leur sol est moins importante que dans les autres placettes, ce qui semble confirmer notre hypothèse d'un effet négatif des ions acides sur la productivité dans des placettes caractérisées par une faible fertilité minérale.

Douglas

Le poids sec de 1000 aiguilles est corrélé positivement avec la teneur foliaire en magnésium et négativement avec la teneur foliaire en calcium. Les résultats que nous observons traduisent probablement cet effet négatif du calcium sur la productivité et en l'occurrence sur la production de biomasse foliaire. Cette hypothèse doit cependant être avancée avec précaution car nous ne savons pas quelle est la relation entre la biomasse foliaire (dans le sens biomasse foliaire totale par arbre) et la biomasse foliaire^{100f (1000a)} que nous avons réellement mesuré. La teneur foliaire en calcium est liée à la teneur du sol en calcium.

Epicéa commun

Le poids sec de 1000 aiguilles est corrélé positivement à la teneur foliaire en aluminium seulement. Cette teneur varie beaucoup entre placettes (CV = 60 %) de même que la teneur foliaire en calcium (51 %) et en cuivre (41 %). Les corrélations négatives entre le calcium foliaire et l'azote, le soufre, le manganèse et l'aluminium indiquent un antagonisme entre le calcium et les ions aluminium et manganèse (acidité) qui conduit à une plus faible productivité (poids sec foliaire) et une moins bonne alimentation azotée et soufrée en milieu riche en calcium et pauvre en ions acides.

L'épicéa est en effet une essence qui tolère mal le calcium et les sols calcaires.

Sapin pectiné

Le poids sec des aiguilles est positivement corrélé avec l'azote ainsi qu'avec le soufre, le phosphore et le cuivre mais de façon non significative au seuil de 5 % (**Tableau A 10**, p.169). Les teneurs foliaires en azote, en soufre et en phosphore sont proches ou inférieures au seuil critique dans la

plupart des peuplements. On peut donc supposer que la production foliaire (poids sec) est essentiellement limitée par de faibles teneurs du sol en ces éléments.

Les éléments dont la teneur varie le plus entre placettes sont le calcium et le manganèse. Le calcium foliaire est négativement corrélé à l'aluminium et au manganèse, tandis que le magnésium est négativement corrélé au manganèse. Dans le premier cas, ces corrélations traduisent l'opposition entre la présence de calcium et de magnésium (ions basiques) et la présence d'ions acides (Al et Mn) dans les sols.

Chêne pédonculé

Le poids sec de 100 feuilles est négativement corrélé à la teneur foliaire en magnésium. Aucun autre élément n'est corrélé à la teneur foliaire en magnésium. Celle-ci est en relation avec la teneur du sol en magnésium échangeable sauf dans le cas de CHP 10 et CHP 55, deux taillis-sous-futaie, qui ont des teneurs foliaires faibles par rapport aux teneurs du sol. Ce sont également les deux peuplements les plus âgés. Il existe une relation positive entre le poids sec foliaire et l'âge des peuplements (Figure 12).

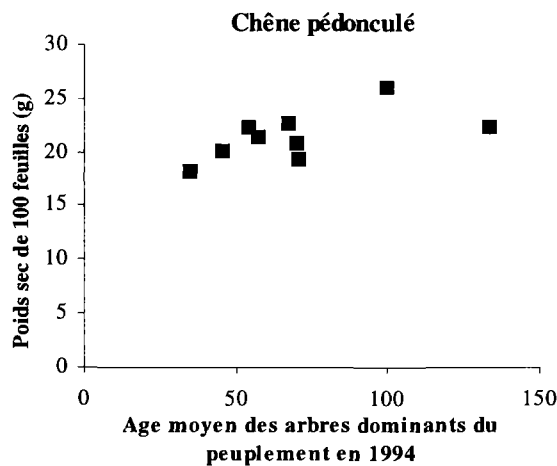


Figure 12: Relation entre le poids sec de 100 feuilles et l'âge moyen (en 1994) des arbres dominants et codominants des 9 chênaies pédonculés du réseau RENECOFOR.

Figure 12: Dry weight of 100 leaves as a function of the average age (in 1994) of dominant and co-dominant trees for the 9 pedunculate oak plots in the RENECOFOR network.

Chêne sessile

Le poids sec foliaire n'est corrélé significativement à aucun élément. Par contre, les teneurs foliaires en zinc et en soufre sont positivement corrélées entre elles et les teneurs en potassium et en manganèse sont négativement corrélées.

4.1.2. Corrélations entre éléments

Les éléments corrélés sont variables selon les espèces. Les corrélations communes à toutes les essences sont rares. Elles concernent le soufre et l'azote, et le sodium et le chlore (Tableau A 10, p.169).

L'azote et le soufre sont positivement corrélés chez toutes les espèces sauf chez le sapin pectiné et le pin maritime. Ce résultat traduit simplement le rapport S/N caractéristique de l'ensemble des protéines. Cette corrélation est forte ($r = 0,77$) mais non significative chez le douglas car le nombre de placettes est faible. Les teneurs foliaires en soufre sont inférieures au seuil critique dans la plupart des peuplements de sapin pectiné et les teneurs foliaires en azote sont faibles. Il en est de

même pour le pin maritime. L'absence de corrélation significative entre ces deux éléments pour ces espèces reflète probablement des problèmes d'alimentation et de déséquilibre nutritif pour certaines placettes. Dans le cas du sapin pectiné, l'azote est positivement corrélé au phosphore.

Le soufre et le phosphore sont positivement corrélés dans les peuplements d'épicéa et de sapin pectiné.

Pour l'épicéa et le douglas, l'azote est négativement corrélé au calcium (corrélation non significative pour le douglas, $r = -0,57$, voir **Tableau A 10**, p.169). La présence de calcaire dans les sols perturbe le métabolisme azoté. Une faiblesse du taux de minéralisation de l'azote organique sur sol calcaire ou un excès de nitrates peut conduire à un problème d'alimentation azotée. En milieu calcaire, les carences en azote sont fréquentes pour l'épicéa (Bonneau, 1995). Le douglas est également connu pour ne pas supporter les sols calcaires. Une alimentation azotée exclusivement nitrique conduit d'autre part à une forte carence azotée chez *Abies nordmaniana* (Khalil et al., 1989).

Il existe une corrélation positive entre le calcium et le phosphore pour les peuplements de chêne sessile et négative pour les peuplements de pin sylvestre. Ces deux espèces sont caractérisées dans le réseau par de faibles teneurs foliaires en phosphore. Dans le cas du chêne sessile, ceci est probablement lié à la pauvreté des sols acides sur lesquels les peuplements sont installés. Pour l'ensemble de ces peuplements le manganèse, plus caractéristique des sols acides, est corrélé négativement au calcium ($r = -0,43$).

Dans le cas du douglas, le phosphore est fortement corrélé au potassium ($r = 0,91$).

Le calcium et le magnésium sont corrélés positivement dans les peuplements de hêtre du réseau. Duquesnay (1998) avait également trouvé une corrélation positive entre ces deux éléments dans son étude sur les hêtraies du nord-est.

4.2. Rapport des teneurs foliaires

Les neuf rapports suivants ont été étudiés : N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg et Fe/Mn. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux essences présentant la plus grande variabilité pour un rapport donné (C.V. supérieur à 20 %). L'objectif est d'identifier d'éventuels déséquilibres nutritifs.

Des valeurs de référence ont été proposées pour l'Europe (Stefan et al., 1997) et d'autres pour l'Autriche (Stefan et Fürst, 1998) (**Tableau 17**, p.70).

Les moyennes et les niveaux de variation de ces rapports sont présentés par essence en annexe (**Tableau A 11**, p.172). Les moyennes et les variables de dispersion ont été calculées à partir des $n \times 5$ valeurs disponibles pour chaque essence, n correspondant au nombre de placettes par essence et 5 au nombre d'années de suivi. (de 1993 à 1997).

Chênes

Comparé aux valeurs de référence établies pour l'Europe, trois peuplements de chênes ont des rapports N/P élevés : CHP 18, CHS 03 et CHS 18.

Dans le cas du chêne pédonculé, les peuplements CHP 10, CHP 18, CHP 40 et CHP 49, caractérisés par de faibles teneurs foliaires en phosphore ($< 1,4 \text{ mg.g}^{-1}$) et des teneurs optimales en azote, ont des valeurs pour le rapport N/P supérieures à 20 (médiane : 18,1).

Hêtre

Les faibles valeurs des rapports N/Ca et K/Ca (inférieurs à 2,25 et 0,63) pour les peuplements HET 04, HET 21, HET 25, HET 26, HET 52, HET 54b, HET 60 indiquent un déséquilibre de nutrition par excès de calcium. Par contre, les peuplements HET 14, HET 81 et HET 88 ont une faible alimentation en calcium par rapport à l'apport d'azote (rapport N/Ca élevé). Leur teneur foliaire en calcium est inférieure au seuil critique (cf. **Tableau 16**, p.61).

Le rapport N/Mg des peuplements HET 03, HET 09, HET 30, HET 55, HET 65, HET 81, HET 88 est supérieur à 25 (références pour l'Europe), ce qui semble indiquer un déficit en magnésium entraînant un déséquilibre dans l'alimentation. Parmi ces peuplements, trois (03, 81 et 88) présentent des carences en magnésium d'après le seuil indicatif^{Fr}, et la placette HET 55 est proche de la carence.

Tableau 17: Intervalles correspondant à des rapports équilibrés entre nutriments. Valeurs proposées pour l'Europe et par Stefan et Fürst (1998) pour l'Autriche (entre parenthèses).

Table 17: Ranges for balanced nutrient ratios proposed by the European Commission and by Stefan and Fürst (1998) for Austria (in brackets).

Rapports	Epicéa (spruce)	Pin (pine)	Hêtre (beech)	Chênes (oak)
S/N	0,065-0,150 (0,057-0,075)	0,065-0,15 (0,057-0,075)	0,052-0,111	-
N/P	6-17 (7-10)	6-17 (7-10)	10,6-25	8,33-25
N/K	1,33-4,86 (1-3)	1,2-4,86 (1-3)	1,8-5	1,5-5
N/Ca	2-11,33 (2-7)	3-11,33 (2-7)	2,25-6,25	1,88-8,33
N/Mg	8-28,33 (8-14)	8-28,33 (8-14)	12-25	6-25
K/Ca	0,58-6 (0,8-2,4)	0,88-6,67 (0,8-2,4)	0,63-2,5	0,63-3,33
K/Mg	2,33-15 (2,2-6,4)	2,33-16,67 (2,2-6,4)	3,33-10	2-10
Ca/Mg	1-10 (2,5-5)	1-6,67 (2,5-5)	3,67-8	1,2-8

Douglas

Les rapports entre l'azote, le potassium et le magnésium d'un côté et le calcium de l'autre sont les plus variables entre peuplements du fait de la variabilité de la teneur en calcium entre placettes. Le calcium peut donc être considéré comme un bon discriminant des peuplements de douglas du réseau.

Epicéa

Si l'on se réfère aux seuils^{Eu}, aucun peuplement ne présente de déséquilibre particulier entre les différents nutriments étudiés, excepté pour le rapport S/N (faible). Tous les peuplements (sauf EPC 73) ont de faibles valeurs pour ce rapport. Comparé aux références, le rapport S/N est également faible dans la plupart des placettes, mais les valeurs sont proches du rapport S/N des protéines avec peut-être quelques problèmes d'alimentation en soufre. Toujours par rapport aux références établies par Stefan et Fürst (1998) le rapport N/P est élevé, sauf pour EPC 73 où ce

rapport est un peu bas et traduit un défaut d'alimentation azotée. La placette EPC 88 présente également un rapport N/P un peu bas malgré des teneurs foliaires en N correctes et des teneurs en P un peu fortes qui pourraient être liées à une utilisation agricole passée (Bonneau communication personnelle, et voir Ponce et al. 1998). Par contre le rapport N/K est normal. Les teneurs en soufre et en phosphore sont faibles dans la plupart des placettes d'épicéa (voir chapitres 2 et 3) ce qui conduit à des déséquilibres vis-à-vis de l'azote.

De faibles teneurs foliaires en potassium (inférieures au seuil critique) caractérisent les peuplements EPC 39b et EPC 63 (cf. **Tableau 16**, p.61). Le peuplement EPC 63 semble effectivement présenter une nutrition déséquilibrée entre l'azote et le potassium ($N/K > 3$).

Les rapports N/Mg et K/Mg sont élevés dans plus de la moitié des peuplements par rapport aux seuils données par Stefan et Fürst. Ces valeurs indiquent un déficit en magnésium entraînant un déséquilibre de nutrition notamment pour EPC 08 et EPC 81 ($N/Mg > 17,5$; limite indiquée par Althere et Evers, 1974, pour un début de carence magnésienne) et pour les peuplements EPC 34, EPC 39a, EPC 71, EPC 74, EPC 87.

Pin sylvestre

Le rapport S/N est voisin du rapport S/N des protéines dans la majorité des peuplements, et d'après les références de Stefan et Fürst les rapports N/P, N/Mg et K/Mg sont élevés. Pour le rapport N/P, ce sont surtout les placettes PS 35, PS 45, PS 63, PS 67b, et PS 78 qui présentent des valeurs élevées traduisant une alimentation faible en phosphore. Pour la placette PS 44 il s'agit plutôt d'un excès d'azote. Le rapport N/Mg est élevé, notamment pour les placettes PS 35 (N élevé), PS 67a et PS 67b (Mg faible). Ces valeurs indiquent, comme dans le cas de l'épicéa, des déficits en phosphore et magnésium dans la plupart des peuplements. D'après les valeurs des rapports K/Ca, N/Ca et Ca/Mg, les peuplements suivants ont de faibles teneurs foliaires en calcium : PS 35, PS 44, PS 61, PS 67a et PS 67b.

Pin maritime

Chez le pin maritime, les teneurs foliaires en azote et en potassium sont très variables entre peuplements. Les rapports intégrant ces deux éléments sont également très variables. Trois peuplements se distinguent plus particulièrement : PM 85, PM 17 et PM 40a. Ils sont situés sur les sols les moins acides et sont les plus proches de l'océan. Les tests de lavage d'aiguilles à l'eau déminéralisée réalisés sur ces placettes ont montré d'autre part que le biais dû aux dépôts sur les aiguilles pouvait être non négligeable selon les années. Leur teneur foliaire en azote est faible. Les valeurs des rapports N/P et N/K pour ces trois peuplements sont inférieures respectivement à 10 et 2 (médianes : 10,73 et 1,86) et les valeurs de S/N supérieures à 0,1 (médiane : 0,09). La teneur foliaire en potassium du peuplement PM 17 étant faible aussi, le rapport N/K est légèrement supérieur à 2 (2,17).

D'après Stefan et Fürst (1998), un équilibre harmonieux entre le soufre et l'azote se traduit chez les pins (plutôt le pin sylvestre) par un rapport S/N compris entre 0,057 et 0,075. Pour le rapport N/P, ils préconisent des valeurs comprises entre 7 et 10, et pour N/K entre 1 et 3. D'après les références proposées pour l'Europe, aucun peuplement ne présente de déséquilibre pour ces éléments, à part PM 72 dont le rapport N/P est élevé (Stefan et al., 1997).

Sapin pectiné

Les rapports intégrant le calcium ou le magnésium sont très variables entre placettes ainsi que le rapport Fe/Mn, reflétant la variation des conditions d'alimentation en ces éléments.

Les teneurs foliaires en calcium sont plus variables entre placettes que les teneurs foliaires en magnésium (cf. **Tableau A 13**, p.176). Les teneurs foliaires en manganèse sont très variables (CV inter-peuplements de 113 %) par rapport à celles du fer (20 %).

Les peuplements SP 11, SP 25 et SP 39 ont des teneurs foliaires en calcium élevées par rapport aux autres peuplements de sapin. Les peuplements SP 63 et SP 57 ont par contre de faibles teneurs en

calcium. Le peuplement SP 57, comme nous l'avons déjà montré ci-dessus est nettement déficitaire en magnésium. A l'opposé l'alimentation en azote et en potassium du peuplement SP 09 est perturbée par une forte absorption de magnésium. Le peuplement SP 68 a une faible alimentation en calcium et en magnésium, et une meilleure alimentation en potassium qu'en azote d'où un rapport N/Mg faible et K/Mg élevé. Le peuplement SP 63 a le plus faible rapport foliaire Ca/Mg (2,87) et le plus fort rapport K/Ca (1,47).

Les peuplements caractérisés par de faibles teneurs en calcium ou en magnésium ont des teneurs en manganèse plus élevées que les autres (sols acides) et réciproquement. Le calcium et le magnésium sont tous deux négativement corrélés au manganèse (avec $r = -0,58$ et $r = -0,88$).

5. Sources de variabilité des teneurs foliaires en nutriments

5.1. Variabilité intraplacette

Les analyses individuelles par arbre réalisées en 1997 pour l'ensemble des 102 placettes permettent d'estimer la variabilité intraplacette des teneurs en nutriments foliaires. Comme dans le cas des variabilités interplacette et interannuelle, la variabilité intraplacette moyenne pour chaque nutriment et par essence est estimée par le coefficient de variation (CV). Pour chaque placette, le CV entre les 8 arbres est calculé ainsi que la moyenne des minéralomasses^{100f (1000a)} entre toutes les placettes d'une même essence (**Tableau A 14**, p.178), et la moyenne des teneurs foliaires et des masses foliaires^{100f (1000a)} (**Tableau A 15**, p.180). Les coefficients de variation intraplacette minimum et maximum correspondent aux placettes où la variabilité intraplacette pour une essence et un élément donné est la plus faible et, respectivement la plus forte.

5.1.1. Teneurs et masse foliaire^{100f (1000a)}

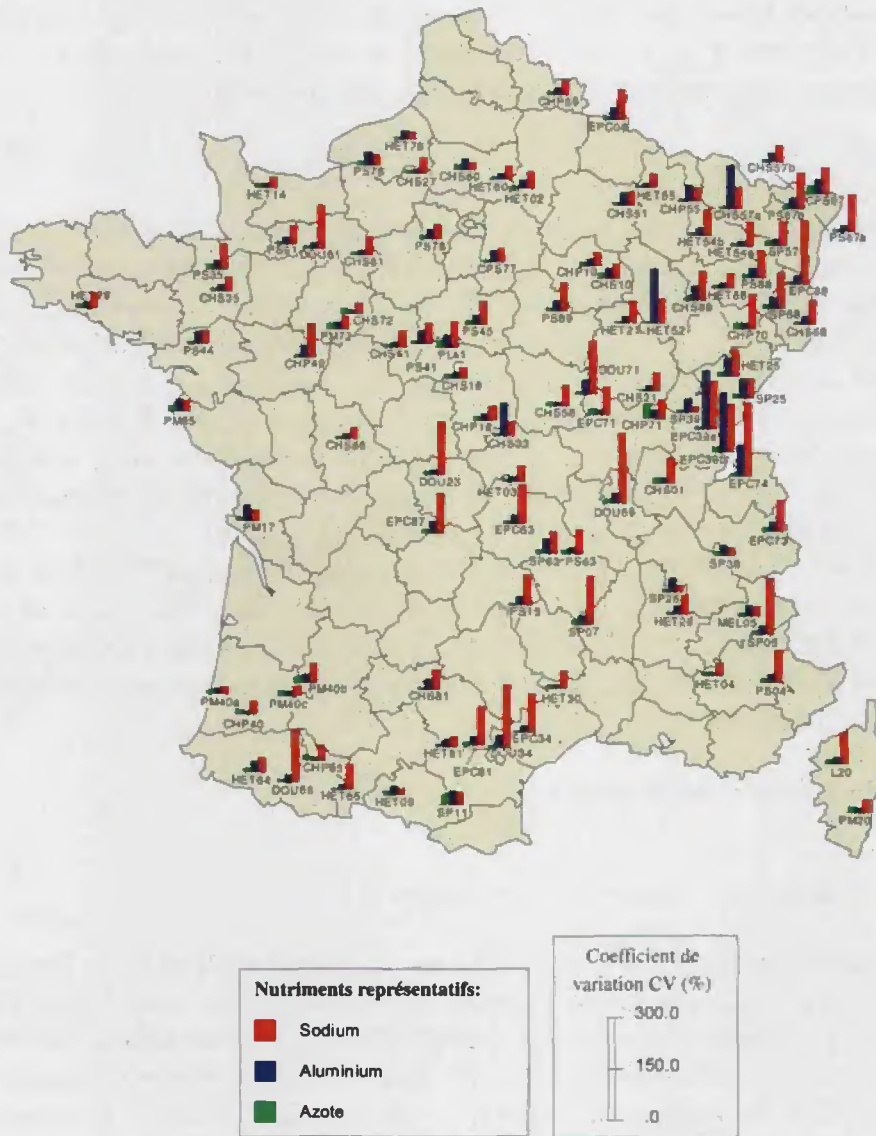
Le CV intraplacette de la masse foliaire^{100f (1000a)} varie entre arbres de 16 % dans le cas du pin maritime à 44 % dans le cas des placettes mélangées chêne sessile et pédonculé. La variabilité élevée dans le cas des chênes en mélange doit être considérée avec précautions car elle reflète la moyenne entre seulement deux placettes. Pour les autres essences, la variabilité intraplacette moyenne de la masse foliaire^{100f (1000a)} est relativement homogène autour de 25 %. Cette variabilité intraplacette dépend fortement des placettes pour une essence donnée. Elle est importante dans le cas du hêtre avec un coefficient de variation de 7 % pour la placette HET 04 et de 49 % pour la placette HET 54b. Dans le cas des autres essences cette variabilité peut aller du double au quadruple.

L'analyse de la variabilité intraplacette des macro- et des microéléments, toutes essences confondues, montre une variabilité plus importante dans le cas des micronutriments (36 % en moyenne) par rapport aux macronutriments (15 % en moyenne).

Les teneurs foliaires en azote sont celles qui varient le moins entre arbres d'une même placette pour l'ensemble des essences avec un coefficient de variation intraplacette moyen de 11 %. Selon les essences, cette variabilité est comprise entre 7,5 % dans le cas du hêtre et 15 % dans le cas du mélange chêne sessile / pédonculé. Les essences qui présentent une variabilité entre arbres inférieure à 9 % sont le hêtre, le douglas, le pin sylvestre, l'épicéa, et le chêne sessile.

Par ordre croissant de variabilité entre arbres viennent ensuite les teneurs en soufre (entre 8 et 14 %), en phosphore (entre 9 et 17 %), en potassium (entre 13 et 20 %), en magnésium (entre 12 et 24 %), et en calcium (entre 18 et 30 %).

Comme ce qui a été observé dans le cas de la variabilité interplacette, les teneurs en micronutriments sont plus variables entre arbres que celles des macronutriments. L'élément foliaire le plus variable entre arbres est le sodium qui varie entre 29 % dans le cas du mélèze, et 162 % dans le cas du douglas. A l'opposé, le zinc est le moins variable des micronutriments avec des CV compris entre 15 % pour le mélèze, et 29 % pour le chêne pédonculé.



Carte 8: Variabilité intraplacette en 1997 des teneurs foliaires de 3 nutriments (N, Al, Na) représentatifs de l'ensemble des éléments dosés: l'azote (comparable au P, S, K, Mg, Zn, Ca), l'aluminium (comparable au Fe, Cl, Mn), et le sodium (comparable au Cu) pour l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR.

Map 8: Intra-stand variability in 1997 for 3 nutrients (N, Al, Na) representative of all analysed elements. N is similar to P, S, K, Mg, Zn, Ca, Al is similar to Fe, Cl, Mn, and Na is similar to Cu.

Les CV des teneurs en chlore, et en fer sont du même ordre de grandeur (12 à 45 %) excepté dans le cas du fer pour le mélèze (54 %) pour lequel on ne dispose que d'une placette. La variabilité des teneurs en manganèse et en aluminium est comparable (20 à 37 %) excepté dans le cas de l'aluminium pour l'épicéa (58 %). Pour le cuivre, le degré de variabilité des teneurs foliaires entre arbres dépend fortement des essences. Un premier groupe d'essences représenté par le pin maritime, le mélèze, l'épicéa, le hêtre et le pin sylvestre affiche des CV compris entre 19 et 32 %. Un deuxième groupe d'essences constitué par le chêne pédonculé, le chêne sessile, le sapin et le douglas présente une variabilité comprise entre 39 et 50 %. Un dernier groupe, constitué des placettes de chêne en mélange et du pin laricio, présente des teneurs en cuivre très variables entre arbres (CV entre 80 et 100 %). Pour ces deux dernières essences, la prise en compte de seulement deux placettes limite fortement la représentativité de la variabilité intraplacette moyenne.

5.1.2. Minéralomasses^{100f (1000a)}

Les principales observations réalisées à partir des teneurs en nutriments restent valables si l'on analyse la variabilité intraplacette à partir des minéralomasses^{100f (1000a)}. L'élément le moins variable entre arbres d'une même placette est l'azote (CV = 28 % toutes essences confondues), et l'élément le plus variable est le sodium (CV = 81 % toutes essences confondues). Le classement des autres éléments entre ces deux extrêmes est légèrement différent de celui obtenu avec les teneurs foliaires. Par ordre croissant de variabilité on obtient, toutes essences confondues: N = P < S < Mg < K < Ca. Toutes essences confondues, les micronutriments sont plus variables entre arbres que les macronutriments (CV respectivement 30 % et 47 %). Les micronutriments se classent selon l'ordre de variabilité intraplacette croissant : Cl = Zn < Mn < Fe < Al < Cu < Na.

Globalement, la variabilité intraplacette estimée à partir de la minéralomasse^{100f (1000a)} est supérieure à celle obtenue à partir des teneurs foliaires (CV respectivement 38 % et 26 %). Cet écart tient au fait que l'estimation de la minéralomasse^{100f (1000a)} intègre les erreurs liées à l'analyse chimique et au poids de 100 feuilles ou 1000 aiguilles, alors que les teneurs n'intègrent pas les erreurs liées à la mesure du poids de 100 feuilles ou 1000 aiguilles.

5.2. Variabilité interplacette et interannuelle

5.2.1. Coefficients de variation interplacette et interannuel

Pour la plupart des éléments analysés, les teneurs foliaires sont très variables d'une année sur l'autre et d'un peuplement à l'autre pour une même essence. Dans le cadre du suivi à long terme de la nutrition minérale des peuplements du réseau RENECOFOR, ces variations interannuelle et interplacette constituent un bruit de fond et doivent être quantifiées pour pouvoir mettre en évidence et expliquer d'éventuelles évolutions significatives du contenu foliaire conséquentes aux changements environnementaux à moyen et long terme (Duquesnay, 1998).

La variabilité interannuelle d'un élément donné a été estimée pour chaque placette en calculant le coefficient de variation des 5 valeurs mesurées de 1993 à 1997 (rapport de l'écart-type sur la moyenne exprimé en pourcentage). La variabilité interannuelle moyenne d'une essence est estimée par la moyenne des coefficients de variation interannuelle des placettes appartenant à cette essence (Tableau 18, p.75).

La variabilité interplacette est estimée par le coefficient de variation des teneurs foliaires entre placettes d'une même essence pour chaque année séparément. La variabilité interplacette moyenne de chaque essence est estimée par la moyenne sur les cinq ans de ces coefficients de variation interplacette. Le nombre de placettes de mélèze, de pin laricio et de peuplements mélangés de chêne sessile et pédonculé étant inférieur ou égal à deux, la variabilité interplacette pour ces essences n'a pas été étudiée.

Les variations interannuelle et interplacette moyennes, minimum et maximum des teneurs foliaires sont présentées par essence et par élément chimique en annexe (**Tableau A 13**, p.176). Les coefficients de variation interannuel minimum et maximum sont ceux des placettes caractérisées par la variabilité interannuelle la plus faible et la plus élevée pour une essence et un élément donné. Les coefficients de variation interplacette minimum et maximum correspondent aux années où la variabilité interplacette pour une essence et un élément donné est la plus faible et, respectivement, la plus forte.

Tableau 18: Exemple de calcul des coefficients de variation interannuelle (CVa) et interplacette (CVp) de la teneur en azote (en mg.g⁻¹) des 6 peuplements de douglas du réseau et des coefficients moyens pour l'espèce.

Table 18: Estimation of the inter-annual (Cva) and inter-plot (CVp) coefficients of variation of the foliar nitrogen concentration for the 6 Douglas-fir plots in the RENECOFOR network and estimation of the average coefficients of variation.

	1993	1994	1995	1996	1997	CVa
DOU 23	22,40	21,90	21,30	19,10	18,11	9,06
DOU 34	17,40	16,70	16,60	16,40	15,55	4,02
DOU 61	17,00	16,70	16,60	17,30	15,94	3,05
DOU 65	16,98	15,70	17,20	17,80	18,88	6,72
DOU 69	16,24	16,30	16,80	15,60	15,98	2,73
DOU 71	20,12	19,00	18,40	16,70	16,68	8,21
						Variation interannuelle 5,63 = moyenne des 6 CVa
CVp	13,03	13,19	10,30	7,10	7,96	Variation interplacette 10,32 = moyenne des 5 CVp

Coefficient de variation interplacette

Le poids moyen de 100 feuilles ou 1000 aiguilles varie de 13 à 24 % entre placettes selon les essences. La variabilité interplacette la plus faible est celle du douglas, et la plus élevée celle du pin sylvestre. Les placettes de hêtre sont caractérisées par une variabilité assez importante (18 %). Cette variabilité entre placettes est plus ou moins importante selon les années et peut varier du simple au double. C'est le cas des placettes d'épicéa, de chêne pédonculé, de hêtre et de pin maritime (**Tableau A 13**, p.176).

Le soufre est l'élément dont la teneur varie le moins entre placettes pour l'ensemble des essences. Le coefficient de variation moyen des teneurs de soufre pour les 5 années de suivi est compris entre 6 et 14 % selon les essences. Les placettes de pin maritime et de pin sylvestre ont les coefficients de variation les plus élevés.

Dans un ordre croissant de variabilité entre placettes viennent ensuite l'azote (entre 7 et 20 %), le phosphore (entre 8 et 20 %), le potassium (entre 12 et 19 %), puis le magnésium (entre 14 et 28 %) et le calcium (entre 14 et 51 %). La variabilité de la teneur foliaire en phosphore entre les placettes de douglas est particulièrement faible (8 %). La variabilité entre placettes des teneurs foliaires en calcium dépend fortement de la variabilité des types de sols pour l'essence considérée.

Les teneurs en micronutriments sont beaucoup plus variables entre placettes que celles des macronutriments, sauf pour le zinc (12 à 28 %), et dépendent beaucoup plus des essences. Ce sont les teneurs foliaires en sodium qui varient le plus entre placettes d'une même essence (64 à 111 % selon les essences) et également entre années (voir CV minimum et maximum).

Les teneurs en chlore, en fer et en cuivre ont le même niveau de variation (13 à 40 %) excepté dans le cas du hêtre qui présente une très grande variabilité interplacette de la teneur en chlore (94 %). Pour l'aluminium et le manganèse le degré de variabilité des teneurs foliaires entre placettes dépend fortement des essences. Le coefficient de variation du manganèse est particulièrement élevé dans le cas du sapin pectiné et du hêtre, et celui de l'aluminium dans le cas des placettes d'épicéa. L'analyse des micronutriments (présents en faible teneur) est plus difficile que celle des macronutriments. La reproductibilité des mesures est plus faible, et par conséquent, la variabilité entre mesures est plus importante et interfère avec la variabilité entre années et entre placettes.

En conclusion, comparées aux placettes de chênes sessile et pédonculé, les placettes de hêtre présentent une plus grande variabilité des teneurs foliaires en manganèse, chlore, sodium et calcium. Les teneurs foliaires en calcium sont également très variables pour les placettes d'épicéa. Les teneurs foliaires en soufre et en azote des placettes de pin sylvestre et de pin maritime sont beaucoup plus variables que pour les autres essences. Par contre, dans les placettes de pin maritime les teneurs en calcium et en sodium ont des niveaux de variabilité relativement faibles comparés aux autres essences. Toujours dans le cas du pin maritime, les deux éléments les plus variables entre placettes sont l'aluminium et le manganèse (CV respectifs : 60 et 90 %).

Minéralomasses^{100f(1000a)}

Les minéralomasses^{100f(1000a)} (poids secs de nutriments dans 100 feuilles ou 1000 aiguilles) sont plus variables entre placettes qu'entre années pour la plupart des éléments et des essences (**Tableau A 12**, p.174).

Les espèces caractérisées par de fortes variations des minéralomasses^{100f(1000a)} entre placettes sont également caractérisées par de fortes variations des teneurs entre placettes (**Tableau A 12** et **Tableau A 13**, pp.174-176) sauf pour le phosphore, le potassium et le chlore. Les coefficients de variation des minéralomasses^{100f(1000a)} sont d'une manière générale supérieurs à ceux des teneurs.

Dans le cas du phosphore, la variation interplacette de la minéralomasse^{100f(1000a)} est plus importante chez le pin sylvestre et le sapin pectiné alors que la variation des teneurs est plus importante chez le hêtre et relativement faible chez le pin sylvestre.

Dans le cas du potassium et du chlore, la variation interplacette de la minéralomasse^{1000a} est plus importante chez le pin sylvestre alors que la variation des teneurs ne l'est pas. Ces différences sont dues dans le cas du pin sylvestre à une grande variation de la masse foliaire^{1000a} entre peuplements qui entraîne une plus grande variabilité de la minéralomasse^{1000a} du phosphore, du potassium et du chlore.

Coefficient de variation interannuelle

Le nombre de placettes de mélèze, de pin laricio et de placettes composées du mélange chêne sessile/chêne pédonculé est trop faible pour pouvoir comparer la variabilité interannuelle moyenne de leurs teneurs foliaires à celle des autres essences. Leur cas est donc traité à part.

Essences représentées par plus de 5 placettes: *CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP*

Le poids moyen de 100 feuilles ou 1000 aiguilles varie de 9 à 17 % entre années selon les essences, mais pour une essence donnée le degré de variabilité interannuelle diffère fortement selon les placettes surtout dans le cas des chênes et du hêtre (voir les valeurs du CV minimum et maximum en annexe, **Tableau A 13**, p.176).

La plus faible variabilité interannuelle s'observe dans les placettes de pin maritime et la plus forte dans les placettes de sapin pectiné.

Les teneurs en azote et en phosphore varient relativement peu d'une année sur l'autre (5 à 10 %) par rapport à celles des autres éléments. Leur niveau de variabilité est inférieur à celui de la biomasse foliaire^{100f (1000a)}. C'est dans les placettes de pin maritime et de pin sylvestre que la variabilité de la teneur foliaire en azote est la plus forte (respectivement 10 et 7 %), dans les placettes de hêtre pour le phosphore, dans les placettes de pin maritime pour le soufre et dans les placettes d'épicéa et de sapin pectiné pour le calcium. Pour une essence donnée, la variabilité interannuelle des teneurs foliaires en macroéléments diffère également beaucoup entre placettes comme l'indique la gamme étendue des coefficients de variation définie par "Min-Max" (**Tableau A 13**, p.176).

Dans un ordre croissant de variabilité interannuelle après l'azote on trouve le soufre (5 à 15 %), le potassium (8 à 12 %), le magnésium (9 à 15 %) et le calcium (9 à 18 %).

Les teneurs foliaires en microéléments sont plus variables d'une année sur l'autre que celles des macroéléments. L'élément dont la teneur foliaire varie le plus est le sodium (variation maximale pour le sapin pectiné) et ceux dont la teneur varie le moins sont le manganèse et le zinc. La variation interannuelle de la teneur foliaire en sodium diffère aussi beaucoup selon les placettes.

Dans les placettes de hêtre et de douglas, la teneur en chlore est presque aussi variable que celle du sodium (élément le plus variable parmi les éléments analysés). Dans les placettes d'épicéa et de pin maritime le soufre et le calcium ont un niveau de variabilité interannuelle élevé (respectivement 13 et 15 % pour S et 18 et 12 % pour Ca) par rapport aux autres essences. La teneur foliaire en calcium est également très variable dans les placettes de sapin pectiné (17 %). Par contre, la variabilité interannuelle de la teneur foliaire en sodium est relativement faible (27 %) dans les placettes de pin maritime.

Globalement, la variabilité interplacette est supérieure à la variabilité interannuelle pour tous les éléments et quelles que soient les essences. Cette différence est cependant moins marquée pour le chlore et pour le fer.

Mélèze, chêne pédonculé/chêne sessile et pin laricio:

La variabilité interannuelle de la masse foliaire^{1000a} dans la placette de mélèze (CV = 85 %) est beaucoup plus élevée que celle des autres essences. Le poids sec de 1000 aiguilles varie de 0,11g en 1997 à 2,5g en 1994. En 1996, le peuplement a subi une attaque de la tordeuse du mélèze et les houppiers avaient fortement jauni, ce qui pourrait expliquer la diminution des dimensions ou de la masse foliaire^{1000a}.

La variabilité interannuelle du poids de 100 feuilles est plus importante dans les deux placettes de chênes mélangés que dans les placettes de chênes pures.

La placette de mélèze est caractérisée par une variabilité interannuelle élevée des teneurs en macroéléments, excepté pour le soufre et le calcium. La teneur foliaire en sodium est également très variable d'une année à l'autre (123 %). La teneur en chlore a par contre le plus bas niveau de variation interannuelle (9 %).

La variabilité interannuelle de la teneur foliaire en azote est particulièrement faible dans les deux placettes de mélange chêne sessile/chêne pédonculé. Elles sont par contre caractérisées par une variabilité élevée de la teneur en manganèse et en cuivre par rapport aux autres essences.

Les deux placettes de pin laricio sont caractérisées par une variabilité élevée de la teneur en soufre, en fer et en cuivre.

5.2.2. Analyse de variance à deux facteurs "année" et "placette"

L'effet de l'année d'échantillonnage (1993 à 1997) et l'effet de la placette (n = 6 à 20 selon les essences) ont été testés à l'aide d'analyses de variance à deux facteurs pour les 13 nutriments foliaires analysés, pour 9 rapports entre nutriments, et pour les essences avec un nombre de placette au moins égal à 6. L'interaction entre ces deux facteurs n'a pas été étudiée car pour chaque niveau i du facteur "placette" et chaque niveau j du facteur "année" une seule valeur est disponible sur ce jeu de données. Le modèle utilisé est de la forme:

$$y_{ij} = \mu + g_i + h_j + e_{ij}$$

avec: y_{ij} est la teneur foliaire moyenne d'un nutriment donné pour une placette i et une année j
 μ est la teneur foliaire moyenne
 g_i est l'effet "placette"
 h_j est l'effet "année"
 e_{ij} est l'effet résiduel pour la placette i et l'année j

L'effet de l'année d'échantillonnage et l'effet lié à la placette sont significatifs pour la plupart des éléments, des rapports entre éléments et des essences à l'exception du douglas (effet "année" significatif uniquement pour Ca, Cl, Fe, Cu et Zn), du pin maritime (effet "année" significatif uniquement pour N, S, Na, Cl, Al, et Cu), et quelque cas ponctuels (**Tableau 19** et **Tableau 20** pp.79 -81). Ces effets sont souvent hautement significatifs. La placette et l'année d'échantillonnage permettent d'expliquer entre 48 % (le soufre pour le chêne sessile) et 93 % (le manganèse pour le chêne sessile) de la variance des concentrations nutriments foliaires selon les essences et les nutriments.

L'effet lié à la placette est globalement plus important que celui lié à l'année d'échantillonnage (**Tableau 20**, p.81). Cela est particulièrement évident pour le phosphore, le magnésium, le manganèse et dans une moindre mesure pour l'azote (à l'exception du chêne pédonculé), le potassium (sauf pour le chêne sessile), le calcium (sauf pour le pin sylvestre). Les macroéléments répondent pratiquement tous à ce classement alors que les micronutriments semblent plus partagés selon les essences. Peu de nutriments foliaires présentent un effet "année" supérieur à celui lié à la placette pour l'ensemble des essences du réseau, ce sont: le soufre, le chlore et le cuivre (à l'exception du pin maritime). Au niveau des rapports entre éléments, l'effet "placette" est également le plus souvent supérieur à l'effet "année" sauf dans le cas du rapport S/N pour lequel c'est l'inverse (à l'exception du douglas).

Tableau 19: Résultats des analyses de variance à deux facteurs (effet "année": de 1993 à 1997 et effet "placette": de 6 à 20 placettes selon les essences) pour les essences du réseau RENECOFOR dont le nombre de placettes est supérieur à 5. Les valeurs de F sont présentées ainsi que le pourcentage de variance expliqué r^2 . Seuils de signification: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Table 19: Results of two-way analysis of variance (year: 1993 to 1997 and plot: $n=6$ to 20) for the species in the RENECOFOR network (at least 5 plots for each species). Significance: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

	Chêne pédonculé			Chêne sessile			Hêtre			Douglas		
	F "Année"	F "Placette"	r^2	F "Année"	F "Placette"	r^2	F "Année"	F "Placette"	r^2	F "Année"	F "Placette"	r^2
Macronutriments												
N	10,96 ***	6,00 ***	0,74	7,57 ***	7,19 ***	0,69	11,90 ***	11,27 ***	0,77	1,77 NS	11,19 ***	0,76
P	5,69 **	36,43 ***	0,91	11,96 ***	31,51 ***	0,90	2,17 NS	9,82 ***	0,72	0,62 NS	5,03 **	0,58
S	0,65 NS	1,77 NS	0,34	3,32 *	2,95 ***	0,48	7,08 ***	3,13 ***	0,54	2,30 NS	1,11 NS	0,42
K	6,34 ***	10,25 ***	0,77	27,26 ***	11,60 ***	0,82	8,75 ***	15,36 ***	0,81	0,53 NS	6,81 ***	0,64
Ca	6,71 ***	23,38 ***	0,87	23,62 ***	28,44 ***	0,89	8,26 ***	36,00 ***	0,90	3,63 *	31,65 ***	0,90
Mg	4,66 **	6,79 ***	0,70	4,16 **	9,50 ***	0,72	5,49 ***	10,66 ***	0,75	1,97 NS	5,21 **	0,63
Micronutriments												
Na	6,98 ***	9,49 ***	0,76	13,60 ***	5,31 ***	0,68	3,72 **	23,02 ***	0,86	1,20 NS	0,93 NS	0,32
Cl	6,13 ***	3,91 **	0,64	13,25 ***	3,31 ***	0,61	9,43 ***	12,13 ***	0,78	13,27 ***	3,13 *	0,77
Al	9,48 ***	6,39 ***	0,74	24,79 ***	4,76 ***	0,72	21,05 ***	8,86 ***	0,77	1,75 NS	3,69 *	0,56
Fe	9,35 ***	11,39 ***	0,80	10,16 ***	3,50 ***	0,59	33,09 ***	6,74 ***	0,77	7,40 ***	11,19 ***	0,81
Mn	6,56 ***	33,81 ***	0,90	27,11 ***	44,20 ***	0,93	3,54 *	32,82 ***	0,89	1,80 NS	25,08 ***	0,87
Cu	1,95 NS	0,87 NS	0,32	1,70 NS	1,02 NS	0,26	6,03 ***	1,33 NS	0,39	3,68 *	1,01 NS	0,50
Zn	7,57 ***	3,27 **	0,64	42,47 ***	2,56 **	0,75	28,45 ***	9,24 ***	0,79	4,47 **	12,02 ***	0,80
Rapports												
N/P	20,24 ***	59,45 ***	0,95	39,84 ***	51,73 ***	0,94	9,00 ***	25,83 ***	0,87	2,59 NS	27,15 ***	0,88
S/N	11,70 ***	2,89 *	0,69	14,92 ***	3,53 ***	0,63	11,58 ***	1,72 NS	0,51	2,83 NS	5,07 **	0,65
N/K	17,35 ***	13,33 ***	0,85	64,49 ***	21,14 ***	0,90	22,99 ***	21,38 ***	0,87	1,58 NS	9,84 ***	0,74
N/Mg	12,96 ***	8,13 ***	0,79	14,30 ***	16,98 ***	0,83	5,10 *	15,69 ***	0,81	2,96 *	10,11 ***	0,76
N/Ca	7,52 ***	20,53 ***	0,86	13,13 ***	31,98 ***	0,90	5,48 ***	27,84 ***	0,88	2,90 *	30,45 ***	0,89
K/Ca	4,10 **	6,79 ***	0,69	40,32 ***	18,18 ***	0,87	4,87 **	25,10 ***	0,87	2,93 *	17,00 ***	0,83
K/Mg	14,16 ***	18,73 ***	0,87	10,72 ***	14,04 ***	0,80	3,12 *	15,06 ***	0,80	3,01 *	3,88 *	0,61
Ca/Mg	1,39 NS	11,64 ***	0,76	13,13 ***	14,85 ***	0,82	0,87 NS	18,82 ***	0,83	2,74 NS	51,91 ***	0,93
Fe/Mn	1,41 NS	17,39 ***	0,82	1,42 NS	14,36 ***	0,79	1,12 NS	36,07 ***	0,90	1,28 NS	44,73 ***	0,92

Tableau 19 : (suite)

	Epicéa			Pin maritime			Pin sylvestre			Sapin		
	F "Année"	F "Placette"	r ²	F "Année"	F "Placette"	r ²	F "Année"	F "Placette"	r ²	F "Année"	F "Placette"	r ²
Macronutriments												
N	1,88 NS	15,77 ***	0,81	4,27 **	19,51 ***	0,85	13,08 ***	19,31 ***	0,85	4,99 **	5,36 ***	0,64
P	2,42 NS	21,99 ***	0,85	1,61 NS	13,95 ***	0,79	22,22 ***	19,48 ***	0,87	4,10 **	31,20 ***	0,89
S	54,81 ***	4,71 ***	0,87	13,65 ***	2,75 *	0,75	30,76 ***	19,41 ***	0,88	23,73 ***	1,51 NS	0,74
K	12,26 ***	24,83 ***	0,88	0,99 NS	7,17 ***	0,66	12,35 ***	13,63 ***	0,81	2,74 *	10,79 ***	0,75
Ca	5,33 **	39,13 ***	0,91	2,47 NS	3,67 *	0,57	31,77 ***	20,77 ***	0,88	2,24 NS	6,90 ***	0,67
Mg	7,85 ***	14,07 ***	0,81	2,24 NS	4,56 **	0,60	21,30 ***	35,84 ***	0,91	6,00 ***	19,90 ***	0,85
Micronutriments												
Na	7,59 ***	2,38 *	0,58	5,25 **	16,26 ***	0,83	3,08 *	7,57 ***	0,68	7,49 ***	1,63 NS	0,55
Cl	8,22 ***	2,62 *	0,60	3,95 *	2,26 NS	0,55	6,55 ***	6,98 ***	0,69	14,86 ***	3,18 **	0,70
Al	2,01 NS	9,39 ***	0,72	3,00 *	23,55 ***	0,86	3,44 *	5,44 ***	0,62	10,03 ***	19,30 ***	0,86
Fe	2,88 *	2,96 **	0,51	1,54 NS	2,66 *	0,48	8,13 ***	3,11 **	0,58	7,66 ***	1,05 NS	0,51
Mn	8,66 ***	33,38 ***	0,90	1,72 NS	34,10 ***	0,90	15,56 ***	55,46 ***	0,94	2,22 NS	57,39 ***	0,94
Cu	0,46 NS	0,72 NS	0,18	4,35 **	7,54 ***	0,72	7,31 ***	4,35 ***	0,62	37,24 ***	2,98 **	0,83
Zn	1,56 NS	9,92 ***	0,72	1,87 NS	2,41 NS	0,48	28,73 ***	11,23 ***	0,83	1,28 NS	2,71 *	0,45
Rapports												
N/P	4,94 **	22,42 ***	0,86	2,74 NS	44,54 ***	0,92	4,05 **	73,20 ***	0,95	1,06 NS	19,76 ***	0,84
S/N	132,88 ***	13,01 ***	0,94	27,49 ***	17,63 ***	0,90	44,97 ***	9,03 ***	0,85	37,05 ***	3,92 ***	0,83
N/K	14,88 ***	33,59 ***	0,91	4,21 ***	9,97 ***	0,76	0,56 NS	21,75 ***	0,85	6,84 ***	14,73 ***	0,82
N/Mg	8,07 ***	28,28 ***	0,89	4,22 **	31,20 ***	0,89	9,33 ***	58,14 ***	0,94	5,91 ***	41,43 ***	0,92
N/Ca	6,18 ***	29,39 ***	0,89	1,53 NS	11,84 ***	0,76	22,92 ***	39,48 ***	0,92	3,76 *	12,69 ***	0,78
K/Ca	8,25 ***	23,40 ***	0,87	3,30 *	8,94 ***	0,74	11,15 ***	19,00 ***	0,85	4,64 **	9,79 ***	0,75
K/Mg	8,72 ***	16,04 ***	0,83	2,88 *	3,67 **	0,58	4,36 **	23,37 ***	0,86	7,25 ***	41,12 ***	0,92
Ca/Mg	4,02 **	35,85 ***	0,90	2,66 NS	8,66 ***	0,72	9,69 ***	23,60 ***	0,87	0,75 NS	7,25 ***	0,66
Fe/Mn	0,53 NS	5,90 ***	0,60	1,10 NS	13,92 ***	0,79	5,40 ***	27,87 ***	0,88	4,27 **	14,74 ***	0,81

Tableau 20: Pour chaque essence du réseau RENECOFOR, comparaison des effets "placette" et "année" pour les macronutriments, les micronutriments et certains rapports entre éléments à partir des valeurs "F" des analyses de variances présentées dans le **Tableau 19**.

Table 20: For each species in the RENECOFOR network, comparison of the plot and the year- effects for the macro-, the micronutrients and some ratios between nutrients, (see also Table 19).

	Importance relative des effets "placette" et "année"		
	Effet "placette" > Effet "année"	Effet "placette" ≈ Effet "année"	Effet "placette" < Effet "année"
Macroéléments			
N	DOU, EPC, PM, PS	CHS, HET, SP	CHP
P	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, SP	PS	
S		CHS	HET, EPC, PM, PS, SP
K	CHP, HET, DOU, EPC, PM, SP	PS	CHS
Ca	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, SP		PS
Mg	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		
Microéléments			
Na	CHP, HET, PM, PS		CHS, EPC, SP
Cl		HET, PM, PS	CHP, CHS, DOU, EPC, SP
Al	DOU, EPC, PM, SP	PS	CHP, CHS, HET
Fe	DOU, PM	CHP, EPC	CHS, HET, PS, SP
Mn	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		
Cu	PM		HET, DOU, PS, SP
Zn	DOU, EPC, SP		CHP, CHS, HET, PS
Rapports			
N/P	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		
S/N	DOU		CHP, CHS, HET, EPC, PM, PS, SP
N/K	DOU, EPC, PM, PS, SP	HET	CHP, CHS
N/Mg	HET, DOU, EPC, PM, PS, SP	CHS	CHP
N/Ca	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		
K/Ca	CHP, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		CHS
K/Mg	CHP, CHS, HET, EPC, PM, PS, SP	DOU	
Ca/Mg	CHP, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP	CHS	
Fe/Mn	CHP, CHS, HET, DOU, EPC, PM, PS, SP		

5.3. Quel effectif d'arbres par placette pour quelle précision?

5.3.1. Nombre d'arbres par placette

Les données individuelles par arbre (n=8 par placette) des analyses foliaires réalisées en 1997 sur l'ensemble des 102 placettes ont permis d'estimer *a posteriori* le nombre d'arbres nécessaire par placette pour obtenir une erreur relative (d_r) donnée à un risque de 1^{ère} espèce α fixé. Cette question est étroitement liée à la notion d'intervalle de confiance, puisque la longueur d'un tel intervalle est directement fonction de l'effectif considéré (Dagnelie, 1975).

Le calcul du nombre d'arbres (n) par placette pour chaque essence et chaque élément foliaire en fixant trois valeurs pour α : 5 %, 10 % et 20 %, et trois valeurs pour l'erreur relative acceptée d_r : 5 %, 10 % et 20 % est présenté en **annexe 13**. Les effectifs sont arrondis à l'entier supérieur.

Le nombre d'arbres nécessaire par placette pour obtenir une erreur relative minimale (5 %) au seuil de confiance $1-\alpha = 95$ % est très variable selon les éléments et les essences (**Tableau A 16**, p.183). Dans ces conditions, l'estimation de la masse foliaire^{100f (1000a)} nécessite entre 61 arbres pour le pin maritime et 169 arbres pour le chêne pédonculé. L'azote, le phosphore, et le soufre se comportent de manière très proche, ces éléments demandent entre une vingtaine et une cinquantaine d'arbres par placette selon les essences. Le potassium foliaire est plus variable, il nécessite entre 37 arbres dans

le cas du mélèze, et 95 arbres pour le pin maritime pour atteindre l'erreur relative de 5 % sur la moyenne. Une bonne précision sur les microéléments est beaucoup plus difficile à obtenir. Il faut en effet de l'ordre de quelques centaines d'arbres par placette pour atteindre une précision de 5 %. L'extrême est atteint pour le sodium avec 5835 arbres nécessaires dans le cas du douglas.

Si l'on accepte une erreur relative de 10 %, et un seuil de confiance de 95 %, le nombre d'arbres nécessaire par placette est de l'ordre de 5 à 10 pour l'azote, et entre 5 et 30 pour les autres macronutriments (P, S, K, Ca, et Mg). Des ordres de grandeur comparables sont rapportés par Snowdon & Waring (1982) dans une étude sur *Pinus radiata*. Ces auteurs indiquent un effectif de 18 arbres ou plus par placette pour conserver un intervalle de confiance d'environ ± 10 %. Par contre, les micronutriments analysés pour le réseau RENECOFOR nécessitent dans les mêmes conditions de l'ordre de 50 arbres par placette, excepté dans le cas du sodium et du cuivre pour lesquels le nombre peut largement dépasser la centaine selon les essences.

5.3.2. Classement des nutriments selon les effectifs nécessaires par placette

Les nutriments foliaires ont été classés selon le nombre d'arbres nécessaire par placette pour atteindre une précision donnée (**Tableau 21**). Ce classement est valide pour un risque de première espèce $\alpha = 5$ %, et une précision $P = 5$ %. Les deux éléments extrêmes du classement sont commun à une bonne partie des essences analysées. L'azote et le phosphore nécessitent le moins d'arbres par placette (rang 1, n entre 13 et 35 arbres), tandis que le sodium, et dans une moindre mesure le cuivre exigent des effectifs extrêmement élevés pour atteindre une précision de 5 % (rang 13, n entre 312 et 5835 arbres). Parmi les macronutriments, trois groupes peuvent être distingués. Le premier est constitué par l'azote, le phosphore, le potassium, et le soufre. Ces éléments se retrouvent toujours entre les rangs 1 et 5 (sauf dans le cas du phosphore chez le mélèze, mais pour cette essence l'unique placette limite la validité de l'estimation de la variabilité intraplacette). Le deuxième groupe est représenté par le magnésium qui peut se retrouver en 7^{ème} position chez le hêtre et le mélange chêne pédonculé/sessile. Le troisième groupe est représenté par le calcium qui peut se retrouver en 9^e et 10^e position chez le pin laricio et le mélèze. Parmi les micronutriments, trois éléments peuvent selon les essences se retrouver en 4^e ou 5^e rang: le fer pour le hêtre, le cuivre pour l'épicéa, le zinc pour les pins maritime et sylvestre.

Tableau 21: Classement des nutriments (rangs 1 à 13) par ordre d'effectif (n) croissant d'arbres nécessaire par placette pour atteindre une précision $P = 5$ % à un risque $\alpha = 5$ % pour chaque essence du réseau RENECOFOR (cf. Tableau A 13, p.176).

Table 21: Ascending order of the nutrients (rankes 1 to 13) by number of trees per plot (n) required to achieve an accuracy of 5 % at a risk $\alpha = 5$ % for each species in the RENECOFOR network

Essences	Rangs (Effectifs)												
	1 (n)	2 (n)	3 (n)	4 (n)	5 (n)	6 (n)	7 (n)	8 (n)	9 (n)	10 (n)	11 (n)	12 (n)	13 (n)
Chêne pédonculé	S (41)	N (43)	P (52)	K (75)	Mg (99)	Ca (102)	Al (108)	Fe (125)	Cl (187)	Mn (192)	Zn (192)	Cu (555)	Na (664)
Chêne sessile	N (18)	S (23)	P (43)	K (57)	Mg (82)	Ca (93)	Zn (137)	Mn (151)	Cl (168)	Al (198)	Fe (228)	Cu (424)	Na (521)
Chêne sessile/pédonculé	P (35)	S (42)	K (47)	N (52)	Ca (110)	Fe (120)	Mg (131)	Mn (157)	Zn (185)	Cl (208)	Al (285)	Na (748)	Cu (1468)
Hêtre	N (13)	S (17)	P (28)	Fe (38)	K (60)	Ca (80)	Mg (134)	Zn (149)	Al (161)	Cl (174)	Cu (185)	Mn (223)	Na (513)
Douglas	N (15)	P (21)	S (38)	Mg (53)	K (75)	Fe (77)	Ca (127)	Zn (151)	Al (153)	Cl (175)	Mn (279)	Cu (335)	Na (5835)
Epicéa	N (16)	S (18)	P (35)	K (73)	Cu (81)	Mg (102)	Ca (112)	Fe (137)	Zn (174)	Cl (180)	Mn (254)	Al (743)	Na (3467)
Mélèze	N (28)	Mg (31)	Cl (34)	S (36)	K (37)	Zn (54)	P (63)	Mn (89)	Cu (92)	Ca (114)	Na (185)	Al (212)	Fe (644)
Pin laricio	P (25)	N (41)	K (43)	Mg (44)	S (46)	Zn (78)	Al (161)	Mn (202)	Ca (209)	Cl (243)	Fe (312)	Na (1475)	Cu (2169)
Pin maritime	P (26)	S (32)	Mg (40)	N (43)	Zn (73)	Ca (78)	Cu (80)	K (95)	Al (128)	Fe (135)	Cl (199)	Na (266)	Mn (312)
Pin sylvestre	N (16)	P (20)	S (36)	K (45)	Zn (63)	Mg (70)	Cl (76)	Ca (111)	Mn (142)	Al (168)	Cu (226)	Fe (235)	Na (1091)
Sapin pectiné	N (28)	S (36)	P (48)	K (63)	Ca (75)	Mg (83)	Zn (84)	Cl (155)	Mn (194)	Al (248)	Cu (436)	Fe (443)	Na (1018)

Le classement obtenu pour le hêtre concorde étroitement avec celui établi par Duquesnay (1998) dans son étude sur les hêtraies du nord-est de la France portant sur des analyses réalisées en 1971 et 1996.

5.3.3. Précision des moyennes des teneurs foliaires à l'échelle de la placette

A partir du calcul des effectifs d'arbres nécessaires par placette pour atteindre une précision P , et un seuil de confiance $\alpha = 5 \%$, il est intéressant de situer la précision des moyennes obtenues à partir de l'intensité d'échantillonnage réellement appliquée (8 arbres par placette).

L'erreur relative sur les teneurs moyennes en nutriments à l'échelle de la placette est surtout fonction de l'élément considéré et dans une moindre mesure de l'essence (**Tableau 22**, p.84). Pour l'azote, le phosphore et le soufre, elle est comprise entre 5 et 10 % ou entre 10 et 20 % selon les essences. La masse foliaire^{100f (1000a)}, le potassium, le calcium, et le magnésium présentent une erreur relative globalement du même ordre de grandeur comprise entre 10 et 20 % pour l'ensemble des essences. Les microéléments présentent l'erreur relative la plus importante, généralement supérieure à 20 %, sauf dans quelques cas. Ainsi, la valeur moyenne du zinc dans les aiguilles de mélèze, des pins, et du sapin pectiné est déterminée avec une erreur relative comprise entre 10 et 20 % seulement.

L'estimation de cette erreur relative est également susceptible de varier selon les années. D'après les résultats présentés par Duquesnay (1998) et portant sur les hêtraies du nord-est de la France il semble que pour un élément donné, la précision reste proche entre deux années différentes (dans ce cas entre 1971 et 1996). Les prochaines analyses individuelles prévues en 2001 ou 2003 pour le réseau RENECOFOR permettront de préciser ces résultats.

Ces calculs d'effectifs théoriques d'arbres par placette sont basés sur la variabilité intraplacette moyenne pour l'ensemble des placettes de chaque essence dans le réseau RENECOFOR. Or cette variabilité intraplacette peut être sensiblement différente d'une placette à l'autre. On observe par exemple dans le cas du chêne sessile que le coefficient de variation intraplacette pour l'azote peut aller de 5,4 % dans la placette CHS 86 jusqu'à 16,1 % dans la placette CHS 10. Cette variation se répercute directement sur les effectifs théoriques que l'on peut calculer pour chaque placette, et sur la précision atteinte lorsque 8 arbres par placette sont échantillonnés.

Un exemple de l'effet de cette variation sur les effectifs théoriques placette par placette est présenté pour l'azote (**Tableau 23**, p.86). A la fin du tableau sont rappelés les effectifs théoriques calculés à partir des coefficients de variation intraplacette moyens. On constate que dans certaines placettes le nombre d'arbre nécessaire est nettement supérieur par rapport à celui calculé à partir du CV moyen. Le nombre maximal d'arbres pour un risque $\alpha = 5 \%$ et une précision $P = 5 \%$ est de 59 pour la placette CHS 10 au lieu de 18 pour les mêmes conditions, mais selon le CV moyen de l'essence.

Cette remarque montre qu'en théorie, il serait plus justifié de se baser sur les effectifs théoriques maximaux pour concevoir une stratégie d'échantillonnage. Cependant, dans la pratique, cette approche est trop contraignante pour être applicable, et le fait de se référer à des effectifs théoriques d'arbres nécessaires par placette calculés à partir des CV moyens permet d'approcher de manière satisfaisante la variabilité intraplacette.

Tableau 22: Ordre de grandeur de l'erreur relative sur la mesure de la masse foliaire^{100f (1000a)} et des teneurs foliaires en nutriments à l'échelle de la placette obtenue avec un effectif de 8 arbres par placette, et un risque de première espèce α de 5 % (Voir également le Tableau A 13, p.174).

Table 22: Relative error (at a risk $\alpha = 5\%$) induced by sampling 8 trees per plot. Indications are given by species and nutrient concentration or dry weight per 100 leaves or 1000 needles (See also Table A13, p.174).

Essences	Erreur relative (%)								
	Masse foliaire ^{100f (1000a)}			Azote			Phosphore		
	5<<10	10<<20	>20	5<<10	10<<20	>20	5<<10	10<<20	>20
Chêne pédonculé			X		X			X	
Chêne sessile			X	X				X	
Chêne sessile/pédonculé			X		X			X	
Hêtre	X			X			X		
Douglas	X			X			X		
Epicéa	X			X				X	
Mélèze			X	X				X	
Pin laricio	X				X		X		
Pin maritime	X				X		X		
Pin sylvestre	X			X			X		
Sapin pectiné			X	X				X	
	Soufre			Potassium			Calcium		
Chêne pédonculé		X			X			X	
Chêne sessile	X				X			X	
Chêne sessile/pédonculé		X			X			X	
Hêtre	X				X			X	
Douglas		X			X			X	
Epicéa	X				X			X	
Mélèze		X			X			X	
Pin laricio		X			X				X
Pin maritime	X				X			X	
Pin sylvestre		X			X			X	
Sapin pectiné		X			X			X	
	Magnésium			Chlore			Aluminium		
Chêne pédonculé		X				X		X	
Chêne sessile		X				X			X
Chêne sessile/pédonculé			X			X			X
Hêtre			X			X			X
Douglas		X				X			X
Epicéa		X				X			X
Mélèze	X				X				X
Pin laricio		X				X			X
Pin maritime		X				X		X	
Pin sylvestre		X			X				X
Sapin pectiné		X				X			X

Tableau 22 : (Suite et fin)

Essences	Erreur relative (%)								
	Fer			Cuivre			Zinc		
	5< <10	10< <20	>20	5< <10	10< <20	>20	5< <10	10< <20	>20
Chêne pédonculé	X					X			X
Chêne sessile			X			X			X
Chêne sessile/pédonculé	X					X			X
Hêtre	X					X			X
Douglas	X					X			X
Epicéa			X		X				X
Mélèze			X		X			X	
Pin laricio			X			X			
Pin maritime			X		X			X	
Pin sylvestre			X			X		X	
Sapin pectiné			X			X		X	
	Sodium			Manganèse					
Chêne pédonculé			X			X			
Chêne sessile			X			X			
Chêne sessile/pédonculé			X			X			
Hêtre			X			X			
Douglas			X			X			
Epicéa			X			X			
Mélèze			X		X				
Pin laricio			X			X			
Pin maritime			X			X			
Pin sylvestre			X			X			
Sapin pectiné			X			X			

5.4. Conclusions

Les sources de variabilité analysées précédemment sont regroupées par élément foliaire et pour chaque essence (**Figure 13**, p.88). Cette figure permet d'apprécier l'ordre de grandeur global des coefficients de variation, l'importance relative des variabilités intraplacette, interplacette, interannuelle, et analytique, la variabilité des teneurs foliaires en macronutriments par rapport à celle des micronutriments, et les différences éventuelles de variabilité entre essences.

Il est important de faire remarquer à ce niveau que le choix initial des placettes a vraisemblablement réduit la variabilité intraplacette et interplacette tandis que la variabilité interannuelle est vraisemblablement moins affectée par le choix des placettes. D'autre part, les variabilités intraplacette, interplacette et analytique sont vraisemblablement bien définies à partir des cinq premières années d'analyses alors que la variabilité interannuelle est certainement appelée à évoluer en fonction du nombre d'année d'analyse pris en compte du fait notamment des conditions climatiques variables. Hippeli et Branse (1992) ont montré par exemple qu'une augmentation de pluviosité et des températures moyennes plus élevées pendant la saison de végétation augmentait les teneurs foliaires en N, P, Ca et Mg chez le pin (in Duquesnay et al., *in press*). Les ordres de grandeur de la variabilité interannuelle évalués à partir de la période 1993-1997 pour le réseau RENECOFOR devront donc être considérés à titre indicatif et nécessiteront des révisions périodiques afin de mettre en évidence le nombre d'année d'analyse nécessaire pour caractériser au mieux cette source de variabilité.

Tableau 23: Exemple de calcul des effectifs théoriques d'arbres pour chaque placette de chêne pour obtenir une précision donnée (P) sur les teneurs foliaires en nutriment à un risque de 1^{ère} espèce (α) fixé. Cet exemple concerne les teneurs foliaires en azote des 19 placettes de chêne sessile (8 arbres par placette) du réseau RENECOFOR.

Table 23: Example of calculation for the theoretical number of trees per plot to achieve a given accuracy (P) at a risk (α). This example is given for foliar nitrogen concentrations in the 19 sessile oak plots (8 trees per plot) in the RENECOFOR network.

Placettes	A R B R E S								CV (%)	Effectifs théoriques		
	(Teneurs foliaires en azote)									$\alpha = 5\%$	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 20\%$
	1	2	3	4	5	6	7	8		P = 5 %	P = 5 %	P = 5 %
CHS 01	20,2	26,7	17,9	25,0	23,6	21,8	23,6	25,1	12,5	36	23	13
CHS 03	26,7	27,0	29,2	29,3	25,6	29,3	28,9	24,5	6,8	11	7	4
CHS 10	19,8	23,7	17,9	27,7	21,1	16,9	21,7	20,2	16,1	59	38	21
CHS 18	29,1	30,4	27,2	29,9	27,2	33,6	35,4	29,7	9,5	21	13	8
CHS 21	24,0	22,8	22,0	25,5	21,1	22,5	24,5	23,0	6,1	9	6	4
CHS 27	32,5	25,4	28,2	25,2	28,6	27,9	24,5	26,0	9,5	21	14	8
CHS 35	25,0	22,2	22,2	25,6	24,3	25,8	21,9	23,8	6,7	10	7	4
CHS 41	27,0	34,5	28,2	33,1	30,4	34,2	31,2	33,0	8,8	18	12	7
CHS 51	26,8	25,0	23,0	24,5	23,9	27,8	26,1	25,1	6,2	9	6	4
CHS 57a	26,0	25,5	25,3	26,3	25,0	24,5	21,7	24,2	5,8	8	5	3
CHS 57b	22,2	20,3	21,2	23,4	24,0	21,0	21,3	22,8	5,9	8	5	3
CHS 58	25,1	21,9	20,2	24,7	24,2	23,7	24,1	19,6	9,2	19	13	7
CHS 60	28,0	32,1	26,5	22,4	22,7	25,3	31,1	29,4	13,3	40	26	15
CHS 61	26,2	25,8	24,6	23,6	28,3	28,5	26,1	24,0	7,0	12	8	4
CHS 68	29,9	27,8	27,6	31,4	30,8	28,5	33,3	32,5	7,1	12	8	5
CHS 72	27,1	23,9	19,5	24,2	21,6	19,9	22,8	16,9	14,6	48	31	18
CHS 81	20,4	19,4	18,0	18,9	18,0	20,5	20,9	19,1	5,8	8	5	3
CHS 86	21,1	23,7	22,1	22,2	20,0	21,3	20,4	21,8	5,4	7	5	3
CHS 88	24,5	26,5	21,4	24,8	25,6	25,6	23,8	30,8	10,6	25	16	9
Moyennes:									8,8	18	12	7

5.4.1. Ordres de grandeur et importance relative des différentes sources de variation

Dans son ensemble, la variabilité due (1) aux arbres d'une même placette, (2) aux différentes placettes d'une même essence, et (3) aux différences interannuelles est comprise en moyenne entre 10 et 35 %, exception faite pour la variabilité de la teneur foliaire en sodium qui est globalement de 80 % (**Figure 13**, p.88). Ce dernier élément doit être considéré à part étant donné les difficultés liées à son dosage; la variabilité due à l'analyse atteint 70 % ce qui ne permet pas actuellement de mettre en évidence l'effet d'autres facteurs sur les teneurs en cet élément. Pour les autres éléments, la variabilité liée aux dosages est en moyenne beaucoup plus faible que celle liée aux arbres, aux placettes ou à l'année d'échantillonnage, elle est de l'ordre de 5 % (cf. **Figure 5**, p.32 et **Figure 6**, p.34).

Le coefficient de variation de la masse foliaire^{100f (1000a)} se situe pour les trois premières sources de variabilité autour de 20 %. Seul le coefficient de variation interannuel du mélèze est beaucoup plus élevé (85 %). Cette variabilité doit être considérée avec précaution car elle reflète les variations interannuelles d'une seule placette. L'attaque généralisée de la tordeuse du mélèze provoquant un jaunissement important des aiguilles en 1996 et des houppiers très clairs l'année suivante a entraîné des variations très importantes de la masse foliaire^{100f (1000a)} (2,5 g en 1994, et 0,11 g en 1997).

Toujours pour les mêmes sources de variabilité, trois groupes de nutriments foliaires ressortent par ordre de variabilité croissant. Le premier groupe constitué par l'azote, le phosphore, et le soufre présente un CV moyen proche de 10 %. Le deuxième comprend le potassium, le magnésium, le calcium, le zinc, et le fer avec un CV compris entre 15 et 20 %. Le dernier groupe comprend le chlore, l'aluminium, le manganèse, et le cuivre, la variation pour ces éléments était comprise entre 30 et 35 %.

L'importance relative des variabilités intraplacette, interplacette, et interannuelle dépend fortement des éléments foliaires et dans une moindre mesure des essences. On observe ainsi dans le cas des macronutriments (sauf pour le soufre), la masse foliaire^{100f (1000a)}, le manganèse et le zinc que la variabilité interannuelle est inférieure aux variabilités intra et interplacette. Les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") conduisent sensiblement aux mêmes conclusions pour le classement de ces deux facteurs à l'exception du zinc pour lequel l'effet "année" est tantôt supérieur (DOU, EPC, SP), tantôt inférieur (CHP, CHS, HET, PS) à l'effet "placette". Pour les mêmes éléments, la variabilité intraplacette est supérieure à la variabilité interplacette (Masse foliaire^{100f (1000a)}, soufre, potassium, et zinc), inférieure (Azote, phosphore, et manganèse) ou égale (Calcium, et magnésium). Dans le cas des autres micronutriments (Sodium, chlore, aluminium, fer, et cuivre), la variabilité interannuelle est relativement proche de la variabilité entre placettes ou entre arbres. Les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") conduisent à des conclusions semblables. Les différences de classement des sources de variabilité apparaissent pour ces éléments au cas par cas, selon les essences.

5.4.2. Différences de variabilité entre macro- et micronutriments

Les macro- et micronutriments présentent globalement des variabilités entre arbres, entre placettes et entre années nettement différentes. Cette variabilité globale des macronutriments est comprise entre 10 et 20 %, alors que celle des micronutriments est comprise entre 20 et 35 % exception faite du sodium. Le même classement est observé pour la variabilité due aux analyses (CV < 5 % pour les macronutriments et CV entre 5 et 10 % pour les micronutriments). On remarque également d'après les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") que les macronutriments (sauf le soufre) présentent un effet "placette" supérieur à l'effet "année" tandis que pour les microéléments (sauf pour le chlore), l'effet "placette" est tantôt supérieur, tantôt inférieur à l'effet "année" (cf. **Tableau 22**, p.84).

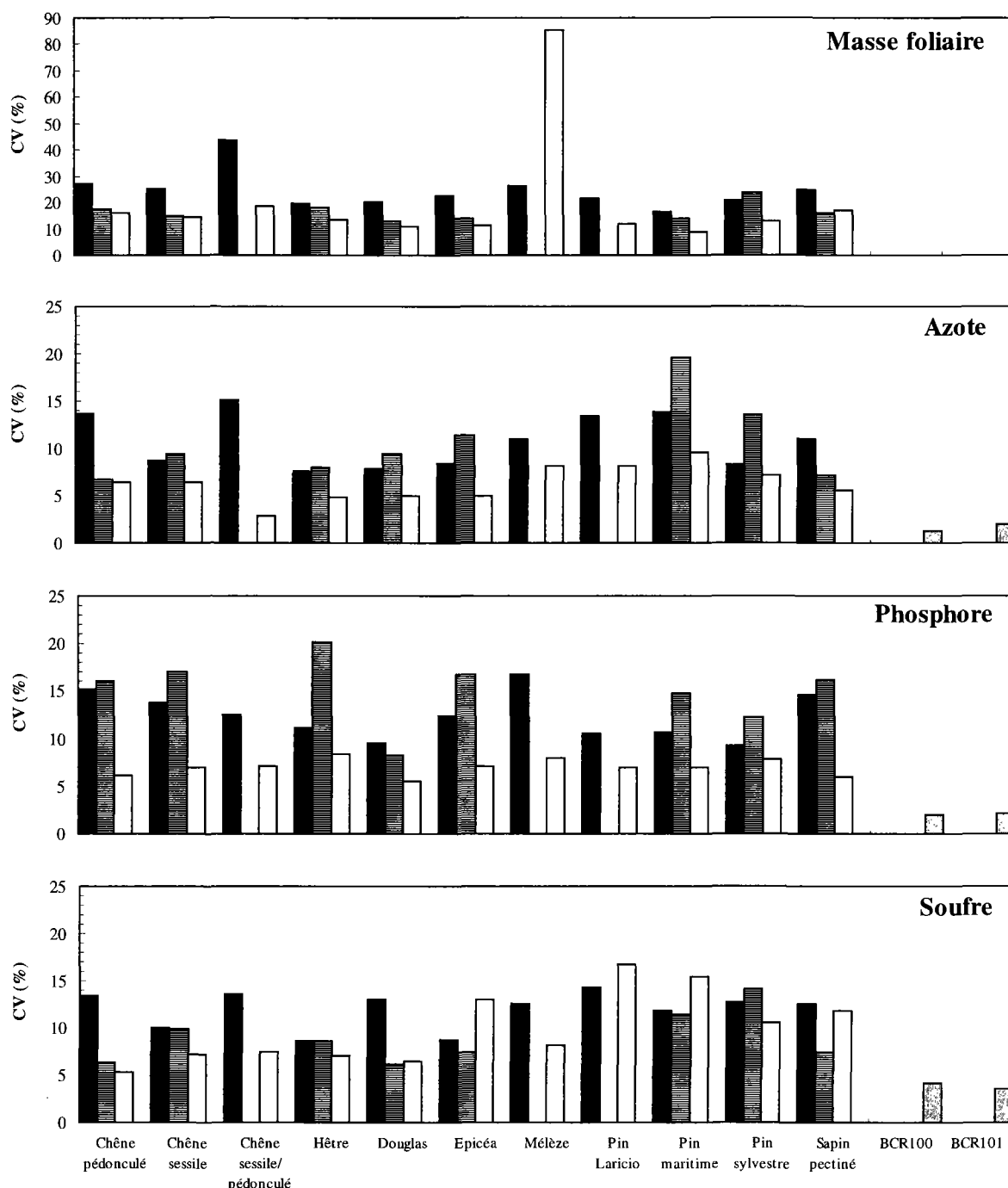


Figure 13: Comparaison entre les coefficients de variation intraplacette (noir), interplacette (hachures horizontales), interannuel (blanc), et analytique pour les deux types d'échantillons de référence européens BCR 100 et BCR 101 (gris) des teneurs foliaires en nutriments pour chaque essence du réseau RENECOFOR et chaque élément foliaire.

Figure 13: Comparison of the intra-plot (black), inter-plot (striped), inter-annual (white) and analytical (grey) coefficient of variation (the later for the two European reference samples BCR 100 and BCR 101) of the foliar nutrient concentration for each tree species and element.

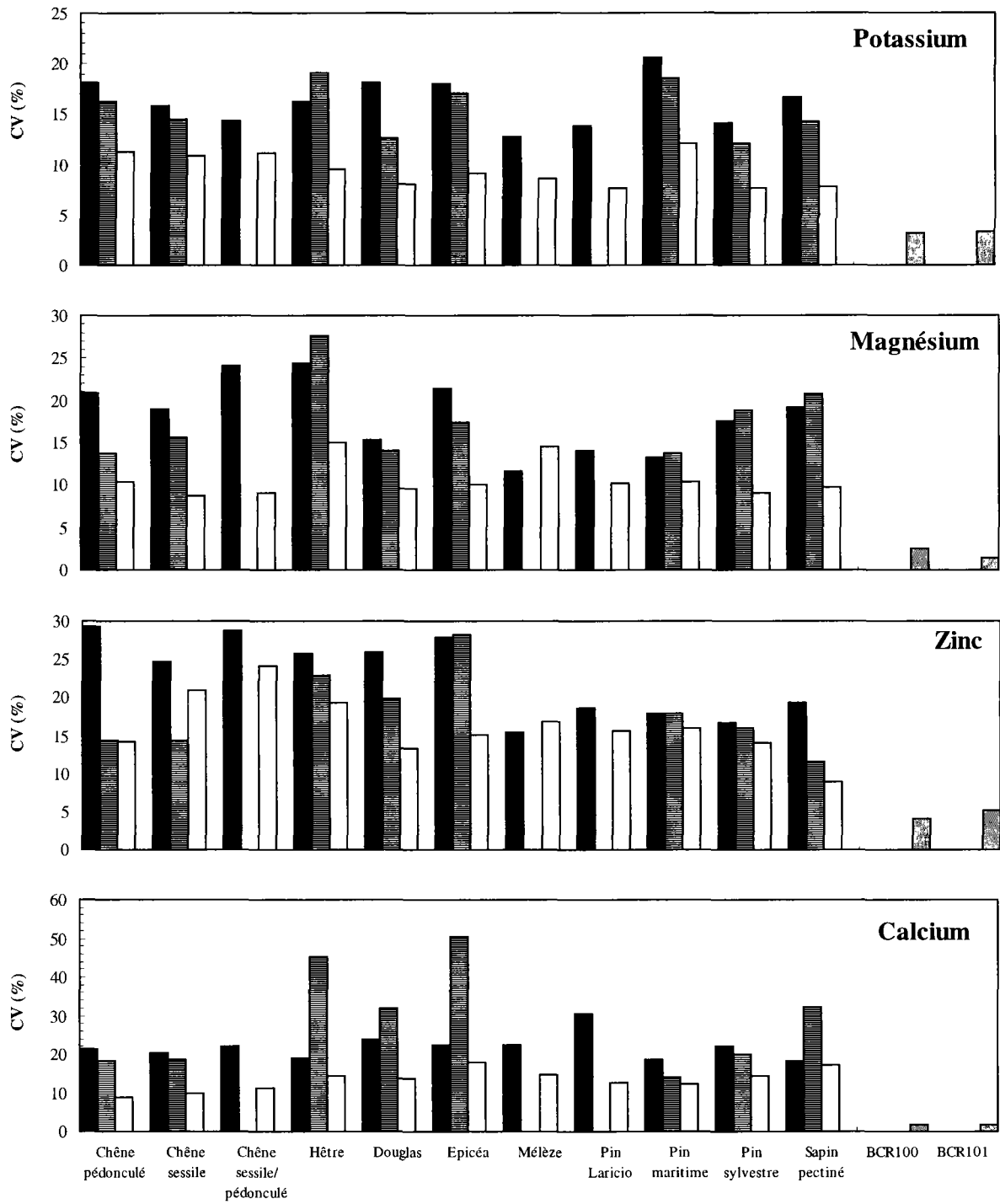


Figure 13 : (suite)

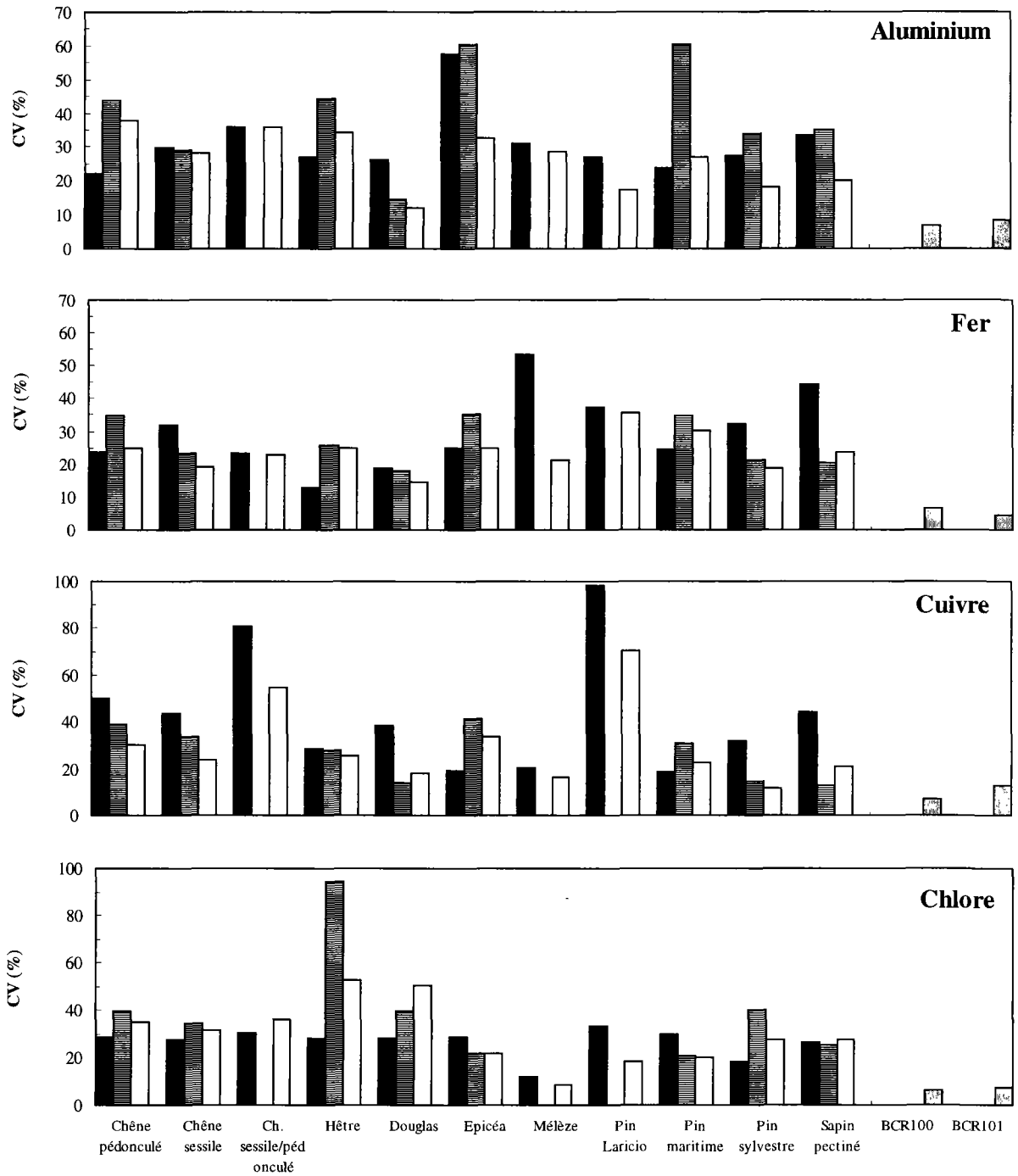


Figure 13 : (suite)

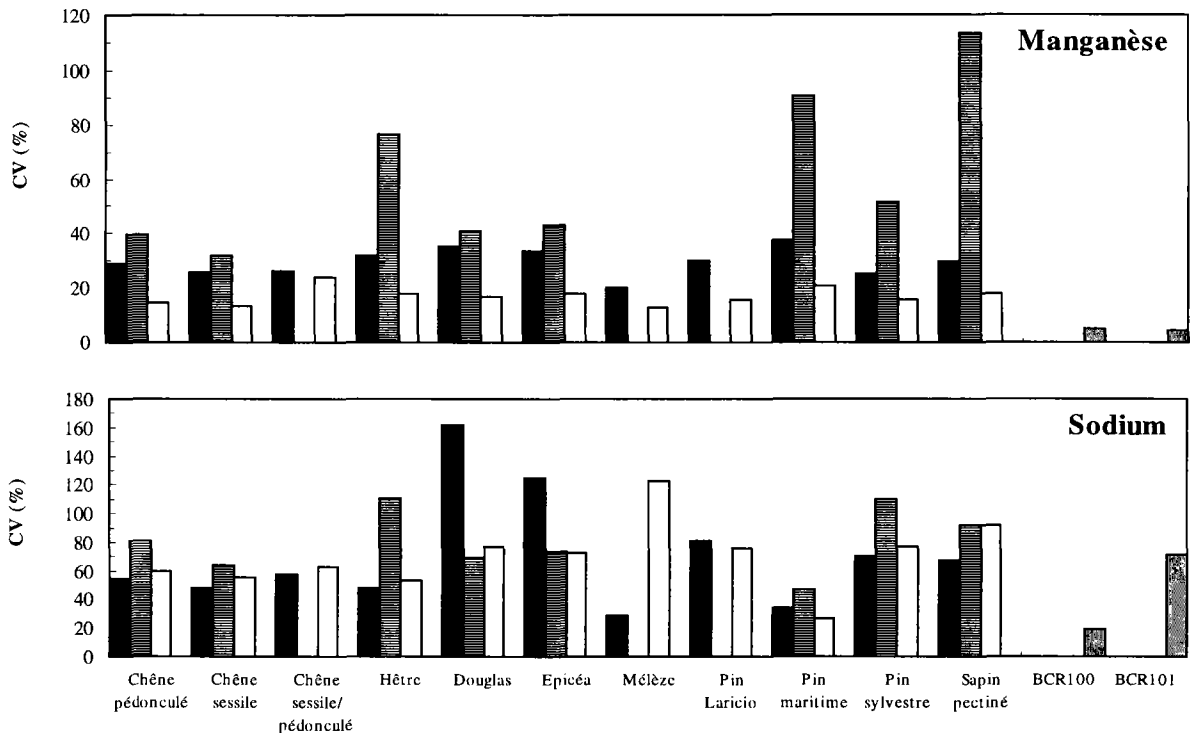


Figure 13 : (fin)

5.4.3. Différences de variabilité entre essences

Dans certains cas particuliers relativement peu nombreux, la variabilité liée à une essence et un élément foliaire donné est nettement supérieure à la moyenne. C'est notamment le cas pour la variabilité interplacette du calcium foliaire chez le hêtre et l'épicéa (placettes sur calcaire et d'autres sur sol non calcaire), du chlore chez le hêtre, et du manganèse chez le hêtre, le pin maritime et le sapin. C'est le cas pour la variabilité intraplacette du fer chez le mélèze, et du cuivre chez le pin laricio et le mélange chêne sessile/chêne pédonculé (sans doute à cause du mélange).

Les analyses de variance ont montré d'autre part que les deux facteurs "placette" et "année" sont le plus souvent significatifs à quelques nutriments près et à l'exception du douglas et du pin maritime pour l'effet "année". Pour ces deux essences, l'année d'échantillonnage a une importance significative uniquement pour le calcium, le chlore, le fer, le cuivre et le zinc (douglas) et pour l'azote, le soufre, le sodium, le chlore, l'aluminium et le cuivre (pin maritime).

TROISIEME PARTIE: RELATIONS ENTRE LES ELEMENTS FOLIAIRES, LES ELEMENTS ECHANGEABLES DANS LE SOL, L'ETAT SANITAIRE ET LA CROISSANCE DES ARBRES

1. Nutriment foliaires et éléments échangeables dans le sol

1.1. Introduction

L'un des objectifs des analyses foliaires est d'apprécier l'état nutritionnel des plantes et de déceler d'éventuelles carences en certains éléments nutritifs, des déséquilibres entre éléments ou des excès conduisant à des phénomènes de toxicité. L'emploi de seuils indicatifs permet un premier diagnostic qui doit cependant être couplé à une caractérisation chimique du sol pour arriver à une meilleure compréhension du problème. Dans les cas les plus simples, des carences ou des excès en nutriments détectés dans les feuilles peuvent résulter d'une pauvreté ou d'un excès de ces éléments dans le sol. Dans d'autre cas, l'excès d'un élément dans le sol n'entraîne pas obligatoirement une toxicité pour le végétal, mais peut induire une carence du végétal vis-à-vis d'un autre élément. Afin de mieux comprendre l'état nutritionnel des arbres sur les placettes RENECOFOR et pour mieux apprécier le poids de la richesse minérale du sol sur les variations des teneurs foliaires en nutriments, les relations entre certains nutriments foliaires majeurs et les mêmes éléments dans le sol ont été étudiées.

L'étude de ces relations a porté sur l'azote, le calcium, le magnésium et le potassium. Le phosphore n'a pas été retenu car, autant les méthodes d'extractions de K, Ca, et Mg dans le sol sont relativement peu nombreuses et fournissent des résultats équivalents, autant le dosage du phosphore échangeable dans le sol fait appel à de nombreuses techniques donnant des concentrations sensiblement différents (Bonneau, 1995). Même si la technique d'extraction du phosphore dans le sol est identique pour l'ensemble des échantillons, comme c'est le cas pour le réseau RENECOFOR, il est donc difficile de savoir ce que signifie réellement la quantité dosée de phosphore.

Les données foliaires utilisées ci-dessous correspondent aux valeurs moyennes par placette pour la période 1993-1997, et les analyses de sol sont celles réalisées en 1993-1995.

Les éléments dans les feuilles ont été exprimés soit en teneur, soit en minéralomasse^{100f (1000a)}, les mêmes éléments dans le sol ont été exprimés en teneur (couches LFH pour l'azote uniquement; 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm pour les autres éléments), ou en stock (couches LFH, LFH-10 cm, LFH-20 cm, LFH-40 cm, pour l'azote uniquement; 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 0-20 cm, 0-40 cm, 10-40 cm pour les autres éléments). Quatre types de relations ont été comparés pour chaque élément et chaque niveau dans le sol: (i) les relations teneurs foliaires / teneurs dans le sol, (ii) teneurs foliaires / stocks dans le sol, (iii) minéralomasses^{100f (1000a)} / teneurs dans le sol et (iv) minéralomasses^{100f (1000a)} / stocks dans le sol.

1.2. Etude des régressions entre les nutriments foliaires et les éléments échangeables dans le sol

Dans une première étape, une analyse graphique des relations a permis d'apprécier le type d'ajustement des données, l'existence de groupes de points manifestement disjoints, et la présence de points extrêmes correspondant à des placettes nettement différentes des autres pour un élément donné.

La majorité des relations obtenues sont de la forme:

$$y_i = b + ax_i + u_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

u_i est un terme d'erreur, a et b des constantes.

Pour la $i^{\text{ème}}$ observation, la valeur de la réponse prédite par le modèle est:

$$y_{\text{pred}} = b + ax_i$$

le résidu correspondant est:

$$e_i = y_i - y_{\text{pred}}$$

le résidu réduit est donné par:

$$e_{ri} = e_i / s \quad s = \text{écart-type résiduel}$$

Les régressions linéaires ont ensuite été calculées en incluant une étude des résidus réduits. Seules les régressions au moins significatives à 10 % ont été retenues. Le degré de significativité (risque α) est noté respectivement (*), **, ***, pour 10 %, 5 %, 1 %, et 0,1 % (**Tableau A 17**, p.187 à **Tableau A 21**, p.194). Pour ces régressions, les hypothèses suivantes concernant les résidus réduits (e_r) ont été vérifiées *a posteriori*:

- (1) leur espérance est nulle
- (2) leur variance est constante
- (3) ils sont indépendants
- (4) ils suivent une loi normale ou gaussienne

Les deux premières hypothèses sont vérifiées à l'aide du graphique des résidus réduits (e_r) en fonction des valeurs prédites (y_{pred}). Si le modèle décrit bien les données, ce graphique permet de vérifier que l'espérance des résidus réduits est nulle, que les résidus réduits se trouvent approximativement entre -2 et +2, et qu'ils ne présentent pas de structure particulière. La troisième hypothèse est vérifiée avec le graphique des résidus réduits (e_r) en fonction du numéro d'ordre de l'observation (n). Ce graphique permet de visualiser une structure éventuelle des résidus en fonction du numéro d'ordre de l'observation. Etant donné le plan d'échantillonnage, on est en droit d'accepter le postulat d'indépendance des résidus. La dernière hypothèse a été validée graphiquement par la droite de Henry. Une simple estimation visuelle de l'ajustement des résidus le long de cette droite permet de savoir si les résidus sont distribués de manière approximativement normale.

On fera remarquer que la vérification de ces hypothèses sur les résidus ne repose pas sur des tests statistiques, mais sur une analyse graphique des résidus qui permet simplement de repérer les points qui s'éloignent fortement du modèle.

Les régressions significatives dues à la présence d'un ou deux points extrêmes ont été éliminées du tableau de synthèse. Ce type de problème est rencontré pour les relations entre la teneur (ou la minéralomasse^{1000a}) en calcium foliaire et le stock (ou la teneur) de calcium échangeable du sol dans les placettes de douglas (la placette DOU 34 présente 376 Kg/ha de calcium échangeable dans la couche 0-10 cm alors que le maximum pour les autres placettes est de 86 Kg/ha). La même situation se retrouve dans le cas des relations entre le potassium foliaire (et le magnésium) et le stock (ou la teneur) de potassium échangeable (magnésium pour les couches 10-20 cm et 20-40 cm) dans le sol des placettes de pin maritime d'une part, et d'autre part dans le cas des relations entre la teneur (ou la

minéralomasse^{1000a}) de calcium foliaire et le stock (ou la teneur) de calcium échangeable dans le sol pour les placettes d'épicéa.

Dans certains cas, la relation reste significative après le retrait d'un point extrême unique. Ces relations sont alors considérées comme valides. Cette situation est rencontrée dans le cas du pin sylvestre pour la relation entre la teneur en calcium foliaire et le stock de calcium échangeable à 0-40 cm (la placette PS 04 présente 1044 Kg/ha de calcium échangeable dans la couche 0-40 cm alors que le maximum rencontré dans les autres placettes est de 514 Kg/ha). Dans le cas du chêne sessile le même phénomène est observé pour les relations entre la teneur foliaire en potassium et le stock de potassium échangeable à 0-10 cm, 10-20 cm, et 0-20 cm (la placette CHS 51 présente 128 Kg/ha de potassium dans la couche 0-10 cm alors que le maximum pour les autres placettes est de 87 Kg/ha).

Dans le cas du hêtre, les relations avec le logarithme des teneurs et les stocks en calcium et magnésium dans le sol présentent un meilleur ajustement des données que le modèle linéaire sans transformation retenu dans tous les autres cas.

Les régressions au moins significatives à 10 %, et valides d'après l'analyse des résidus sont indiquées en annexe pour chaque type de relation: teneur foliaire en fonction de la teneur dans le sol (**Tableau A 17**, p.187), teneur foliaire en fonction des stocks dans le sol (**Tableau A 20**, p.192), minéralomasse^{100f (1000a)} en fonction de la teneur dans le sol (**Tableau A 18**, p.189), et minéralomasse^{100f (1000a)} en fonction des stocks dans le sol (**Tableau A 19**, p.190). Pour les relations entre les teneurs foliaires et les teneurs ou les stocks des mêmes éléments dans le sol, une première analyse globale a été réalisée en regroupant les feuillus d'une part, et les résineux d'autre part. Une deuxième analyse a ensuite porté sur chaque essence séparément.

1.3. Teneurs foliaires en fonction des teneurs en éléments échangeables dans le sol

1.3.1. Analyse globale: feuillus, résineux

Deux familles botaniques sont représentées parmi les essences dominantes ou codominantes du réseau RENECOFOR: les Fagacées (chênes et hêtre), et les Pinacées (pins, épicéa, douglas, sapin pectiné et mélèze). Dans ce cas, le regroupement en familles botaniques correspond à la répartition entre feuillus et résineux. Ce regroupement va permettre de palier au nombre de placettes généralement réduit par essence, et de mieux discerner des tendances globales. Les régressions significatives entre la teneur en nutriments foliaires (N, Ca, Mg, K) et la teneur des mêmes éléments dans le sol pour chaque famille botanique sont indiquées en annexe (**Tableau A 21**, p.194). Les teneurs en éléments dans le sol expliquent globalement mieux les variations des nutriments foliaires que les estimations des stocks dans le sol.

Les feuillus

Les relations les plus étroites entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol sont indiquées ci-dessous (**Figure 14**, p.96). La qualité de ces relations dépend fortement des éléments. Par ordre décroissant de qualité de régression on trouve le calcium, le potassium, le magnésium et l'azote. Mis à part pour le calcium, et dans une moindre mesure pour l'azote, ces graphiques montrent clairement que l'échantillonnage est déséquilibré par rapport à la gamme de teneur des éléments dans le sol. Dans le cas du magnésium, deux placettes de chêne pédonculé (CHP 10 et CHP 55) sur 49 donnent un poids important à la régression. Dans le cas du potassium, ce sont les mêmes placettes de chêne pédonculé et une placette de chêne sessile (CHS 51) qui créent la relation.

Le calcium est l'élément pour lequel la corrélation est la plus forte entre les feuilles et le sol. Malgré une couverture satisfaisante de l'ensemble de la gamme de teneur dans le sol, deux groupes de placettes ressortent nettement: les placettes pauvres (mais non carencées) en calcium échangeable ($< 5 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), et les placettes mieux alimentées en calcium ($> 5 \text{ cmol}_c/\text{kg}$). Le calcium échangeable présent dans la couche de sol 0-10 cm explique 76 % de la variabilité du calcium foliaire; ce pourcentage diminue légèrement avec la profondeur de sol (70 % avec la couche 20-40 cm). Les stocks de calcium échangeable dans le sol conduisent à des relations sensiblement équivalentes, et la prise en compte du stock sur l'ensemble des couches minérales (0-40 cm) explique un pourcentage moins important de la variabilité du calcium dans les feuilles (64 %) que le stock ou la teneur dans l'horizon de surface (0-10 cm).

Le potassium et le magnésium foliaire sont faiblement reliés aux teneurs des mêmes éléments dans le sol, mais ces relations souffrent d'un manque de représentativité des teneurs dans le sol (au-delà de $1,5 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$ et $0,2 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$ pour respectivement le magnésium et le potassium). On remarquera toutefois que ces plages de teneur correspondent à des situations particulières pour lesquelles le niveau de fertilité est élevé (d'après Bonneau, 1995). Même si les méthodes d'extraction utilisées pour les échantillons RENECOFOR (chlorure de baryum) et pour les valeurs indicatives données par Bonneau (1995) sont différentes, les résultats obtenus sont généralement du même ordre de grandeur (Brêthes, communication personnelle). Au maximum 18 % (K) et 12 % (Mg) de la variabilité des teneurs foliaires est expliquée par les éléments dans le sol. Les relations n'en sont pas moins significatives. Le risque de déclarer les relations significatives alors qu'elles ne le sont pas est inférieur à 1 % pour le potassium et inférieur à 5 % pour le magnésium. L'évaluation des stocks dans le sol pour ces éléments ne conduit pas à des relations significatives avec les nutriments foliaires.

L'azote est l'élément pour lequel les relations entre feuilles et sol sont les plus faibles. Seulement 10 % des variations dans les feuilles sont expliquées par les teneurs dans le sol avec des relations significatives à 5 %. L'estimation des stocks d'azote pour différentes couches de sol ne permet pas de mettre en évidence de relation significative avec l'azote foliaire.

Les résineux

Pour les résineux, les relations sont plus étroites entre l'azote ou le magnésium foliaire et ces éléments dans le sol que pour les feuillus. Elles sont moins bonnes pour le calcium et équivalentes pour le potassium (**Figure 14**, p.96). Par ordre décroissant de qualité de régression, on trouve: le calcium, l'azote, le magnésium et le potassium. L'échantillonnage sur l'ensemble des gammes de teneur dans le sol est plus équilibré que pour les feuillus.

Comme chez les feuillus, le calcium échangeable dans le sol est bien corrélé au calcium dans les aiguilles ($R^2 = 0,59$ dans la couche de sol 20-40 cm). La relation est plus étroite avec l'horizon profond (20-40 cm) qu'avec l'horizon de surface (0-10 cm).

Les teneurs d'azote dans l'humus sous les résineux sont corrélées significativement avec l'azote foliaire. 37 % de la variabilité de l'azote foliaire sont expliqués par l'azote dans l'humus. Dans les couches minérales, les corrélations sont très faibles ou inexistantes.

La teneur en magnésium échangeable dans la couche de sol 0-10 cm explique 41 % des variations dans les feuilles, et ce pourcentage diminue jusqu'à 27 % si l'on considère la couche de sol 20-40 cm.

Le potassium foliaire est faiblement corrélé avec le potassium échangeable dans le sol. Seulement 14 % de la variabilité du potassium foliaire est expliqué par les teneurs en potassium échangeable dans le sol.

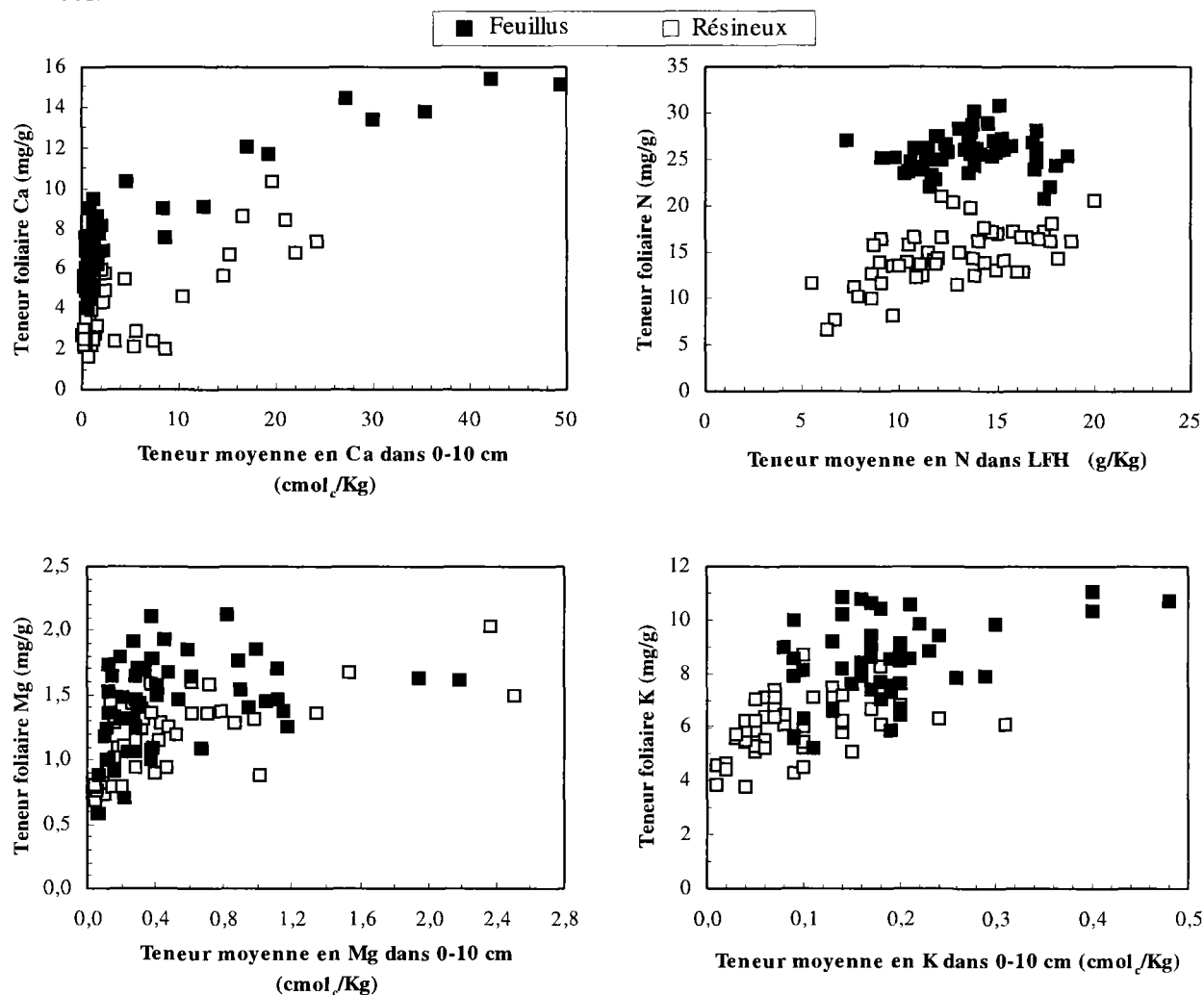


Figure 14: Meilleures régressions linéaires entre les teneurs en nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les teneurs en éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) chez les feuillus et les résineux.

Figure 14: Best linear regressions between the foliar nutrient concentrations (averages for 1993-1997) and soil element concentration (1993-1995 analysis) for conifers and broad-leaved trees.

1.3.2. Analyse par essence

Les meilleures relations décrites à partir des 102 placettes du réseau RENECOFOR correspondent pour l'azote aux placettes de douglas ($R^2 = 0,81$; significatif à 5 %; horizons 0-10 cm), pour le calcium aux placettes de hêtre ($R^2 = 0,81$; significatif à 0,1 %; horizons 0-10 cm), pour le magnésium aux placettes de pin sylvestre ($R^2 = 0,69$; significatif à 0,1 %; horizons 10-20 cm), et pour le potassium aux placettes de chêne sessile ($R^2 = 0,36$; significatif à 1 %; horizons 0-10 et 20-40 cm). Dans chacune de ces situations, les régressions obtenues avec les teneurs en éléments échangeables aux autres profondeurs prospectées sont également significatives. Les corrélations sont globalement les plus fortes pour le calcium (hêtre, sapin, chêne sessile), et dans une moindre mesure pour le magnésium (pin sylvestre, hêtre).

Les pentes des relations significatives sont généralement faibles, de l'ordre de 0,1 à 3 pour l'azote, le calcium, et le magnésium. Cela indique globalement qu'une variation importante des teneurs dans le sol correspond à de faibles variations des mêmes éléments dans les feuilles. Le potassium semble différent de ce point de vue avec des pentes de l'ordre de 10.

Azote

La variabilité de la teneur foliaire en azote est généralement faiblement expliquée par les teneurs en azote dans le sol, aussi bien en surface dans les horizons holorganiques, que dans les horizons minéraux jusqu'à 40 cm. L'étude des corrélations entre l'azote foliaire et le C/N du sol serait indispensable dans une prochaine étude. Le douglas est l'essence pour laquelle la corrélation est la plus forte avec 81 % et 66 % de la variance expliquée par les teneurs d'azote dans le sol respectivement dans les couches 0-10 cm et 10-20 cm. Ces corrélations sont significatives à 5 % mais le nombre très faible de placettes pour cette essence ($n = 6$) oblige à respecter une grande prudence quant à leur interprétation. Toutes les autres corrélations sont faibles ($P \leq 10 \%$) et concernent le chêne pédonculé, l'épicéa, le pin maritime, et le sapin. Selon les essences ces régressions peuvent être positives (épicéa, pin maritime) ou négatives (chêne pédonculé, sapin).

Calcium

La nutrition en calcium dépend fortement du calcium échangeable dans les horizons minéraux au moins jusqu'à 40 cm pour le chêne sessile, le hêtre, et le sapin. Dans le cas du chêne sessile, les corrélations sont plus fortes avec les horizons de surface (0-10 cm, $R^2 = 0,556^{***}$) qu'avec les horizons plus profonds (20-40 cm, $R^2 = 0,233^*$). La même observation est valable pour le hêtre, mais les corrélations restent fortes en profondeur (0-10 cm, $R^2 = 0,808^{***}$; 20-40 cm, $R^2 = 0,783^{***}$). Le sapin présente une évolution inverse c'est à dire des corrélations plus étroites en profondeur qu'en surface (0-10 cm, $R^2 = 0,635^{**}$; 20-40 cm, $R^2 = 0,728^{***}$). On remarque pour cette essence que les teneurs en calcium dans le sol ne couvrent pas une gamme homogène. L'intervalle compris entre 5 et 15 cmol_c/Kg dans l'horizon 0-10 cm n'est pas représenté dans les placettes du réseau. Un problème identique de représentativité de la gamme de teneurs dans le sol est évident dans le cas du douglas. La placette DOU 34 présente des teneurs en calcium plus de 2 fois plus élevées que les autres placettes dans les horizons minéraux. De la même manière, les placettes d'épicéa ne couvrent pas une gamme de teneur en calcium suffisante dans le sol pour permettre de décrire une relation de manière satisfaisante. Dans le cas du hêtre, les relations entre la teneur foliaire en calcium et le log des teneurs en calcium échangeable dans le sol décrit mieux les données (**Figure 15**, p.98). Le coefficient de détermination passe de 0,808; 0,787; 0,783 pour les données non transformées à 0,882; 0,855; 0,819 pour les données transformées en logarithme dans les horizons respectivement 0-10 cm, 10-20 cm, et 20-40 cm. Ce type d'ajustement suggère en fait l'existence de deux domaines de teneurs dans le sol. Le premier correspond à des teneurs en calcium échangeable dans le sol comprises entre 0 et 2 cmol_c/Kg . Dans cette gamme, aucune relation entre les teneurs foliaires, et les teneurs dans le sol en calcium n'est décelable. Au delà de 2 cmol_c/Kg de calcium échangeable dans le sol, les relations avec le calcium dans les feuilles sont linéaires.

Magnésium

La nutrition en magnésium est liée à la disponibilité de cet élément dans les horizons minéraux du sol au moins jusqu'à 40 cm dans le cas du pin sylvestre ($R^2 = 0,45^{**}$ à 0-10 cm et $0,69^{***}$ à 10-20 cm), et dans le cas du hêtre ($R^2 = 0,43^{**}$ à 0-10 cm et $0,39^{**}$ à 20-40 cm). Un ajustement logarithmique décrit mieux les données dans le cas du hêtre ($R^2 = 0,57$ à 0-10 cm et $R^2 = 0,57$ à 20-40 cm). Dans le cas du pin sylvestre, des régressions polynomiales d'ordre 2 s'ajustent mieux aux données ($R^2 = 0,62$ à 0-10 cm, et $R^2 = 0,76$ à 10-20 cm). Dans le cas de l'épicéa, les régressions linéaires sont calculées en enlevant la placette EPC 39a qui sort nettement du nuage de points formé par les autres placettes. Cet ajustement est alors significatif à 5 % avec $R^2 = 0,53$ pour la couche de sol 0-10 cm.

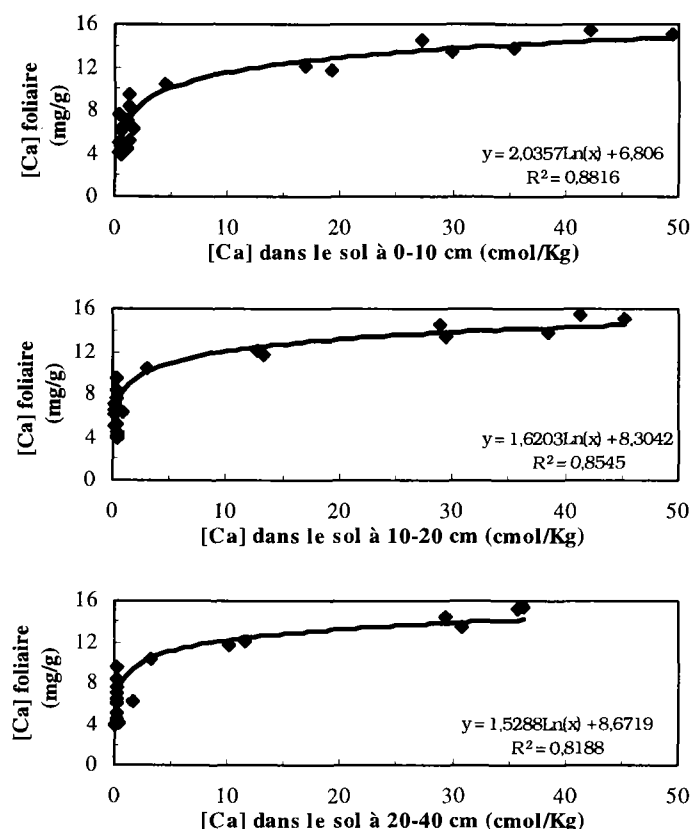


Figure 15: Ajustements logarithmiques entre la teneur en calcium foliaire (moyenne pour la période 1993-1997) et le calcium échangeable à trois niveaux dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR.

Figure 15: Logarithmic regressions between the Ca concentration in the leaves (averages for 1993-1997), and the exchangeable Ca concentration in 3 soil depths (1993-1995 analysis) for the 20 plots of beech in the RENECOFOR network.

Potassium

Parmi les éléments analysés, le potassium est celui pour lequel le moins de corrélations significatives ont été notées pour les essences du réseau. Seule, la nutrition du chêne sessile en potassium est corrélée significativement à la disponibilité de cet élément dans le sol ($R^2 = 0,36^{**}$ à 0-10 cm et à 20-40 cm). Comme mentionné au paragraphe 1.1, les régressions restent significatives si la placette CHS 51 est retirée du jeu de données, et les coefficients de détermination changent peu sauf dans le cas de la relation avec le potassium échangeable dans le sol à 20-40 cm (R^2 passe de 0,36 à 0,41).

1.4. Teneurs foliaires en fonction des stocks en éléments échangeables dans le sol

1.4.1. Analyse globale: feuillus, résineux

Les paramètres des relations calculées entre les teneurs foliaires en nutriment et les stocks dans le sol sont indiquées en annexe (**Tableau A 21**, p.194).

Les feuillus

Une sélection des relations les plus étroites entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol sont indiquées ci-dessous (**Figure 16**, p.99). La qualité de ces relations dépend fortement des

éléments. Seul le calcium présente une relation significative entre les stocks dans le sol et les teneurs foliaires. Les relations sont d'autre part plus étroites avec les stocks estimés dans les couches de sol superficielles (0-10 cm) qu'avec les stocks estimés dans les couches plus profondes (20-40 cm). Aucune corrélation n'est observée dans le cas de l'azote du potassium, et du magnésium.

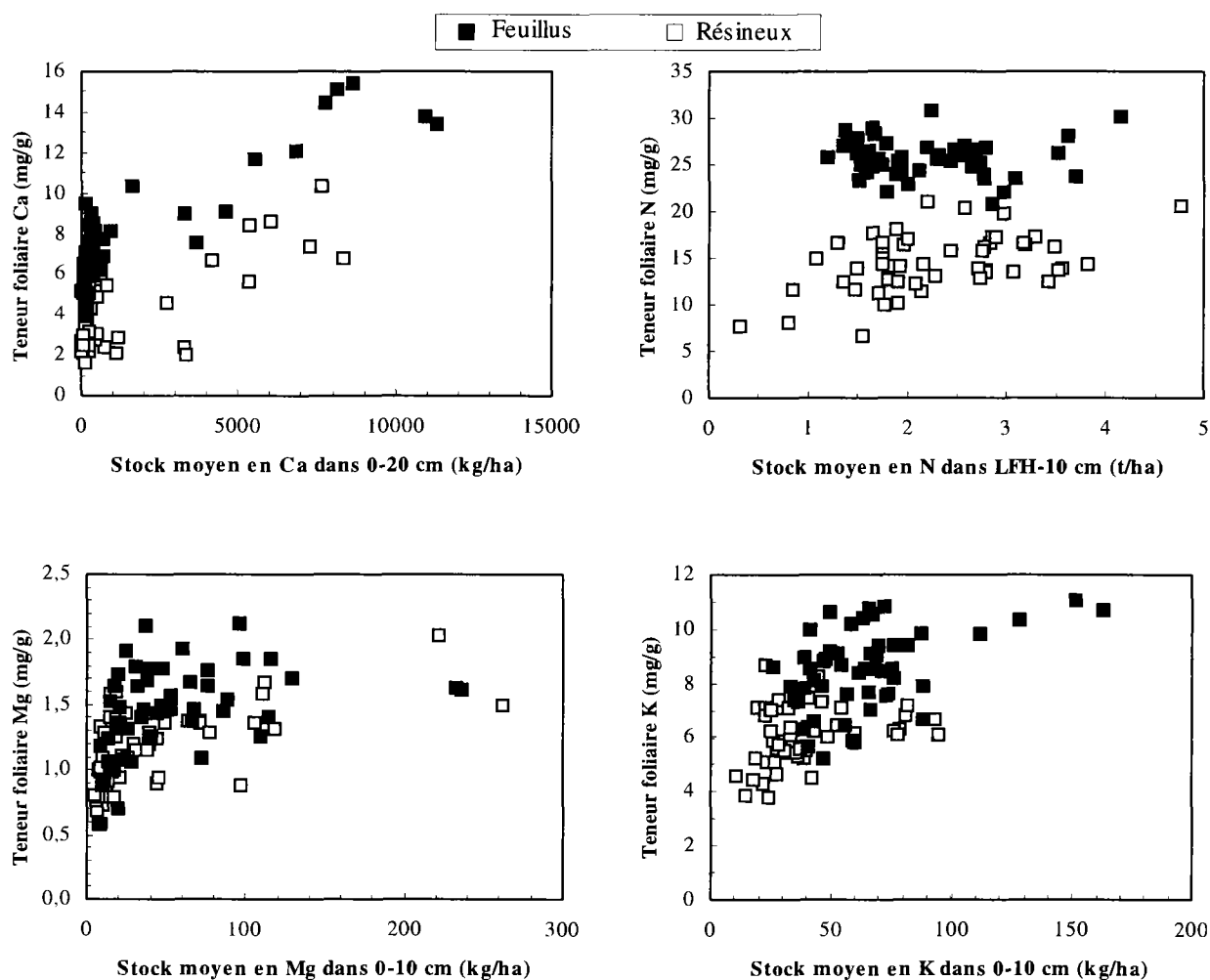


Figure 16: Meilleures régressions linéaires entre les teneurs en nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les stocks d'éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) chez les feuillus et les résineux.

Figure 16: Best linear regressions between the foliar nutrient concentrations (averages 1993-1997) and soil pools of exchangeable ions (1993-1995 analysis) for coniferous and broad-leaved trees.

Les résineux

Les relations entre l'azote ou le magnésium foliaire et les stocks de ces éléments dans le sol sont plus étroites chez les résineux que chez les feuillus. Les relations sont plus étroites avec les couches de sol LFH qu'avec les couches minérales jusqu'à 40 cm. Le stock de potassium est faiblement corrélé avec la teneur en potassium foliaire alors que la relation est inexistante chez les feuillus. Par contre, la relation entre le calcium foliaire et le stock de calcium dans le sol est moins étroite chez les résineux que chez les feuillus. Les relations sont plus étroites avec les horizons profonds qu'avec les horizons de surface pour cet élément.

1.4.2. Analyse par essence

Les corrélations les plus fortes entre les teneurs foliaires en élément et les stocks dans le sol sont obtenues, pour l'azote dans le cas du chêne pédonculé ($R^2 = 0,82^{***}$, horizon LFH), pour le calcium dans le cas du sapin ($R^2 = 0,83^{***}$, horizon 20-40 cm), pour le magnésium dans le cas du pin sylvestre ($R^2 = 0,74^{***}$, horizon 10-20 cm), et pour le potassium dans le cas du sapin ($R^2 = 0,62^{**}$, horizon 0-10 cm). L'azote mis à part, les corrélations significatives sont observées, pour chaque essence, dans l'ensemble des couches de sol analysées. Globalement, le pourcentage d'explication du modèle qui correspond au coefficient de détermination est le plus élevé pour le calcium, le magnésium, puis le potassium et l'azote.

Azote

Des corrélations significatives à au moins 10 % sont obtenues pour les deux espèces de chêne, le douglas, le pin maritime et le pin sylvestre. Le chêne pédonculé avec l'horizon LFH mis à part, ces corrélations sont faibles dans leur ensemble. La proportion de la variation totale des teneurs foliaires expliquée par le modèle est comprise entre 19 et 20 % chez le chêne sessile, entre 63 et 69 % chez le douglas, entre 47 et 60 % chez le pin maritime, et entre 22 et 39 % chez le pin sylvestre. On notera d'autre part dans le cas du chêne pédonculé que la corrélation mise en évidence dans l'horizon LFH est positive alors qu'elle est négative avec l'horizon 10-20 cm.

Calcium

Les teneurs en calcium foliaire sont corrélées avec le stock de calcium dans le sol pour quatre des huit essences prises en compte: le sapin, le hêtre, le chêne sessile, et de manière moins forte le pin sylvestre. Ces corrélations restent significatives quelle que soit la couche de sol prise en compte. L'ajustement logarithmique des données permet de mieux expliquer la variation totale des teneurs foliaires dans le cas du hêtre. Pour les couches de sol 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 0-20 cm, 0-40 cm, et 10-40 cm, les coefficients de détermination deviennent: 0,84; 0,80; 0,72; 0,83; 0,77; et 0,73.

Magnésium

Dans le cas du hêtre, du pin maritime, du pin sylvestre, et dans une moindre mesure du chêne sessile, les teneurs foliaires en magnésium sont corrélées aux stocks d'éléments dans le sol. Les coefficients de détermination sont compris selon la tranche de sol considérée entre 0,34* et 0,50*** chez le hêtre, entre 0,62* et 0,74* chez le pin maritime, entre 0,37* et 0,74*** chez le pin sylvestre, et entre 0,16^(*) et 0,21* chez le chêne sessile. Ces corrélations restent significatives pour toutes les couches de sol prises en compte. De la même manière que dans le cas du calcium, des ajustements logarithmiques décrivent mieux les données chez le hêtre. Pour les couches de sol 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 0-20 cm, 0-40 cm, et 10-40 cm, les coefficients de détermination deviennent: 0,67; 0,56; 0,56; 0,64; 0,65; et 0,58.

Potassium

Les teneurs en potassium foliaire sont bien corrélées aux stocks dans le sol à toute les profondeurs considérées chez le chêne sessile, et dans une moindre mesure chez le sapin. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,45** et 0,55*** chez le chêne sessile, et entre 0,35^(*) et 0,62** chez le sapin. Une placette de chêne sessile (CHS 51) est nettement en dehors du nuage de points constitué par les autres placettes pour les profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm, et 0-20 cm. De nouvelles régressions calculées sans cette placette modifient relativement peu le coefficient de détermination (0,43**; 0,57***; 0,51*** pour respectivement les couches 0-10 cm, 10-20 cm, et 0-20 cm). Les pentes sont légèrement modifiées.

1.5. Minéralomasse^{100f(1000a)} en fonction des teneurs en éléments échangeables dans le sol

Les corrélations les plus fortes sont obtenues pour l'azote chez le chêne sessile ($R^2 = 0,36$; significatif à 1 %; horizon 0-10 cm), pour le calcium chez le sapin ($R^2 = 0,78$; significatif à 0,1 %; horizon 20-40 cm), pour le magnésium chez le hêtre ($R^2 = 0,45$; significatif à 1 %; horizon 20-40 cm), et pour le potassium chez le chêne pédonculé ($R^2 = 0,39$; significatif à 10 %; horizon 20-40 cm). Dans le cas de l'azote et du potassium des corrélations significatives ne sont pas systématiquement retrouvées avec les teneurs aux autres profondeurs dans le sol. Par contre, dans le cas du calcium et du magnésium, des corrélations significatives sont retrouvées aux autres profondeurs, jusqu'à 40 cm. Les corrélations sont globalement les plus fortes pour le calcium (sapin, hêtre, chêne sessile), et moins fortes pour le magnésium (hêtre).

Azote

La minéralomasse^{100f(1000a)} d'azote dépend très peu des teneurs en azote dans les horizons de surface du sol, jusqu'à 40 cm. Les placettes de douglas et de chêne sessile présentent pour un horizon donné une corrélation significative (R^2 respectivement 0,67; corrélation positive significative à 5 %; horizon LFH, et 0,37; corrélation négative significative à 1 %; horizon 0-10 cm). Le nombre réduit de placettes de douglas ($n = 6$) doit toutefois inciter à la prudence quand à la validité de la relation obtenue. Ces corrélations négatives ne pourraient s'expliquer que par une forte teneur en matière organique peu minéralisable (Bonneau, communication personnelle).

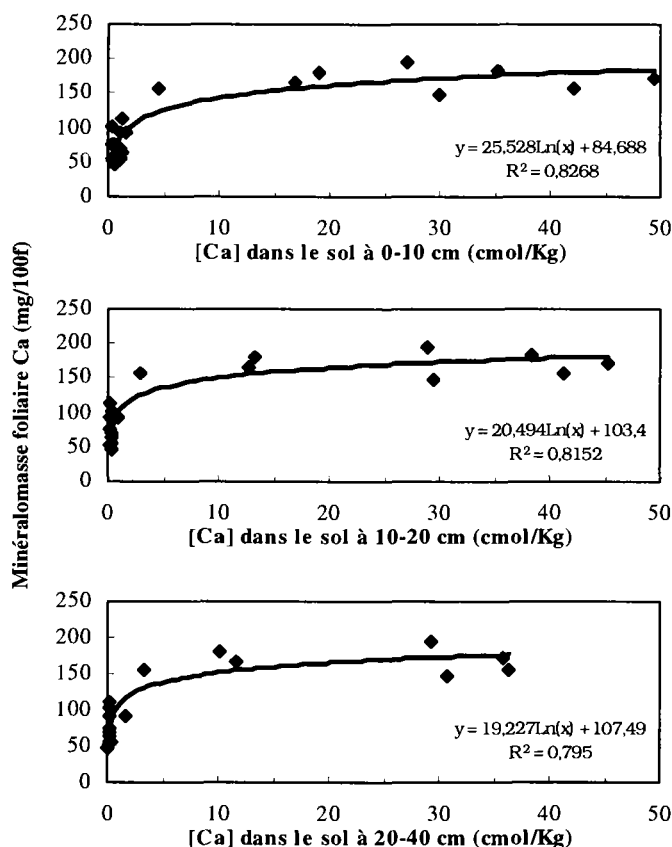


Figure 17: Ajustements logarithmiques entre la minéralomasse^{100f} foliaire (pour 100 feuilles) en calcium (moyenne pour la période 1993-1997), et le calcium échangeable à trois niveaux dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR.

Figure 17: Logarithmic regressions between the Ca contained in 100 leaves (averages 1993-1997), and the exchangeable Ca in 3 soil depths (1993-1995 analysis) for the 20 beech plots in the RENECOFOR network.

Calcium

Les minéralomasses^{100f (1000a)} de calcium sont fortement corrélées avec les teneurs en calcium dans le sol dans le cas du sapin, du hêtre, et du chêne sessile. Des corrélations plus faibles, mais significatives sont mises en évidence pour le chêne pédonculé ($R^2 = 0,45$; significatif à 5 %; horizon 0-10 cm). La placette CHS 27 se distingue nettement des autres placettes avec la plus forte teneur en calcium dans l'horizon 20-40 cm et une faible minéralomasse^{100f}. Le calcul de la régression sans cette placette permet un meilleur ajustement des données ($R^2 = 0,65^{***}$). Une placette de douglas et deux placettes d'épicéa induisent des régressions fallacieuses qui ne sont pas retenues dans le tableau de synthèse. Dans le cas du hêtre, un ajustement logarithmique décrit mieux les données (**Figure 17**, p.101).

Magnésium

La minéralomasse^{100f (1000a)} de magnésium dépend faiblement des teneurs dans le sol. Dans le cas du chêne pédonculé et du chêne sessile des relations significatives à 5 % sont obtenues avec la teneur en magnésium de l'horizon 20-40 cm (R^2 respectivement 0,46 et 0,24). Dans le cas du hêtre, les relations sont significatives pour les trois niveaux de sol 0-10, 10-20 et 20-40 cm, mais les corrélations sont très faibles en surface et meilleures à 20-40 cm (R^2 respectivement 0,28; 0,24; et 0,45). Comme pour les relations entre les teneurs foliaires et les teneurs dans le sol, une corrélation significative est obtenue dans le cas de l'épicéa en enlevant la placette EPC 39a ($R^2 = 0,35^{(*)}$ à 0-10 cm).

Potassium

Les variations de minéralomasse^{100f (1000a)} de potassium sont faiblement expliquées par les variations de teneur en potassium dans le sol. Les corrélations les moins faibles sont obtenues dans le cas du chêne pédonculé ($R^2 = 0,39^{(*)}$ et $0,34^{(*)}$) respectivement dans les couches de sol 20-40 et 0-10 cm. La placette de chêne sessile CHS 51 présente une teneur en potassium dans la couche de sol 20-40 cm nettement plus élevée que dans les autres placettes (0,33 cmol_c/Kg contre au maximum 0,15 cmol_c/Kg). Le calcul de la régression sans cette placette donne un coefficient de détermination $R^2 = 0,39^{**}$.

1.6. Minéralomasses^{100f (1000a)} en fonction des stocks en éléments échangeables dans le sol

Les corrélations les plus fortes entre la minéralomasse^{100f (1000a)} et les stocks d'éléments dans le sol sont observées pour l'azote chez le chêne sessile, pour le calcium chez le sapin, pour le magnésium chez le hêtre, et pour le potassium chez le chêne sessile. Les relations restent généralement significatives pour une essence donnée quel que soit le niveau d'analyse dans le sol dans le cas du calcium, du magnésium, et dans une moindre mesure, du potassium. L'azote présente des relations significatives de manière très ponctuelle avec certaines couches de sol. Globalement, la proportion de la variance totale de la minéralomasse^{100f (1000a)} qui est expliquée par le modèle linéaire est la plus forte dans le cas du calcium, du magnésium, et dans une moindre mesure du potassium.

Azote

Parmi les 8 essences étudiées, seul le chêne sessile présente des corrélations significatives entre la minéralomasse^{100f} d'azote et les stocks en azote dans le sol (R^2 respectivement $0,39^{**}$ horizon 0-10 cm; $0,33^{**}$ horizon LFH-10; et $0,25^{*}$ horizon LFH-20). D'un point de vue statistique, ces corrélations sont significatives. On fera cependant remarquer que la proportion de la variance totale de la minéralomasse^{100f} qui reste non expliquée par ces relations est forte: entre 65 et 80 %.

Calcium

Quelle que soit la tranche de sol considérée jusqu'à 40 cm, la minéralomasse^{100f (1000a)} de calcium est corrélée avec les stocks de calcium dans le sol dans le cas du sapin, du hêtre, et du chêne sessile. La

qualité des régressions n'est pas fonction d'une profondeur déterminée. La meilleure régression peut ainsi être observée pour la couche 0-40 cm (chêne sessile), pour la couche 0-10 cm (hêtre), ou bien pour la couche 20-40 cm (sapin). Les relations mises en évidence dans le cas du hêtre sont nettement améliorées par un ajustement logarithmique. Pour les couches de sol 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 0-20 cm, 0-40 cm, et 10-40 cm, les coefficients de détermination sont compris entre 0,77 et 0,86.

Magnésium

Les chênes sessile et pédonculé, et le hêtre présentent des corrélations significatives. Ces corrélations sont significatives à 5, 1, ou 0,1 %, mais la proportion de la variance totale sur la minéralomasse^{100f} expliquée par le modèle est comparable dans tous les cas; elle est comprise entre 40 et 50 %. De la même manière que dans le cas du calcium, ces corrélations se retrouvent, pour une essence donnée avec l'ensemble des couches de sol analysées. Les ajustements logarithmiques décrivent mieux les données dans le cas du hêtre. Pour les couches de sol considérées, 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 0-20 cm, 0-40 cm, et 10-40 cm, les coefficients de détermination deviennent: 0,57; 0,52; 0,67; 0,56; 0,66 et 0,64.

Potassium

Les relations sont généralement faibles. Les meilleures relations sont observées dans le cas du chêne sessile ($R^2 = 0,43$, et $R^2 = 0,36$ à 20-40 cm et 0-40 cm). Les autres corrélations sont significatives à seulement 10 %. La placette CHS 51 de chêne sessile sort nettement des nuages de points. Le calcul des nouvelles régressions sans cette placette montre un ajustement plus étroit des données autour des droites de régression ($R^2 = 0,24^*$; $0,41^{**}$; $0,32^*$ à respectivement 0-10 cm, 10-20 cm, et 0-20 cm).

1.7. Comparaison de la qualité des régressions selon les régresseurs

Dans une première approche, la recherche, pour chaque élément, des espèces caractérisées par des régressions significatives pour les 4 relations testées ((1) [] foliaires / [] sol; (2) [] foliaire / stocks sol; (3) minéralomasses^{100f (1000a)} / [] sol et (4) minéralomasses^{100f (1000a)} / stocks sol) permet de sortir l'information *a priori* la plus robuste (**Tableau A 17**, p.187 à **Tableau A 20**, p.192). Cette analyse doit se faire élément par élément étant donné que les informations communes aux 4 types de régressions calculées entre certains éléments dans les feuilles (ou les aiguilles) et les mêmes éléments dans le sol est fonction des éléments considérés et des essences.

Azote

Aucune corrélation n'est commune aux 4 types de régression testées pour cet élément. Les relations prenant en compte les teneurs d'azote dans le sol mettent en évidence deux corrélations communes: chez le douglas, et chez l'épicéa (dans les deux cas avec les teneurs dans l'horizon LFH). Les relations prenant en compte les stocks d'azote dans le sol ont en commun 3 corrélations significatives chez le chêne sessile (avec les horizons 0-10 cm, LFH-10 cm, et LFH-20 cm).

Globalement, la relation entre l'azote foliaire et l'azote dans une partie des horizons prospectés par les racines est très faible pour les essences représentées dans le réseau. L'étude des relations avec le rapport C/N serait donc souhaitable.

Calcium

Le calcium est l'élément qui présente le plus de corrélations communes entre les différents types de régression. Ces corrélations qui concernent le chêne sessile, le hêtre, et le sapin sont en outre systématiquement significatives pour chaque couche de sol considérée.

Magnésium

Le hêtre est la seule essence pour laquelle les corrélations entre le magnésium foliaire et le magnésium échangeable dans le sol restent significatives, indépendamment du mode d'expression de cet élément. Ces corrélations restent significatives pratiquement dans tous les cas à toutes les profondeurs de sol prospectées. Dans le cas du chêne sessile, des corrélations significatives sont obtenues quelque soit le mode d'expression retenu, mais pas à toutes les profondeurs.

Potassium

Le chêne sessile est la seule essence pour laquelle les corrélations entre le potassium foliaire et le potassium échangeable dans le sol restent significatives, indépendamment du mode d'expression de cet élément. On remarque cependant que la relation entre la minéralomasse^{100f (1000a)} et la teneur dans le sol est faiblement significative.

Dans une deuxième approche les meilleures régressions nous indiquent l'expression des éléments (dans le feuillage, et dans le sol) qui permet d'expliquer la part la plus importante de la variation de ces éléments dans les feuilles (**Tableau 24**). Ce tableau récapitulatif pour chaque type de relation et pour chaque élément montre le pourcentage de régressions significatives à au moins 10 % par rapport au nombre de régressions calculé, le meilleur R², l'essence correspondant au meilleur R² et la couche de sol correspondante.

Pour tous les éléments considérés, les relations présentant le meilleur R² correspondent toujours à la teneur foliaire en fonction du stock à un niveau donné dans le sol.

Selon un ordre décroissant de pourcentage de variation totale expliquée par le modèle, on trouve le calcium avec 83 % (Sapin, couche de sol 20-40 cm), l'azote avec 82 % (Chêne pédonculé, couche de sol LFH), le magnésium avec 74 % (Pin sylvestre, couche de sol 10-20 cm), et le potassium avec 55 % (Chêne sessile, couche de sol 0-40 cm). Dans le cas de l'azote, le pourcentage élevé doit cependant être considéré avec précaution étant donné que la qualité des régressions dépend fortement du mode d'expression des données.

Tableau 24: Récapitulatif des meilleures régressions par type de relation et par élément entre les éléments foliaires et les mêmes éléments dans le sol. Pour chacun des 4 types de relation, et pour chaque élément sont indiqués : le pourcentage de régressions significatives à au moins 10 % par rapport au nombre de régressions calculé, le meilleur R², l'essence correspondant au meilleur R², et la couche de sol correspondante.

Table 24 : *Global results of the regression analysis between foliar nutrient concentrations or mineral mass for 100 leaves or 1000 needles and exchangeable ion concentrations or soil pools. Are indicated: the % of significant linear regressions at 10 % by element and type; the best R², the corresponding tree species to the best R², and the corresponding soil depth.*

Eléments	Types de relation															
	[] foliaire / [] sol				[] foliaire / stock sol				Minéralomasse ^{100f (1000a)} foliaire / [] sol				Minéralomasse ^{100f (1000a)} foliaire/stock sol			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
N	25,0	[0,811	DOU	0-10]	33,7	[0,820	CHP	LFH]	12,5	[0,365	CHS	0-10]	5,0	[0,390	CHS	0-10]
Ca	41,6	[0,808	HET	0-10]	47,9	[0,830	SP	20-40]	54,2	[0,776	SP	20-40]	41,7	[0,725	HET	0-10]
Mg	37,5	[0,694	PS	10-20]	50,0	[0,744	PS	10-20]	33,3	[0,447	HET	20-40]	34,4	[0,543	HET	0-40]
K	16,6	[0,359	CHS	20-40]	20,8	[0,547	CHS	0-40]	12,5	[0,391	CHP	20-40]	29,2	[0,401	CHS	10-40]

(1) pourcentage de régression significative à au moins 10 % par rapport au nombre de régression calculées, (2) pour chaque élément, le meilleur R², (3) essence correspondant au meilleur R², (4) couche de sol correspondant au meilleur R².

Les relations entre les éléments foliaires et les mêmes éléments dans le sol dépendent de l'essence (**Tableau 25**, p.105). D'un côté, le chêne sessile présente presque systématiquement des corrélations significatives pour l'azote, le calcium, le magnésium, et le potassium, quel que soit le type de relation considérée (teneur ou minéralomasse^{100f (1000a)} foliaire, et teneur ou stock dans le sol). Le chêne pédonculé présente également des corrélations significatives pour chacun de ces éléments, mais pas pour tous les types de relation.

Tableau 25: Récapitulatif par essence et par élément des régressions entre éléments foliaires et éléments dans le sol significatives à au moins 10 % pour au moins un niveau dans le sol.

Table 25: Summary of the regressions between foliar nutrients and corresponding elements in the soil for each species and each element. A cross indicates that for at least one depth in the soil, a regression significant to at least at 10 %.

Essences	Azote				Calcium				Magnésium				Potassium				
	Cf/C c	Cf/S	M/C	M/S	Cf/C c	Cf/S	M/Cc	M/S	Cf/C c	Cf/S	M/Cc	M/S	Cf/C c	Cf/S	M/Cc	M/S	
Chêne pédonculé	+	+					+	+				+	+			+	+
Chêne sessile		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hêtre					+	+	+	+	+	+	+	+					
Pin sylvestre		+	+		+	+	+		+	+							
Pin maritime	+	+					+		+	+							
Sapin	+				+	+		+							+		+
Douglas	+	+	+										+				
Epicéa	+		+						+		+						

+ corrélations significatives à au moins 10 % avec au moins un niveau dans le sol. C (Teneurs foliaire Cf, ou dans le sol Cc), S (Stocks dans le sol), M (Minéralomasses^{100f (1000a)} foliaires).

Toutes les autres essences présentent des corrélations significatives pour seulement certains de ces éléments, et pour certains types de relations, excepté dans le cas du hêtre où l'on observe des corrélations systématiques pour le calcium et le magnésium. L'absence de corrélation significative dans le cas du calcium pour l'épicéa pourrait résulter d'un échantillonnage foliaire déséquilibré. Des corrélations significatives trouvées dans ce cas n'ont pas été retenues car elles étaient dues à seulement deux placettes sur les 11 du réseau.

Les meilleures régressions obtenue sur le réseau pour chaque élément sont regroupées ci-dessous (**Figure 18**, p.106). L'ensemble des placettes se situe au-dessus de la teneur optimum pour l'azote, au-dessus du seuil critique pour le potassium et le calcium, et une placette de pin sylvestre se situe entre le seuil de carence et le seuil critique pour le magnésium. Ces observations résultent du choix initial des placettes. La mise en évidence d'une dégradation éventuelle de la santé des forêts nécessitait *a priori* de commencer les observations sur des placettes ne présentant pas de signe évident de carence.

1.8. Discussion et conclusion

La compréhension des résultats présentés ci-dessus pose un certain nombre de questions qui peuvent être regroupées en deux types principaux. On peut tout d'abord se demander quelle est la validité des relations observées. Après une confrontation avec les données disponibles dans la littérature, une discussion sur le choix des paramètres chimiques (et sous quelle forme) retenus pour expliquer les variations de nutriments foliaires s'impose. La question de la représentativité spatiale des analyses chimiques dans le sol est également sujette à discussion. Si l'on peut raisonnablement admettre que les corrélations observées traduisent valablement les relations entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol, d'autres facteurs doivent être pris en compte pour interpréter la part de variabilité encore importante des nutriments foliaires qui reste non expliquée. Bien plus qu'une

connaissance théorique, la quantification relative des différentes sources de variabilité des nutriments foliaires permet d'apprécier la gravité d'un problème nutritionnel chez les arbres. En effet, l'interprétation d'un tel problème détecté par des analyses foliaires (carence, toxicité ou déséquilibre entre nutriments) sera différente, et aura une gravité variable selon le rôle respectif joué par les différents facteurs.

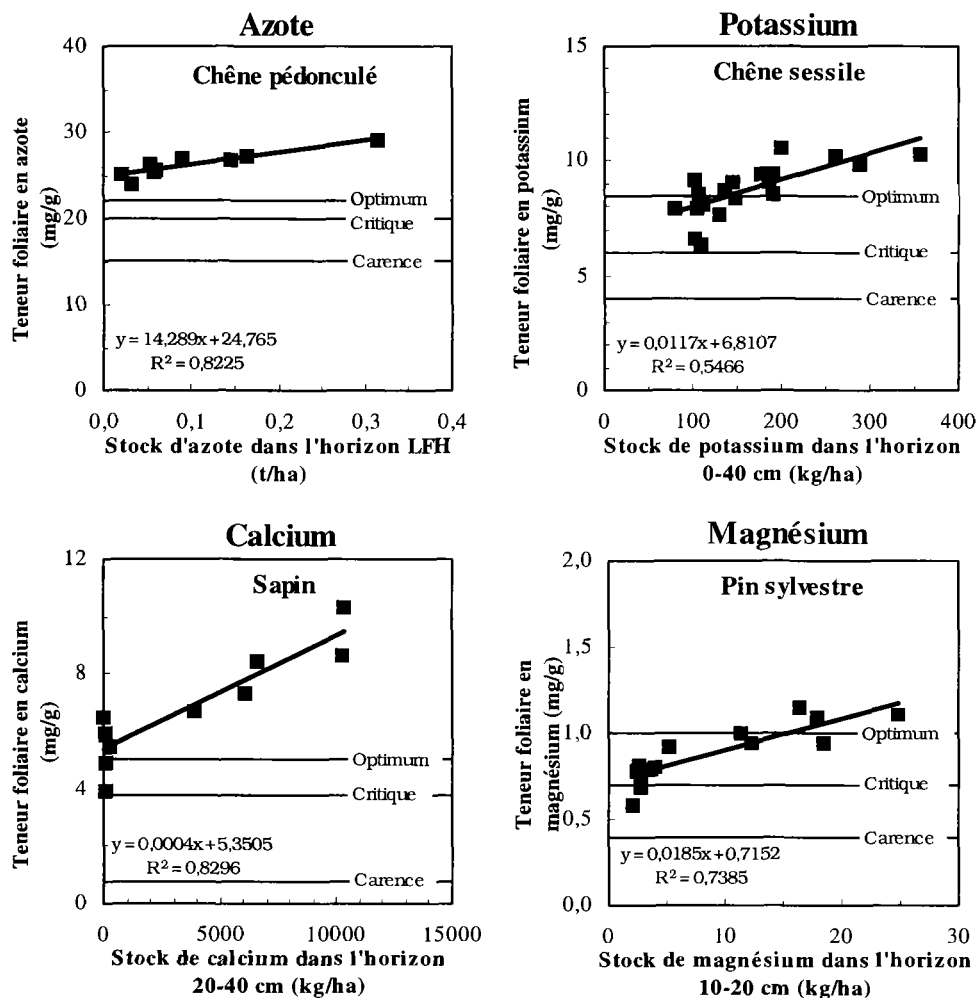


Figure 18: Meilleures régressions linéaires entre les nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les stocks d'éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour l'azote, le potassium, le calcium, et le magnésium. Les seuils indicatifs de carence, critique et optimum sont également indiqués.

Figure 18: Best linear regressions between the foliar nutrients (means 1993-1997) and exchangeable ion in the soil pools (1993-1995 analysis) for N, K, Ca and Mg. French thresholds for foliar nutrients are also reported. (Deficiency, critical and optimum thresholds).

Une carence due par exemple à une désaturation et à une acidification des sols sera plus grave et durable qu'une carence due à une disponibilité réduite en éléments minéraux lors d'une sécheresse ponctuelle. Cette dernière situation sera plutôt considérée comme un épiphénomène sans risque réel pour la pérennité des peuplements tant qu'il ne se poursuit pas pendant plusieurs années et tant qu'il ne coïncide pas avec une désaturation et une acidification des sols. Un exemple de combinaison de facteurs de ce type est donné par la carence magnésienne détectée dans les Vosges en 1982-83, sans doute à la faveur d'une contrainte climatique. Cette carence persiste actuellement au moins partiellement alors qu'elle était inexistante avant 1982.

1.8.1. *Nutriments foliaires et éléments dans le sol: intensité des relations?*

Si la nutrition minérale des arbres est reliée de manière évidente à la richesse minérale du sol et au type de roche mère (Landmann et al., 1995), des études passées et nos résultats montrent que les relations entre les nutriments dans les feuilles, et les mêmes éléments dans le sol sont généralement peu étroites. Les premiers résultats obtenus dans le cadre du réseau RENECOFOR montrent que pour les relations significatives à au moins 10 % entre les teneurs foliaires, et les stocks d'éléments dans le sol, en moyenne 46 % de la variance totale des éléments dans les feuilles est expliquée par la régression pour l'azote et le magnésium, 48 % pour le potassium, et 56 % pour le calcium. Ces valeurs moyennes masquent en fait des différences importantes selon (1) les essences, (2) le mode d'expression des résultats (teneur ou minéralomasse^{100f (1000a)}, teneur ou stock dans le sol), et (3) la couche de sol considérée. On constate par exemple pour l'azote que les corrélations entre les teneurs foliaires et les stocks dans le sol (**Tableau A 20**, p.192) peuvent être importantes dans le cas du chêne pédonculé (R^2 au maximum de 0,82) et beaucoup plus faibles dans le cas du chêne sessile (R^2 au maximum de 0,21). Dans le cas du calcium les corrélations entre les teneurs foliaires et les stocks dans le sol sont moyennes pour le chêne sessile (R^2 au maximum de 0,48) alors qu'elles sont beaucoup plus fortes pour le hêtre (R^2 au maximum de 0,81).

L'utilisation de la minéralomasse^{100f (1000a)} ne semble pas être un paramètre pertinent pour évaluer les relations avec les teneurs et les stocks d'éléments minéraux dans le sol. Nous avons en effet montré que ces relations sont nettement moins étroites que celles basées sur les teneurs foliaires en nutriments. Ce résultat peut s'expliquer par la variabilité plus importante de la minéralomasse^{100f (1000a)} par rapport à celle des teneurs foliaires.

Relativement peu d'études portant sur les relations entre les nutriments foliaires et les caractéristiques minérales du sol ont été trouvées dans la littérature. Le plus souvent ces études se sont intégrées à des problèmes de dépérissement forestier dans lesquels des carences minérales (ou plus rarement des phénomènes de toxicité) étaient suspectées. Ces relations sont plus documentées pour les résineux (surtout l'épicéa mais aussi le sapin) que pour les feuillus (hêtre, chênes).

Dans le cadre du programme DEFORPA, Landmann et al. (1995) n'ont montré aucune relation étroite entre les niveaux de potassium dans le sol et celui dans les feuilles, aussi bien pour l'épicéa que pour le sapin. Des résultats semblables ont été obtenus sur épicéa en Allemagne (Liu et Trüby, 1989, dans Landmann et al., 1995). Nos résultats concordent avec ces observations sur épicéa, mais pas entièrement avec celles sur le sapin. Pour cette dernière essence, si le potassium dans le sol est exprimé en teneur (cmol_c/kg), ni la teneur foliaire (mg/g) ni la minéralomasse^{1000a} (mg/1000 aiguilles) ne sont corrélées avec la teneur de cet élément dans le sol. Par contre si K est exprimé en stock (kg/ha) la teneur foliaire en K est corrélée positivement au K dans le sol (R^2 compris entre 0,35 et 0,62 selon la couche de sol considérée). D'autre part, Schulze et al. (1989) ont obtenu une relation significative ($R^2 = 0,69$; $P = 0,005$) en reportant la teneur en potassium foliaire ($\mu\text{mol/g}$) en fonction du potassium dans la solution du sol (mmol/l) en étudiant deux parcelles: une en bon état sanitaire et l'autre fortement dépérisante. Malgré le nombre réduit de placettes étudiées dans ce travail ($n = 9$), il semblerait que la disponibilité réelle du potassium pour les arbres soit mieux évaluée par le dosage de cet élément dans la solution du sol que dans l'humus ou les couches minérales. En ce qui concerne le magnésium foliaire et le magnésium échangeable dans le sol d'une part, et le calcium foliaire et le calcium échangeable dans le sol d'autre part, Landmann et al. (1995) ont mis en évidence des corrélations positives chez l'épicéa et parfois chez le sapin. Les relations entre le magnésium foliaire et le magnésium échangeable dans le sol étaient plus étroites avec l'horizon A1 qu'avec l'horizon B. Nos résultats sur épicéa sont cohérents avec ces observations pour le magnésium si l'on prend en compte les relations établies entre le magnésium foliaire (teneur ou minéralomasse^{1000a}) et les teneurs en magnésium dans le sol. On note également que le magnésium

foliaire est corrélé au magnésium échangeable dans les couches de surface (0-10 cm) et qu'il ne l'est plus en dessous. Contrairement aux résultats de Landmann et al. (1995), nous n'avons mis en évidence aucune relation entre le magnésium foliaire et le magnésium échangeable dans le sol pour le sapin. En ce qui concerne le calcium, nos résultats ne permettent pas de conclure à l'existence de relations significatives entre les feuilles et le sol. Les relations obtenues n'ont pas été retenues bien que significatives, étant donné la présence de deux placettes présentant des teneurs en calcium dans le sol beaucoup plus élevées que dans l'ensemble des placettes d'épicéa. L'étude des relations entre les teneurs foliaires en magnésium, calcium, phosphore et en azote et les mêmes éléments dans la solution du sol n'a donné aucune corrélation significative sur des placettes d'épicéa (Schulze et al., 1989). Contrairement à ce qui a été suggéré pour le potassium, la disponibilité réelle en magnésium, calcium, phosphore et en azote dans le sol ne semble pas être mieux évaluée dans la solution du sol que dans l'humus ou dans les couches minérales.

Hendricks et al. (1994) se sont intéressés aux relations entre les nutriments foliaires et ces éléments dans le sol pour 5 résineux (le pin sylvestre, le pin noir, le douglas, l'épicéa et le mélèze du japon), et deux feuillus (le hêtre et le chêne pédonculé) dans le cadre de l'étude de l'impact des dépôts atmosphériques sur les forêts au Pays-Bas. Pour expliquer les variations des teneurs foliaires en nutriments, ils ont testé de nombreux facteurs tels que l'essence, l'âge, la hauteur des arbres, les dépôts atmosphériques en différents éléments, des teneurs en éléments dans la litière, dans les horizons minéraux, dans la solution du sol, et certains rapports importants entre éléments dans le sol. Cette approche ne permet pas de comparaison directe avec nos résultats car le pouvoir explicatif de chaque facteur retenu dans leurs modèles n'est pas séparé de celui du modèle global. En procédant par régression multiple, ces auteurs ont montré le rôle important de l'essence pour interpréter les variations foliaires en azote, phosphore, potassium, calcium, et magnésium. A l'exception du calcium, aucune liaison directe avec les éléments dans l'humus ou dans les horizons minéraux du sol n'a été mise en évidence. Dans la solution du sol, les éléments (corrélations positives avec NH_4 pour l'azote foliaire, et K pour le potassium foliaire), ou certains rapports entre éléments (corrélations négatives, avec N/P pour le phosphore foliaire, et N/Mg pour le magnésium foliaire) étaient plus liés aux teneurs foliaires en nutriments. Dans cette étude, jusqu'à 77 % de la variabilité de la teneur foliaire en nutriment a été expliquée avec trois variables explicatives: l'essence, le contenu en métaux lourds (Pb, Zn, et Cd) dans l'humus, et le rapport N/Mg dans l'humus pour le magnésium foliaire. Les teneurs foliaires en azote dépendent à la fois de l'essence et de la concentration en NH_4 dans la solution du sol (70 % de la variation expliquée), les teneurs en phosphore foliaire dépendent de l'essence, du rapport N/P dans l'humus, et des métaux lourds dans l'humus ou du rapport NH_4/P dans la solution du sol (41 ou 42 % de la variation du phosphore foliaire expliquée). Le potassium foliaire dépend à la fois de l'essence et du potassium dans la solution du sol (51 % de la variation du potassium foliaire expliquée), et la teneur en calcium foliaire dépend selon Hendricks et al. (1994) de l'essence, du calcium dans l'humus et les horizons minéraux du sol (67 % de la variation du calcium foliaire expliqué).

Dans une étude sur les hêtraies du nord-est de la France, Duquesnay (1998) a montré que les teneurs foliaires en calcium, et en magnésium étaient corrélées positivement avec la teneur des mêmes éléments dans l'horizon A1 du sol (R^2 compris entre 45 et 50 % selon les années). Ces résultats sont parfaitement concordants avec ceux obtenus dans le réseau RENECOFOR. Par contre, aucune relation significative entre le potassium foliaire et le potassium dans le sol n'a été observé, ni par Duquesnay (1998), ni dans nos résultats. Une relation négative significative a été observée entre l'azote foliaire et l'azote dans l'horizon A1 par Duquesnay (1998), mais dans ce cas, seulement 8 % de la variabilité de l'azote foliaire sont expliqués. Nos résultats n'ont pas montré de corrélation significative pour l'azote.

Une approche plus globale des relations entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol (ou l'état du complexe absorbant) a été réalisée par Clüsener (1990) à l'échelle de la famille végétale (n = 15 familles), et en réunissant les données disponibles pour l'ensemble des pays du globe. Selon les familles, les teneurs de magnésium dans les feuilles ne semblent pas dépendre du magnésium échangeable dans le sol mais des teneurs en potassium ou en calcium dans les horizons supérieurs du sol. Les teneurs en calcium foliaire dépendent globalement du calcium, du magnésium et aussi du pH dans le sol. Enfin, le potassium foliaire semble être corrélé (positivement ou négativement selon les familles) avec les teneurs en potassium, en calcium, en magnésium et en azote dans le sol. Pour les familles qui nous intéressent plus particulièrement dans le réseau RENECOFOR, cet auteur montre chez les Fagacées une relation positive étroite entre le calcium foliaire et le calcium dans le sol. Nos résultats sont en accord avec cette relation. Dans sa synthèse, Clüsener (1990) montre également pour cette famille une relation significative entre le magnésium foliaire et le calcium dans le sol. Le calcium foliaire a aussi été relié significativement à la capacité d'échange cationique pour cette famille. Par contre, ni le potassium ni le magnésium foliaire n'ont été reliés de manière significative aux teneurs de ces éléments dans le sol. Nos résultats vont dans le même sens avec des relations significatives mais faibles. Toujours d'après Clüsener (1990), la famille des Pinacées semble présenter un comportement nettement différent de celui de Fagacées. Aucun des trois éléments foliaires (potassium, magnésium et calcium) ne semble être corrélé à la teneur de ces mêmes éléments dans le sol. Par contre, les teneurs foliaires en potassium semblent être négativement corrélées au carbone organique dans le sol, et positivement corrélées au pH. Le calcium foliaire semble positivement corrélé uniquement avec le carbone organique dans le sol. Nos résultats sont nettement différents, notamment pour le calcium et le magnésium que nous avons trouvé corrélés respectivement au calcium et au magnésium dans le sol entre 0 et 40 cm. Contrairement aux résultats de Clüsener nous n'avons cependant pas étudié les relations croisées entre les différents éléments dans le sol et dans les feuilles.

Il ressort globalement de ces résultats que quand elles existent, les relations entre les nutriments foliaires et les mêmes éléments dans le sol sont plutôt faibles, et parfois négatives pour certaines essences. Un retour critique sur la qualité des estimations des nutriments foliaires et des éléments échangeables dans le sol s'impose donc avant d'envisager d'autres sources de variabilité des nutriments foliaires.

1.8.2. Validité des relations et améliorations possibles

La représentativité des analyses des nutriments foliaires et des éléments dans le sol à l'échelle de la placette est une première condition pour obtenir des relations fiables entre ces deux paramètres pour une essence donnée. Différentes sources d'altération potentielles des relations entre les éléments minéraux dans le sol et leur teneur dans les feuilles peuvent être prises en compte. Ces sources peuvent être liées à des problèmes méthodologiques: variabilité intraplacette des teneurs foliaires et des éléments dans le sol, à des problèmes d'évaluation de la disponibilité réelle pour les arbres des éléments minéraux dans le sol, ou encore à des problèmes statistiques dus à des effectifs de placette trop réduits pour une essence donnée.

Au niveau des nutriments foliaires, la variabilité intraplacette résultant de l'échantillonnage de 8 arbres par placette de l'azote, du magnésium, du calcium, et du potassium conduit à une précision généralement comprise entre 10 et 20 % autour de la moyenne pour l'ensemble des essences (**Tableau A 16**, p.183). Pour l'azote, la précision est comprise entre 5 et 10 % chez le chêne sessile, le hêtre, le douglas, l'épicéa, le pin sylvestre, et le sapin pectiné. Cette gamme de précision peut donc être considérée comme très satisfaisante au niveau des nutriments foliaires. Si l'on s'intéresse à ces éléments dans les feuilles, il n'y a donc pas lieu d'augmenter le nombre d'arbres à échantillonner par placette. Au niveau du sol, la distribution hétérogène des éléments dans la rhizosphère peut

expliquer en partie la dispersion assez importante dans les relations entre les éléments foliaires et les mêmes éléments dans le sol (Landmann et al., 1995). Dans le cadre du réseau RENECOFOR, la variabilité intraplacette (latérale et verticale) des éléments dans le sol reste à évaluer avec le même indice de dispersion des valeurs autour de la moyenne: le coefficient de variation (CV). Une hétérogénéité dans la distribution des éléments entre les différentes couches de sol permettrait notamment d'expliquer les corrélations observées entre les nutriments foliaires et seulement certaines couches de sol. L'observation d'un gradient des éléments lié à la profondeur et associé à une variabilité différente pourrait également expliquer les corrélations plus étroites entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol en surface (par exemple le calcium pour le chêne sessile) ou en profondeur (par exemple le calcium pour le sapin). On note d'autre part que les relations établies avec les stocks d'éléments cumulés sur l'ensemble 0-40 cm ne conduisent pas à de meilleures relations avec les nutriments foliaires. Cela pourrait indiquer dans certains cas une absorption racinaire active au-delà de 40 cm.

Une autre source potentielle d'altération des relations entre les nutriments foliaires et les éléments échangeables dans le sol est liée à la technique d'analyse des éléments échangeables dans le sol qui peut dans certains cas surestimer les quantités réellement assimilables par les arbres. C'est notamment le cas du calcium échangeable dans des sols carbonatés. En présence de carbonates, l'extraction au BaCl_2 0,1 M des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) peut provoquer une solubilisation des carbonates de calcium (CaCO_3), ou de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), et entraîner une surévaluation du calcium et dans une moindre mesure du magnésium échangeable. Le problème se limite en fait au calcium, étant donné que (1) les sols sur dolomie ne sont pas représentés dans le réseau (Brêthes et Ulrich, 1997), et (2) le magnésium contenu dans les carbonates magnésiens est beaucoup moins sensible à l'extraction que le calcium (Brêthes comm. personnelle). La surévaluation du calcium échangeable concerne environ 20 % des placettes RENECOFOR présentes sur trois types de sol: (A) des rendzines et sols humo-calciques, (B) des rendzines brunifiées et sols peu évolués d'apport sur substrat carbonaté, et (C) des sols bruns eutrophes et sol bruns calciques (Ponette et al. 1997). Environ un tiers des placettes est situé sur des formations carbonatées : calcaires durs, sables ou alluvions calcaires, calcschistes (Brêthes et Ulrich, 1997). Du fait de la répartition géographique des placettes, les différentes essences ne sont pas affectées de manière identique par ce biais analytique. Les pourcentages de placettes situées sur matériaux carbonatés sont respectivement de 50 % pour le sapin pectiné (sur un total de $n = 11$ placettes), 35 % pour le hêtre ($n = 20$), 30 % pour le pin maritime ($n = 7$) et 20 % pour le chêne pédonculé et le mélange pédonculé sessile ($n = 11$), et l'épicéa ($n = 11$). Aucune placette de chêne sessile, de douglas et de pin sylvestre n'est installée sur substrat carbonaté. En pratique, il s'avère que ce biais est vraisemblablement faible dans le cadre du réseau RENECOFOR. En effet, parmi les 4 relations entre les teneurs foliaires en calcium et le calcium échangeable dans le sol, où l'on observe des teneurs en calcium échangeable "anormalement" élevées, seulement une placette (EPC 39a) est sur sol carbonaté et peut donc présenter une teneur en calcium échangeable surévaluée.

Le potassium dans le sol présente d'autres spécificités qui rendent difficile l'étude et l'interprétation des relations entre le potassium foliaire et le potassium échangeable dans le sol. En effet, le potassium échangeable dans le sol reflète assez mal la disponibilité réelle en potassium pour les arbres. Landmann et al. (1995) suggèrent que l'extraction du potassium au tetraphenyl-borate pourrait être plus adaptée. D'autre part, de faibles niveaux de potassium foliaire pourraient résulter plus d'un antagonisme entre K et Ca et/ou entre K et Mg que d'une faible teneur en potassium dans le sol. Il semble que les carences foliaires en potassium observées dans les Vosges et dans les Pyrénées résultent de cet antagonisme (Landmann et al., 1995). Dans le réseau RENECOFOR cet antagonisme pourrait expliquer des teneurs foliaires en potassium inférieures au seuil critique (cf. **Tableau 16**, p.61) pour deux placettes de hêtre: une dans l'Aisne, en forêt domaniale de Retz (HET 02), l'autre dans le Doubs en forêt domaniale de la Verrière du Grosbois (HET 25), et une

placette de sapin pectiné dans la Drôme en forêt domaniale de Lente (SP 26). Pour ces placettes on observe une fertilité moyenne en potassium (d'après Bonneau, 1995) et élevée en calcium et en magnésium. Par contre, une pauvreté en potassium échangeable dans le sol suffit pour interpréter des teneurs foliaires inférieures au seuil critique dans trois autres placettes (HET 76, HET 81, PM 40c). Deux placettes (HET 60 et PM 17) présentent de faibles teneurs foliaires en potassium qui pourraient correspondre à une pauvreté du sol en potassium aggravée par un antagonisme du à des teneurs élevées en calcium dans le sol.

Dans certains cas, des symptômes visibles dus à un dysfonctionnement physiologique dans l'arbre peuvent être enregistrés sans que les dosages des éléments totaux dans les feuilles ne mettent en évidence des problèmes nutritionnels. L'analyse de la forme soluble de certains éléments foliaires permet parfois d'interpréter ces dysfonctionnements (Bonneau, 1995). Le problème peut se rencontrer quand la proportion des formes solubles par rapport aux formes totales est faible. C'est notamment le cas pour le soufre, par contre pour le potassium ce rapport est normalement très élevé (Bonneau, 1995). Un excès ou une insuffisance des formes solubles par rapport aux formes totales peut entraîner des dysfonctionnements physiologiques tels qu'une difficulté d'élaboration des protéines quand l'azote soluble est en proportions trop élevée (Le Tacon, 1976; Clément et Gessel, 1985; in Bonneau, 1995), ou une carence en fer liée à la chlorose en sol calcaire pour des essences non calcicoles si le fer ferreux est en quantité trop faible (Zech, 1970; Katyal et Sharma, 1980; in Bonneau, 1995). Cet aspect du problème n'est pas pris en compte actuellement dans le cadre du réseau RENECOFOR: toutes les analyses foliaires fournissent les éléments totaux. Cependant, il est vraisemblable que le problème ne se pose pas sur le réseau car très peu de symptômes de coloration anormale des feuilles ou des aiguilles ont été rapportés jusqu'à présent.

D'un point de vue purement statistique, le nombre réduit de placettes par essence, (n est compris entre 6 pour le douglas, et 20 pour le hêtre, exception faite du mélèze: 1 placette, et du pin laricio: 2 placettes) augmente fortement le risque d'apparition de deux types d'erreurs. Le premier revient à déclarer une relation significative alors qu'elle ne l'est pas (échantillonnage trop limité, et mauvaise représentativité des placettes). Le deuxième est de déclarer une relation non significative alors qu'elle l'est (échantillonnage trop limité). Deux solutions sont envisageables. La première serait d'augmenter le nombre de placettes par essence en utilisant les placettes du réseau européen, mais dans ce cas les stratégies d'échantillonnage doivent être homogénéisées pour les analyses foliaires et les éléments chimiques dans le sol. La deuxième possibilité serait de regrouper les essences par famille comme le suggère Clüsener (1990) pour analyser les corrélations entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol. Deux familles sont représentées dans les essences dominantes des placettes du réseau: les Fagacées (Chênes, et Hêtre), et les Pinacées (les Pins, le Douglas, l'Epicéa, le Mélèze, et le Sapin). Dans ce cas le regroupement en familles correspond également à la séparation entre les feuillus et les résineux. Ce regroupement montre que le calcium foliaire est bien corrélé aux variations du calcium échangeable dans le sol: environ 57 % et 73 % de la variabilité est expliquée par le modèle pour respectivement les résineux et les feuillus (**Tableau A 21**, p.194). L'azote dans l'humus et le magnésium dans tout le profil prospecté expliquent environ 37 % de la variabilité des teneurs en azote et en magnésium foliaire chez les résineux. Le potassium dans le sol n'explique qu'environ 14 % de la variabilité des teneurs en potassium foliaire chez les conifères et les feuillus. L'azote foliaire est très faiblement corrélé à l'azote dans les couches minérales chez les feuillus. Les stocks d'éléments dans le sol permettent généralement d'expliquer un pourcentage de variation des éléments dans les feuilles moins important que les teneurs, notamment chez les Pinacées.

Il semble finalement assez improbable que les relations peu étroites entre les éléments minéraux dans le sol et les teneurs en nutriments foliaires puisse être fortement améliorées en tenant compte des sources de variabilité exposées ci-dessus. Des facteurs autres que techniques ou statistiques

doivent donc être considérés, en particulier le rôle variable des transferts internes dans l'arbre selon l'âge des arbres, le rôle des mycorhizes et le rôle des facteurs du milieu: disponibilité en eau et température.

1.8.3. Autres variables explicatives

Dans le paragraphe qui précède, aucun rôle actif n'a été envisagé pour l'arbre et il était implicitement supposé que l'intégralité des éléments minéraux nécessaires à l'élaboration de la biomasse provient du flux d'altération dans le sol. Or l'arbre n'est pas un simple élément passif de transfert des éléments minéraux entre le sol et les feuilles et un point d'accumulation de biomasse; il est le siège de transferts internes importants qui peuvent lui conférer une relative autonomie par rapport au compartiment "sol". Ces phénomènes de transfert augmentent avec l'âge des arbres comme cela a été observé pour l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium dans les troncs d'un taillis de châtaignier au cours d'une rotation entre 2 et 19 ans (Colin-Belgrand et al., 1996). L'ordre de grandeur de ces transferts ou remobilisations internes dépend fortement des éléments; il a été évalué dans la même étude à 60 % du total immobilisé pour le potassium, 25 % pour l'azote et seulement 10 % pour le calcium. Des résultats similaires ont été montrés sur épicéa par Dambrine et al., 1991. Ces résultats suggèrent que les relations entre les nutriments foliaires et les éléments minéraux dans le sol sont plus étroites chez de jeunes arbres que chez des arbres plus âgés. Les arbres "objectifs" du réseau RENECOFOR ont des âges moyens par placette compris entre 60 et 120 ans pour les chênes et les hêtres, et entre 20 et 80 ans pour les résineux (exception faite des peuplements de sapin pectiné, qui sont globalement aussi âgés que les peuplements de feuillus) (Cluzeau et al., 1998). Cette distribution des âges sur le réseau n'est donc pas favorable à l'obtention de relations étroites entre les nutriments foliaires et les éléments minéraux dans le sol. D'autre part, les meilleures corrélations entre les teneurs foliaires et les teneurs dans le sol que nous avons observées concernent le calcium qui serait justement l'élément le moins concerné par les remobilisations internes. A l'opposé, l'azote et le potassium sont beaucoup plus affectés par les remobilisations internes et ces éléments présentent des corrélations beaucoup plus faibles entre teneur foliaire et teneur dans le sol. Une autre conséquence de l'augmentation des phénomènes de transferts internes de nutriments avec l'âge des arbres, c'est à dire l'augmentation de l'autonomie des arbres vis-à-vis des éléments minéraux du sol avec l'âge repose dans l'évaluation des seuils indicatifs de carence dans le sol. Une station donnée peut être considérée comme bien fertile d'après une relation entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol établie sur un peuplement adulte, alors qu'en fait elle peut ne pas l'être suffisamment pour les jeunes plants de régénération. Ce phénomène pourrait expliquer un certain nombre de cas de régénérations forestières difficiles.

L'alimentation minérale des arbres n'est pas sous la seule dépendance de la disponibilité de ces éléments dans le sol et des remobilisations internes, elle dépend également de l'activité biologique du sol, elle-même liée à l'activité mycorhizienne dans la sphère racinaire. Ainsi, le découplage entre la teneur en azote du sol et la teneur d'azote foliaire est fortement dépendante de l'activité mycorhizienne (Duquesnay, 1998). Ce facteur est susceptible d'orienter efficacement la nutrition minérale des arbres selon le cortège mycorhizien, sa densité et son activité liée, entre autre, à la disponibilité en eau dans la sphère racinaire. Toutefois, aucune mesure n'a été réalisée dans le cadre du réseau RENECOFOR pour apprécier cette activité mycorhizienne et par conséquent son rôle éventuel dans le découplage entre les teneurs en éléments minéraux dans le sol et les teneurs des mêmes éléments dans les feuilles.

D'autres facteurs tels que les conditions climatiques, en particulier la disponibilité en eau et la température peuvent également jouer un rôle important vis-à-vis de ce découplage en augmentant la variabilité interannuelle des teneurs foliaires en nutriments. Les facteurs climatiques exercent une action à la fois sur la libération des éléments dans le sol et sur leur absorption par les arbres

(Bonneau, 1995). Ainsi, les années sèches peuvent se caractériser par de faibles teneurs en éléments nutritifs. Hunger (1970) a mis en évidence dans une pessière de 70 ans une baisse de concentration en phosphore au cours de l'année sèche de 1949. Par contre, cet auteur a montré une diminution du magnésium en année humide (*in* Bonneau 1995). Hippeli et Branse (1992) ont montré chez des pins que des précipitations importantes et des températures élevées pendant la saison de végétation correspondaient à des teneurs foliaires élevées en azote, phosphore, calcium et magnésium. Dans une étude sur le hêtre, Duquesnay et al. (*in press*) ont suggéré que les teneurs foliaires en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium étaient plus faibles en 1996 qu'en 1997 du fait des précipitations réduites en 1996 (34 % en dessous de la moyenne entre 1961 et 1990). Dans une étude sur les variations de teneur foliaire en azote dans des forêts de feuillus et des forêts de résineux selon un gradient climatique en Amérique du nord, Yin (1993) a mis en évidence une relation négative significative ($R^2 = 0,69$) entre les teneurs foliaires en azote dans des forêts de feuillus ($n = 49$) et les températures moyennes en juillet. Des corrélations significatives mais moins fortes ont également été obtenues dans cette étude avec la moyenne annuelle de température ($R^2 = 0,51$). Pour les forêts de résineux, des relations significatives ont été mises en évidence dans la même étude entre les teneurs en azote foliaire et la température moyenne annuelle ($R^2 = 0,65$) et la température moyenne en janvier ($R^2 = 0,61$). Cette dernière relation montre qu'en dessous d'une valeur moyenne de -15 °C les teneurs foliaires en azote diminuent sensiblement. Des études similaires basées sur l'étude de transects ont montré des relations positives entre (1) les teneurs foliaires en azote et les précipitations pour le chêne kermès et (2) les teneurs foliaires en phosphore et les précipitations pour le chêne vert en Espagne (Castro-Díez et al., 1997). Ces résultats montrent à la fois la difficulté pour interpréter les analyses foliaires indépendamment des paramètres climatiques et la nécessité de connaître le plus précisément possible la variabilité interannuelle des teneurs foliaires. L'étude des relations entre les conditions climatiques et les teneurs en nutriments foliaires est prévue dans le cadre du réseau RENECOFOR grâce aux données acquises dans le sous-réseau météorologique (Ponette et al., 1996) mais actuellement, les couples de données: météorologiques / analyses foliaires sont trop peu nombreux pour tester cette relation.

Enfin, l'observation de relations globalement peu étroites entre les teneurs foliaires en nutriments et les mêmes éléments dans le sol pourrait s'expliquer simplement par l'absence actuelle de carence en nutriments bien marquée sur le réseau. On se situerait en fait dans la gamme de teneur en éléments minéraux du sol non limitante pour la nutrition des arbres. On constate en effet le plus souvent que la gamme des teneurs en éléments minéraux dans le sol est large tandis que les teneurs foliaires sont comparativement moins variables autour de la moyenne (à l'exception du calcium chez le hêtre et l'épicéa). D'autre part, les analyses de sol ne révèlent pratiquement pas de carence évidente dans le sol pour l'ensemble des placettes (Ponette et al., 1997). L'usage de seuils de fertilité pour le sol doit cependant être considéré avec précaution, à cause (a) des problèmes de représentativité spatiale des analyses de sol, (b) des méthodes d'analyse pouvant être différentes pour un même élément (Ponette et al., 1997). Ces seuils peuvent également varier avec (c) les propriétés du sol ("force" du complexe absorbant), et (d) l'essence (Bonneau, 1995). La comparaison des teneurs foliaires en nutriments aux seuils indicatifs de carence montrent également que peu de placettes du réseau présentent actuellement des problèmes nutritionnels. Cette observation est directement liée au choix initial des placettes dont l'un des critères de sélection était une apparence saine des peuplements et leur situation dans des conditions écologiques ni très favorables ni très défavorables.

1.8.4. Conclusions

Les relations entre les nutriments foliaires et les éléments dans le sol apparaissent finalement peu étroites et rejoignent en ce sens un certain nombre de résultats cités dans la littérature. Ces

conclusions attirent l'attention sur la complexité du cycle biogéochimique qui intègre les mécanismes dans lesquels la plante intervient largement, les apports atmosphériques et les pertes d'éléments par drainage. Autrement dit, le statut nutritionnel des arbres ne dépend pas uniquement de la fertilité instantanée du sol exprimée qualitativement (concentration) ou même quantitativement (quantité d'élément pour une profondeur donnée de sol) mais également d'autres facteurs tels que l'assimilation proprement dite des éléments, leur redistribution interne dans les arbres et les conditions climatiques.

Avant d'envisager d'autres facteurs explicatifs, il est important de souligner le nombre trop réduit de placettes pour certaines essences qui limite fortement la possibilité de mettre en évidence des relations significatives. C'est en particulier le cas pour le douglas ($n = 6$), et le pin maritime ($n = 7$). Pour ces essences il serait souhaitable d'augmenter le nombre de placettes suivies, éventuellement en utilisant certaines placettes du réseau européen.

Un des enjeux actuel du réseau RENECOFOR dans le domaine des analyses foliaires est de mieux comprendre l'importance relative des différents facteurs impliqués dans le déterminisme du statut nutritionnel des arbres. D'après les données de la littérature, le facteur climatique (pluviosité et température) semble être en mesure d'expliquer une part importante de la variabilité interannuelle des teneurs foliaires en nutriments. Cependant les études portant sur ces relations reposent le plus souvent sur la méthode des transects qui revient à utiliser des données collectées sur des forêts réparties le long d'un gradient en latitude. Cette technique est utilisée faute de disposer de séries suffisamment longues d'analyses foliaires. Les mesures réalisées dans le sous-réseau météorologique forestier depuis 1995 permettront d'ici quelques années d'évaluer directement ces relations. Cette approche ne devra pas être menée indépendamment de l'étude des autres facteurs de variabilité de teneurs foliaires en nutriments mais simultanément, notamment à l'aide d'analyses en régression multiple.

2. Défoliation et nutriments foliaires

2.1. Introduction

Les notations de l'aspect des houppiers réalisées entre 1994 et 1997 sur le réseau RENECOFOR (**Figure 19**), à l'image de celles relevées depuis 1989 sur le réseau Européen de suivi des dommages forestier (Nageleisen, 1998) montrent une nette progression des déficits foliaires depuis 1995. Cependant, cette évolution ne traduit pas strictement une aggravation des niveaux de défoliation à l'échelle de la France, mais reflète également, pour une part significative mais difficile à évaluer, les changements méthodologiques des notations adoptés progressivement entre 1995 et 1997 (voir Nageleisen, 1998; Landmann et al., 1998 pour une discussion critique de ce problème). Malgré ce biais, on peut penser que le déficit foliaire a réellement augmenté en France depuis 1995. Dès lors se pose la question de l'interprétation de cette évolution. L'âge, les facteurs climatiques (éventuellement différés), les facteurs biotiques, la pollution atmosphérique constituent autant de facteurs pouvant jouer un rôle négatif sur la défoliation (Nageleisen, 1998). Une nutrition minérale insuffisante, ou au contraire des phénomènes de toxicité peuvent également jouer un rôle dans l'augmentation des déficits foliaires. Jusqu'à récemment, l'absence de série d'observations sur une période suffisamment longue des déficits foliaires et des nutriments foliaires ne permettait pas d'étudier de manière statistique la relation entre ces paramètres. Les mesures réalisées sur le réseau RENECOFOR offrent cette possibilité sur la période comprise entre 1993-1997.

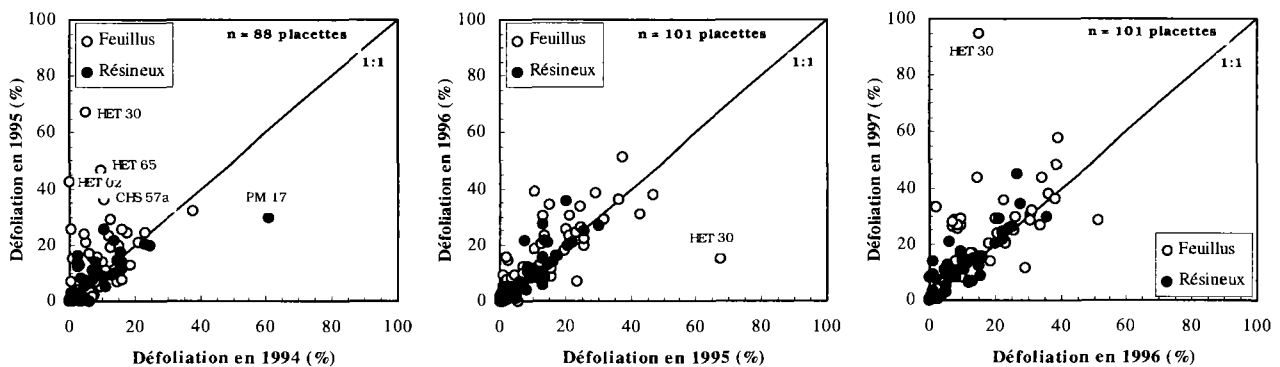


Figure 19: Evolution du pourcentage de défoliation moyen par placette entre 1994 et 1997 sur le réseau RENECOFOR.

Figure 19: Changes in the percentage of mean defoliation between 1994 and 1997 in the RENECOFOR plots.

L'évolution naissante des déficits foliaires en France depuis 1995 représente une conjoncture favorable pour étudier les relations avec différents facteurs potentiellement explicatifs. L'étude de corrélation présentée ci-après va porter sur les relations entre le pourcentage de défoliation et les nutriments foliaires. Les relations avec le jaunissement des feuilles ne sera pas abordé étant donné que, sur la période considérée, ce paramètre est resté à un niveau négligeable.

Les relations entre la défoliation et chacun des 13 nutriments foliaires analysés prennent en compte les défoliations moyennes par placette et par année des 8 arbres échantillon utilisés pour les analyses foliaires, et les moyennes annuelles par placette des nutriments foliaires.

Dans une première approche, les relations entre le pourcentage de défoliation, et les teneurs foliaires de la même année ont été étudiées. Cependant, l'impact différé dans le temps des nutriments

foliaires sur la défoliation étant envisageable, les relations entre les défoliations l'année (n) et les teneurs foliaires l'année (n-1) ont également été étudiées pour chaque élément foliaire.

Après la sélection des relations significatives, le positionnement des points par rapport à deux valeurs: (1) 25 % de défoliation et (2) le seuil de carence (lorsqu'il est défini) pour chaque élément foliaire permet d'interpréter les résultats.

2.2. Défoliation l'année (n) et nutriments foliaires l'année (n)

Dans leur ensemble, les relations entre le pourcentage de défoliation et les teneurs en nutriments foliaires la même année sont inexistantes sauf pour les cas regroupés ci-dessous (**Figure 20**, p.117). Selon les éléments et les essences ces relations peuvent être soit négatives, et faire alors penser à des phénomènes de carence, soit positives, et dans ce cas l'interprétation est plus difficile. Aucune relation pour aucune essence du réseau n'a été obtenue entre l'azote, le potassium, le soufre, le sodium, le fer, le chlore ou le cuivre foliaire et le pourcentage de défoliation évalué la même année. Des résultats similaires pour l'azote et le potassium ont été obtenus dans les Vosges sur épicéa et sapin (Landmann et al., 1995). Dans le cas du chêne sessile, du hêtre, du sapin, et du pin sylvestre, aucune relation significative n'a été mise en évidence. Cette absence de relation pourrait résulter dans le cas du pin sylvestre de pourcentages de défoliation faibles (inférieurs à 25 %), alors que pour les autres essences ce n'est pas le cas. Mis à part deux régressions significatives du type $y = ax + b$, un ajustement logarithmique ou polynomial a expliqué une part plus importante de la variabilité de la défoliation.

Chêne pédonculé

Deux nutriments foliaires sont significativement corrélés à la défoliation, l'aluminium est corrélé négativement ($R^2 = 0,31$ ***), et le phosphore est corrélé positivement ($R^2 = 0,24$ **). La gamme de valeurs couverte par le pourcentage de défoliation est assez large, elle est comprise entre 0 et 50 %. Une teneur foliaire en aluminium d'environ 50 $\mu\text{g/g}$ correspond à un pourcentage de défoliation d'environ 25 %. Cette valeur pour l'aluminium pourrait donc indiquer un problème d'alimentation minérale pour le chêne pédonculé. Cependant, faute de données dans la littérature sur les seuils caractéristiques pour cet élément chez cette essence, aucune comparaison avec d'autres sources ne peut être faite. L'augmentation de la défoliation avec les teneurs foliaires en phosphore est assez difficile à comprendre, d'autant plus que la gamme de teneur observée correspond à l'intervalle autour des valeurs critiques (1,1 mg/g) et optimales (1,5 mg/g) pour cette essence.

Douglas

Le magnésium et le manganèse foliaire sont négativement corrélés au pourcentage de défoliation (respectivement $R^2 = 0,43$ *** et $R^2 = 0,38$ **). Dans le cas du manganèse, on remarque cependant que des pourcentages de défoliation nuls peuvent être observés sur l'ensemble de la gamme de teneur foliaire. Par contre, il est intéressant de noter qu'un pourcentage de défoliation d'environ 25 % semble correspondre approximativement au niveau critique de la teneur foliaire en magnésium (1 mg/g).

Pin maritime

Deux corrélations significatives sont observées, une corrélation positive avec le magnésium foliaire ($R^2 = 0,16$ *), et une corrélation négative avec l'aluminium foliaire ($R^2 = 0,51$ ***). La gamme de défoliation observée est relativement étendue, elle est comprise entre 0 et 60 %. Comme dans le cas du chêne pédonculé, on remarque qu'une défoliation d'environ 25 % semble correspondre à une teneur foliaire en aluminium d'environ 50 $\mu\text{g/g}$. Il semblerait donc que cette valeur marque un seuil pour une bonne alimentation minérale de cette essence. L'absence de seuil défini dans la littérature pour cette essence et cet élément ne permet pas de confronter ces résultats avec d'autres sources.

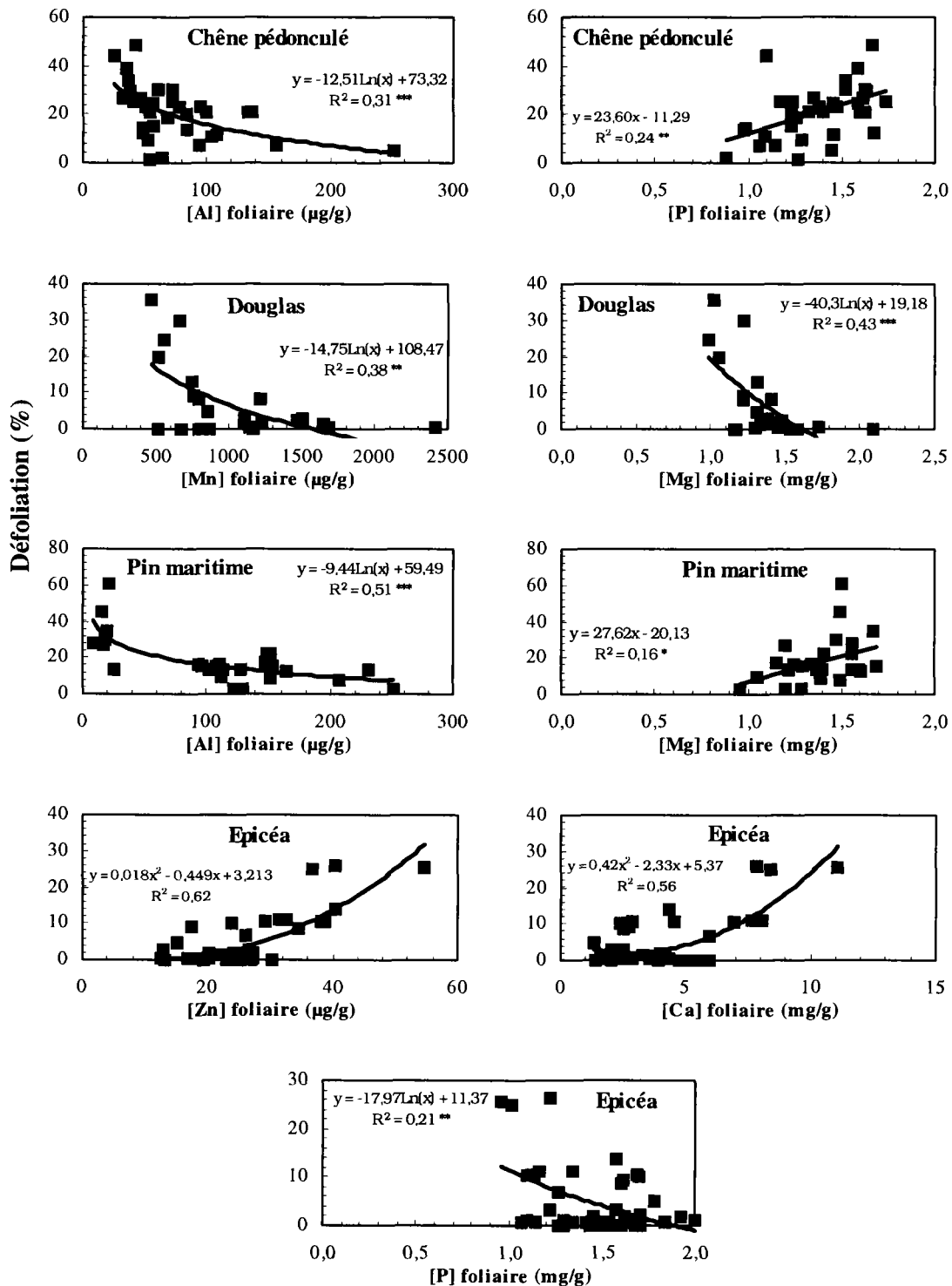


Figure 20:Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés la même année. Seuils de significativité: * P<5 %, ** P<1 %, et *** P<0,1 %.

Figure 20:Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients the same year. Significance: * P<5 %, ** P<1 %, and *** P<0,1 %.

Epicéa

Cette essence présente trois corrélations significatives. Selon une régression linéaire simple le calcium et le zinc foliaire sont positivement corrélés au pourcentage de défoliation ($R^2 = 0,42$ ***, et $R^2 = 0,54$ *** respectivement). Un ajustement polynomial du deuxième degré permet d'expliquer

une part encore plus importante de la variabilité de la défoliation (**Figure 20**, p.117). Le phosphore foliaire est négativement corrélé à la défoliation ($R^2 = 0,21$ **), on remarque cependant, comme dans le cas du manganèse chez le douglas, que des pourcentages de défoliation nuls peuvent être observés sur l'ensemble de la gamme de teneur dans les aiguilles. D'autre part, les pourcentages de défoliation maximum observés sur l'ensemble des placettes restent relativement modérés (≤ 30 %) ce qui limite d'autant la portée des relations mises en évidence.

2.3. Défoliation l'année (n) et nutriments foliaires l'année (n-1)

Les corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires l'année (n-1) sont reportées ci-dessous (**Figure 21**, p.118 et **Figure 22**, p.119). La première regroupe les cas pour lesquels une corrélation significative avait été mise en évidence avec les nutriments dosés la même année que les notations de défoliation.

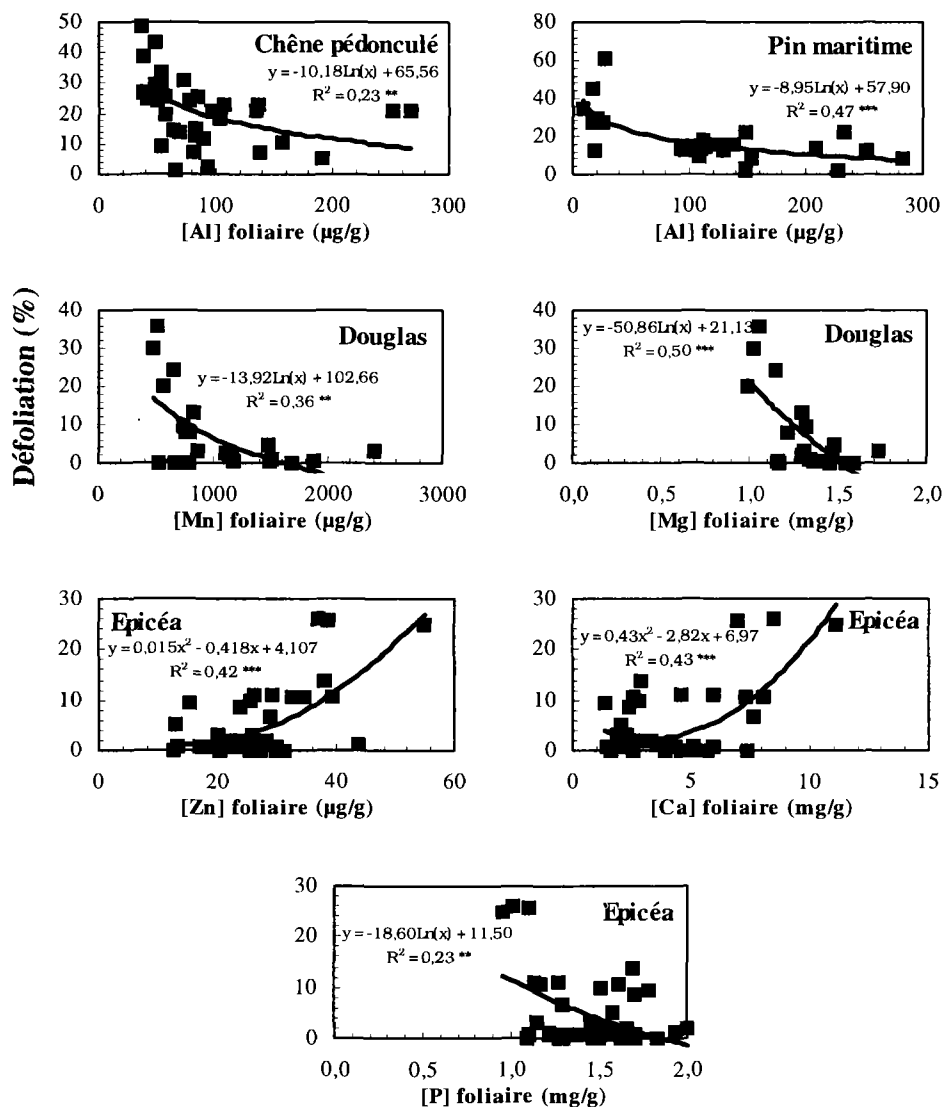


Figure 21:Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés l'année (n-1). Seuils de significativité: * $P < 5$ %, ** $P < 1$ %, et *** $P < 0,1$ %.

Figure 21:Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients analysed the previous year (n-1). Significance: * $P < 5$ %, ** $P < 1$ %, and *** $P < 0,1$ %.

La deuxième figure correspond aux cas pour lesquels les corrélations n'étaient pas significatives avec les nutriments dosés la même année que les notations de défoliation.

Parmi les 9 corrélations significatives obtenues entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires la même année, 7 sont également significatives si l'on considère les nutriments foliaires l'année (n-1). Les paramètres des équations sont également assez proches. Cependant le pourcentage de variation expliqué par les modèles est souvent légèrement plus faible avec les nutriments l'année (n-1). Seul, le cas du magnésium foliaire chez le douglas présente une tendance opposée ($R^2 = 0,50$ l'année n-1, et $R^2 = 0,43$ l'année n). On note d'autre part que les ordres de grandeur des teneurs foliaires restent proches entre les années (n) et (n-1).

Deux corrélations positives détectées avec les nutriments dosés l'année (n) ne se retrouvent pas avec les nutriments dosés l'année (n-1): le phosphore chez le chêne pédonculé et le magnésium chez le pin maritime. On remarque cependant que ces corrélations étaient déjà parmi les plus faibles avec les nutriments de l'année (n).

Les 6 nouvelles corrélations mises en évidence avec les nutriments foliaires de l'année (n-1) sont toutes négatives, et présentent des coefficients de détermination peu élevés (R^2 compris entre 0,15 et 0,27). Dans tous les cas ces relations concernent des résineux (Pin maritime, pin sylvestre, douglas, et épicéa). Trois macroéléments (N, P, K) et trois microéléments (Cu, Zn, et Mn) sont concernés.

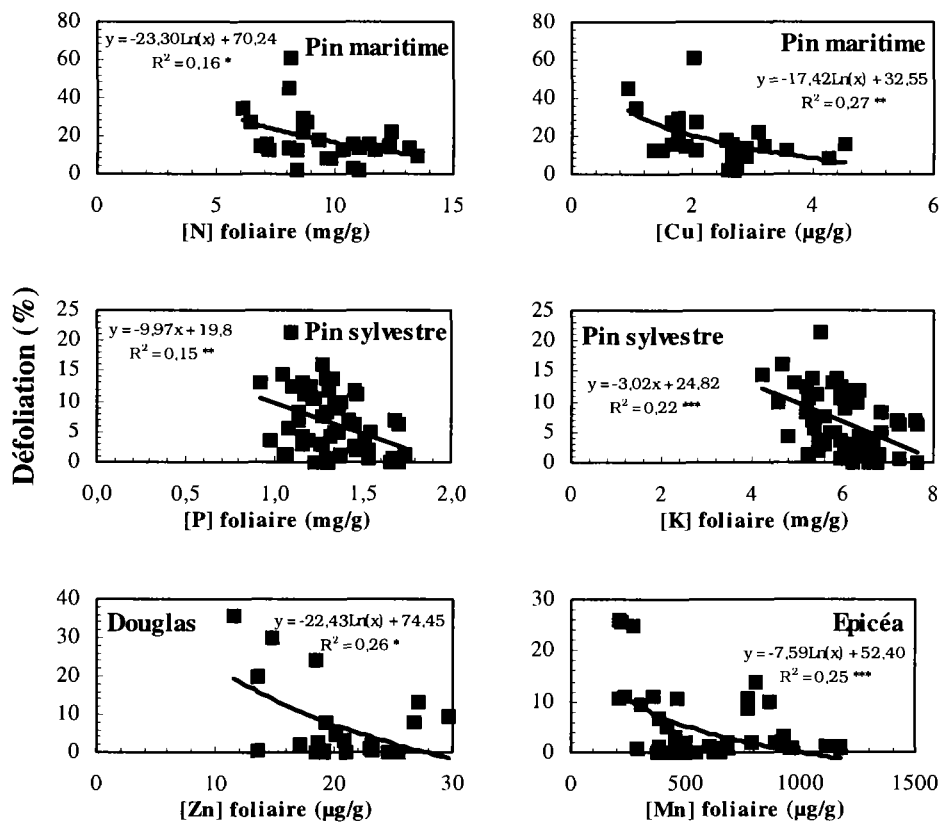


Figure 22:Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés l'année (n-1) pour les éléments non significatifs l'année (n). Seuils de significativité: * $P < 5\%$, ** $P < 1\%$, et *** $P < 0,1\%$.

Figure 22:Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients analysed the previous year (n-1) for nutrients not significant the given year (n). Significance: * $P < 5\%$, ** $P < 1\%$, and *** $P < 0,1\%$.

Etant donné les imprécisions d'estimation des pourcentages de défoliation, les valeurs inférieures à 25 % chez le pin sylvestre et l'épicéa remettent sérieusement en cause les relations observées. Chez le douglas, des défoliations maximales de 35 % permettent de considérer avec plus d'assurance la relation.

On remarque cependant dans ce cas que les défoliations les plus importantes sont observées pour des teneurs foliaires en zinc seulement légèrement inférieures au seuil critique. Les mesures des années à venir sont nécessaires pour mieux décrire ce domaine dans la relation. Dans le cas du pin maritime, la gamme de variation des défoliations est importante (de 0 à 60 %). Les défoliations les plus importantes correspondent aux teneurs foliaires en azote les plus faibles situées autour du seuil de carence pour cette essence (7 mg/g). On note d'autre part dans le cas du pin maritime que les peuplements fortement atteints de dépérissement dans les années 1960 étaient à des niveaux proches de la carence pour le cuivre (Bonneau communication personnelle).

2.4. Discussion et Conclusions

Cette première approche des relations entre les pourcentages de défoliation et les teneurs en nutriments foliaires rassemblés sur le réseau RENECOFOR a montré que globalement l'état nutritionnel est faiblement corrélé avec les variations de défoliations d'une année sur l'autre. Les liaisons les plus étroites (R^2 entre 0,43 et 0,62) ont été observées chez le pin maritime (aluminium foliaire), chez l'épicéa (zinc et calcium foliaire), et chez le douglas (magnésium foliaire). Si un problème de carence peut être envisagé chez le pin maritime et le douglas (corrélations négatives), on peut supposer des phénomènes de toxicité chez l'épicéa (corrélations positives).

Les nutriments foliaires analysés l'année précédant les notations de défoliation sont d'autre part généralement encore moins bien corrélés à la défoliation. Cela suggère qu'il n'existe pas d'arrière effet de l'état nutritionnel des arbres sur la défoliation.

On peut penser que la série de mesures encore trop réduite dans le temps, et l'absence de pourcentage de défoliation nettement au dessus de 25 % pour certaines essences peut expliquer en partie ces relations peu étroites. Il faut également rappeler que l'appréciation du pourcentage de défoliation est imprécise et vraisemblablement affectée d'arrière-effets. Cependant nos conclusions rejoignent en partie les observations réalisées dans les Vosges sur épicéa et sapin (Landmann et al., 1995). Par conséquent, le rôle d'autres facteurs non liés à la nutrition des arbres est vraisemblablement important. Parmi ces facteurs, trois sont souvent cités: l'âge, les facteurs climatiques, et les défoliateurs. Le pourcentage de défoliation augmente avec l'âge des arbres (Landmann et al. 1995). Cette relation assez générale pose un problème pour l'analyse des données étant donné la structure d'âge des placettes RENECOFOR. Cela oblige par conséquent à envisager une stratification des données en fonction de l'âge pour dissocier cet effet sur la défoliation de celui de la nutrition minérale. Le nombre limité de placettes pour une essence donnée ne permet cependant pas une telle stratification.

Finalement, d'après ces premières relations obtenues dans le réseau RENECOFOR, il est difficile de relier les facteurs nutritionnels aux variations de l'état sanitaire des arbres, et en particulier au niveau de défoliation. Comme le laissent penser un certain nombre d'études, il est vraisemblable que les facteurs climatiques et biotiques représentent globalement un poids explicatif beaucoup plus important que les aspects nutritionnels. Cependant on ne peut exclure, dans des situations particulières (stations carencées en éléments minéraux), ou pendant des périodes pendant lesquelles les facteurs climatiques et biotiques ne peuvent pas expliquer une forte variation du pourcentage de défoliation, que les facteurs nutritionnels ne deviennent importants comme facteurs explicatifs. A ce titre on peut citer les études portant sur l'état des houppiers des épicéas et du sapin dans les Vosges

(Landmann et al. 1995). Deux types de détérioration des houppiers ont été mis en évidence. Le premier au début des années 1980 n'était pas clairement associé à des perturbations d'ordre nutritionnel, mais était plutôt lié à la structure du peuplement qui a été interprétée en fonction du niveau de compétition pour l'accès aux réserves hydriques. Le second type s'est manifesté entre 1983 et 1986, il a été relié à une carence magnésienne et se trouvait limité aux sols pauvres en nutriments.

Cette première étude des relations entre la défoliation et les nutriments foliaires souligne finalement tout l'intérêt d'une approche multifactorielle pour la compréhension des atteintes à la santé des forêts. Les données récoltées dans le sous-réseau météorologique forestier et les observations de l'état sanitaire des arbres seront à ce titre précieuses, mais la série météorologique actuellement disponible (depuis 1995) est encore trop courte pour permettre une analyse de corrélation.

3. Accroissement en diamètre des arbres et nutriments foliaires

3.1. Introduction

Les évaluations des accroissements en hauteur des arbres sur un intervalle de temps de 5 ans étant trop imprécises (21 % des 5238 arbres du réseau RENECOFOR mesurés entre 1991 et 1995 ont "diminué de hauteur", Cluzeau et al. 1998), seuls les accroissements en diamètres ont été retenus pour étudier les relations avec les nutriments foliaires.

Deux jeux de données seront utilisés pour étudier ces relations. Le premier mettra en regard la moyenne par placette des accroissements en diamètre des 52 arbres "objectif" entre 1993 et 1996 avec les nutriments foliaires moyens par placette des 8 arbres "échantillon". Cette première analyse servira à discerner des tendances en limitant l'importance du "bruit de fond" dû à la variabilité interannuelle et intraplacette des accroissements. Le deuxième jeu de données mettra en relation, pour chaque année entre 1993 et 1996, les accroissements moyens en diamètre des 8 arbres "échantillon" par placette avec les nutriments foliaires des mêmes arbres. Tous les macronutriments (N, P, S, K, Ca, et Mg), tous les micronutriments (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu, et Zn) analysés, et 9 rapports entre ces éléments (N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg, et Fe/Mn) ont été testés par rapport à l'accroissement.

L'intérêt de cette approche est (1) d'essayer de déterminer si un élément donné a représenté un facteur limitant de la croissance pendant la période considérée, et (2) de confronter les valeurs seuil de teneur foliaire indiquées dans la littérature avec les renseignements fournis par ces relations.

Cette approche est obligatoirement exploratoire du fait notamment du nombre réduit (1) de placettes par essence ($n = 20$ au maximum), (2) d'années de mesure, et (3) de la précision relativement faible de l'estimation des teneurs foliaires en certains micronutriments à l'échelle de la placette. Les évaluations de la variabilité interplacette et interannuelle des teneurs foliaires en nutriments montrent également que des séries de données plus longues sont indispensables pour atteindre une certaine robustesse des relations.

Pour étudier les relations entre l'accroissement en diamètre et les nutriments foliaires des 8 arbres "échantillon", il est nécessaire de connaître la représentativité des valeurs de ces deux variables par rapport aux 36 arbres "observation" de la placette. En ce qui concerne la variabilité intraplacette des teneurs foliaires en nutriments, nos résultats montrent que l'échantillonnage réalisé traduit de manière assez satisfaisante la variabilité intraplacette à une date donnée des macronutriments, mais pas de tous les micronutriments (**Tableau A 16**, p.183). Au niveau des accroissements en diamètre, les mesures annuelles des 36 arbres "observation" et des 16 arbres "échantillon" ont permis de tester directement la représentativité des 16 arbres "échantillons" par rapport à la population des 36 arbres "objectifs" (Cluzeau et al. 1998). Les accroissements annuels moyens en diamètre entre 1991 (ou 1992) et 1995 des 16 arbres "échantillon" sont comparables à ceux des 36 arbres "observation" sauf pour 9 placettes (CHP 18, EPC 74, HET 02, HET 60, PM 40b, PM 40c, PS 04, PS 89, et SP 57) dont les distributions et les moyennes sont significativement différentes. Dans la même étude, la comparaison entre l'accroissement en diamètre des 8 arbres "échantillon" réellement échantillonnés et celui des 8 arbres "échantillon" de réserve a montré globalement une distribution des accroissements identique entre les deux groupes (sauf pour une dizaine de placettes). Ces résultats nous incitent à penser que les 8 arbres "échantillon" réellement échantillonnés sont globalement représentatifs des 36 arbres "observation" du point de vue de l'accroissement en diamètre sur la période initiale de mesure du réseau. Cela nous permet raisonnablement d'étudier les relations entre

l'accroissement en diamètre et les nutriments foliaires sur la sous-population des 8 arbres "échantillon" réellement échantillonnés.

3.2. Calcul des accroissements en diamètre et contrôle des valeurs

Les accroissements en diamètre sont calculés, pour chaque arbre "échantillon" réellement utilisé pour les analyses foliaires, et chaque arbre "objectif" à partir des mesures de circonférence réalisées annuellement entre 1993 et 1996. Les changements d'arbres "échantillons" utilisés pour les analyses foliaires dans certaines placettes (cf. **Tableau 4**, p.12) ont été pris en compte. Trois jeux de données de base seront donc utilisables: les accroissements 93-94, 94-95, et 95-96 par rapport aux éléments foliaires respectivement analysés en 93, 94, et 95.

Deux types de correction ont été appliqués aux valeurs d'accroissement. Le premier a porté sur les accroissements "fortement négatifs" entre deux années successives. Le deuxième a porté sur les accroissements "excessivement" importants. Ces valeurs suspectes ont nécessité (1) la définition de seuils acceptables puis (2) des critères de correction.

3.2.1. Accroissements "fortement négatifs"

Des différences négatives entre deux mesures successives de circonférence ne sont pas obligatoirement dues à un problème de mesure, mais peuvent résulter de l'imprécision des mesures. En effet, les mesures de circonférences étant associées à une précision donnée, il est nécessaire d'en tenir compte pour déterminer à partir de quel écart entre deux mesures, un accroissement peut réellement être considéré comme négatif, et donc être dû à une erreur de mesure ou de report sur fiche.

La précision théorique associée à la mesure de la circonférence a été fixée à 0,5 cm (voir Cluzeau et al., 1998), soit une précision sur le diamètre:

$$e_1 = 0,5/\pi = 0,16 \text{ cm}$$

L'erreur aléatoire associée à la différence entre deux mesures successives indépendantes s'obtient par la composition des erreurs aléatoires associées à chacune des deux mesures selon la théorie des erreurs (voir Duplat et Perotte, 1981, in Cluzeau et al., 1998):

$$\pm\sqrt{e_1^2 + e_2^2}$$

avec $e_1 = e_2$, soit:

$$e = \pm e_1 \sqrt{2} = \pm 0,22 \text{ cm}$$

Les accroissements inférieurs à "-e" sont donc considérés comme étant dus à des erreurs de mesure. Pour les accroissements 93-94, 94-95, et 95-96; respectivement 1,6 % (de 775 arbres), 1,7 % (de 786 arbres), et 1,8 % (de 760 arbres) d'arbres sont concernés par ce problème (**Tableau 26**, p.124).

Selon les années d'accroissement, entre 5 et 7 placettes sont concernées par des "accroissements négatifs". Selon les placettes, et selon les années, le nombre d'arbres dont la circonférence diminue entre deux séries de mesure est compris entre 1 arbre sur 8 et 8 arbres sur 8 pour la placette SP 05 pour l'accroissement 93-94. Dans ce dernier cas, le même problème a été rapporté pour les arbres observation (Cluzeau et al., 1998). Entre deux accroissements annuels successifs, on remarque que ce sont des arbres différents qui sont affectés par ce biais.

3.2.2. Accroissements "anormalement élevés"

Dans un nombre plus limité de cas les accroissements annuels sur le diamètre sont manifestement surestimés par rapport aux valeurs moyennes (**Tableau 27**, p.125). La prise en compte de ces valeurs est plus difficile car l'accroissement "maximal possible" pour une essence donnée n'est pas connu précisément par rapport aux potentialités de chaque placette RENECOFOR. Pour chaque essence et chaque année d'accroissement, des valeurs supérieures à trois fois la moyenne corrigée (voir ci-dessous) des 52 arbres "objectifs" ont été jugées comme "suspectes" et nécessitant une correction. Cette marge de sécurité assez large permet de minimiser le risque d'éliminer des accroissements importants mais réels.

Mis à part l'arbre n° 115 de la placette CHP 55 pour lequel une erreur de mesure ou de report sur fiche est manifeste (+ 9 cm sur le diamètre), les surestimations notées sont comprises entre 1 cm et 2 cm sur le diamètre.

Tableau 26: Placettes et arbres pour lesquels un accroissement négatif a été noté pour les périodes 93-94, 94-95, et 95-96 sur les arbres réellement échantillonnés pour les analyses foliaires.

Table 26: Plots and trees with a negative annual diameter increment in 93-94, 94-95 and 95-96 (for the same 8 "sample" trees used for foliar nutrient analysis).

Code	Arbre	D93	D94	Accroiss ^t	Code	Arbre	D94	D95	Accroiss ^t	Code	Arbre	D95	D96	Accroiss ^t
93-94					94-95					95-96				
		(cm)	(cm)	(cm)			(cm)	(cm)	(cm)			(cm)	(cm)	(cm)
CHS 72	109	34,54	34,22	-0,32	CHS 68	108	53,16	52,84	-0,32	CHP 18	101	25,46	25,15	-0,32
EPC 88	113	45,84	45,20	-0,64	CHS 88	103	39,47	39,15	-0,32	CHP 18	111	32,47	32,15	-0,32
PL 20	107	51,88	51,25	-0,64	CHS 88	104	37,56	37,24	-0,32	CHP 55	115	45,84		
PS 67b	106	33,42	32,15	-1,27	HET 09	106	34,38	34,06	-0,32	CHS 58	114	37,11	35,11	-2,01
SP 05	106	36,61	36,32	-0,29	HET 09	102	33,10	32,79	-0,32	CHS 61	106	37,40	37,08	-0,32
SP 05	102	37,56	36,86	-0,70	HET 09	107	26,74	26,42	-0,32	CPS 67	102	33,10	32,79	-0,32
SP 05	108	36,61	35,78	-0,83	HET 09	104	25,46	24,99	-0,48	CPS 67	104	38,52	38,20	-0,32
SP 05	103	35,33	34,25	-1,08	HET 54b	107	36,61	36,29	-0,32	CPS 67	105	34,06	33,74	-0,32
SP 05	107	37,56	36,48	-1,08	PS 44	102	38,20	37,88	-0,32	CPS 67	108	33,10	32,79	-0,32
SP 05	101	41,06	39,95	-1,11	PS 44	112	26,90	26,58	-0,32	DOU 61	112	48,38	48,06	-0,32
SP 05	104	48,06	46,19	-1,88	PS 67a	103	38,83	38,52	-0,32	DOU 61	108	42,81	42,18	-0,64
SP 05	105	51,57	49,50	-2,07	PS 67a	108	48,38	48,06	-0,32	DOU 61	106	42,81	42,02	-0,80
					SP 39	108	40,11	39,73	-0,38	DOU 61	102	36,92	35,49	-1,43
										HET 09	105	33,42	32,15	-1,27

3.2.3. Correction appliquée

Pour les deux types de valeurs "suspectes" décrits ci-dessus, la même correction en fonction des valeurs moyennes des 52 arbres "objectifs" a été appliquée. Les accroissements annuels des 52 arbres "objectifs" ont été calculés pour chaque essence et chaque année d'accroissement (93-94, 94-95, et 95-96). Les accroissements inférieurs à - 0,22 cm ou supérieurs à trois fois la valeur moyenne ont été corrigés par la moyenne des 52 arbres "objectifs" (**Tableau A 22**, p.195). La moyenne corrigée des 52 arbres "objectifs" a ensuite servi à corriger les valeurs d'accroissements "suspectes" chez les 8 arbres "échantillon".

3.3. Relations entre les accroissements en diamètre et les teneurs foliaires en nutriments

3.3.1. Accroissements en diamètre des 52 arbres "objectif" et nutriments foliaires

Les relations entre l'accroissement en diamètre des 52 arbres "objectif" et les nutriments foliaires des 8 arbres "échantillon" sont fonction à la fois des nutriments et des essences (**Figure 23**, p.127 et **Tableau 28**, p.128).

Parmi les 13 nutriments et les 9 rapports entre nutriments pris en considération, 3 macronutriments (N, P, et Mg), un micronutriment (Al), et 4 rapports (S/N, N/K, N/Mg, et K/Ca) sont significativement corrélés à l'accroissement des arbres au moins pour une essence donnée. Parmi les 8 essences étudiées, deux n'ont présenté aucune corrélation significative: le chêne pédonculé et le hêtre; le pin sylvestre en a présenté 5 (avec P, Mg, Al, et N/Mg), et les autres essences (le chêne sessile, le douglas, l'épicéa, le pin maritime, et le sapin) en ont présenté au moins une. On remarque que l'accroissement en diamètre des résineux semble dépendre plus étroitement de nutriments foliaires que celui des feuillus.

Tableau 27: Placettes et arbres pour lesquels l'accroissement est supérieur à 3 * l'accroissement moyen des 52 arbres "objectif" pour les périodes 93-94, 94-95, et 95-96 sur les arbres "échantillon" réellement échantillonnés pour les analyses foliaires.

Table 27: Plots and trees with an annual diameter increment > 3 times the mean increment of the 52 "objective" trees in 93-94, 94-95 and 95-96 (for the same 8 "sample" trees used for foliar nutrient analysis).

Code	Arbre	D95 (cm)	D96 (cm)	Accroissement 95-96 (cm)
CHP 55	110	43,29	44,56	1,27
PS 67a	103	38,52	39,79	1,27
SP 39	108	39,73	41,70	1,97

Code	Arbre	D94 (cm)	D95 (cm)	Accroissement 94-95 (cm)
CHP 55	115	36,61	45,84	9,23
EPC 63	111	28,81	30,56	1,75
HET 09	105	32,15	33,42	1,27
HET 64	115	45,52	46,79	1,27
PS 61	110	36,61	37,72	1,11
PS 78	115	29,92	31,04	1,11

Code	Arbre	D93 (cm)	D94 (cm)	Accroissement 93-94 (cm)
CHP 65	106	29,60	31,19	1,59
EPC 34	111	18,02	20,05	2,04
PL 20	115	70,35	71,30	0,95
SP 07	115	48,38	49,97	1,59

L'azote foliaire est l'élément qui limite le plus souvent la croissance (chêne sessile, douglas, épicéa, et sapin), et pour lequel les corrélations positives sont les meilleures (R^2 compris entre 0,2 pour le chêne sessile et 0,65 pour le douglas). Pour le douglas, le nombre de placettes ($n = 6$) est trop réduit pour obtenir une relation fiable. L'azote peut donc être considéré comme facteur limitant de l'accroissement moyen en diamètre. Malgré l'imprécision qui est liée à ces relations, et l'effet

d'autres facteurs sur la croissance (alimentation hydrique, sylviculture ...), on peut discuter les valeurs des seuils indicatifs^{Fr}. Dans le cas du chêne sessile, la teneur optimale proposée est de 22 mg/g, or on n'observe pas d'infléchissement de la croissance jusqu'à 28 mg/g (**Figure 23**, p.127). L'optimum pour les placettes étudiées pourraient donc être décalé à la hausse, ce qui décale par la même occasion le seuil critique défini par rapport à l'optimum (10 % de réduction sur la croissance). Dans le cas de l'épicéa, la même remarque que pour le chêne sessile peut être faite en décalant l'optimum de l'azote de 15 à 18 mg/g. Par contre, dans le cas du sapin, les résultats observés sur la période 1993-1996 ne permettent pas de proposer une modification de l'optimum pour l'azote. Dans le cas du douglas, l'effectif trop réduit des placettes ne permet pas de discuter valablement la valeur de l'optimum pour l'azote.

Le phosphore foliaire est corrélé positivement à l'accroissement en diamètre pour le pin sylvestre et le sapin. Cette dernière essence est la seule pour laquelle l'azote et le phosphore se comportent simultanément en tant que facteurs limitants. La valeur d'optimum pour le phosphore et le sapin semble être légèrement supérieure à celle proposée en France (1,7 mg/g contre 1,5 mg/g). L'optimum de cet élément pour le pin sylvestre n'est pas remis en question par la relation obtenue.

Le magnésium foliaire est corrélé négativement à l'accroissement en diamètre chez le pin sylvestre. Le rapprochement pour cette essence des corrélations entre (1) l'accroissement en diamètre et la teneur foliaire en phosphore, et (2) l'accroissement en diamètre et la teneur foliaire en magnésium (**Figure 24**, p.129) fait penser à un phénomène de dilution du magnésium dû à l'augmentation de croissance provoqué par l'augmentation des teneurs foliaires en phosphore qui jouerai le rôle de facteur limitant primaire.

Le cas de l'aluminium est intéressant à considérer car les deux corrélations significatives observées pour le chêne sessile et le pin sylvestre sont négatives (**Figure 23**, p.127). Les valeurs foliaires caractéristiques de cet élément sont encore assez mal connues. Cependant des teneurs foliaires d'environ 1000 µg/g ont été observées chez des arbres adultes de *Pinus radiata* (cité dans Bonneau, 1995) sans apparition de signes de toxicité aluminique. Les gammes de valeurs observées dans nos échantillons (200-400 µg/g chez le pin sylvestre, et 50 à 150 µg/g chez le chêne sessile) laissent supposer que l'on se situe autour des valeurs optimales. Dans ce cas, ces corrélations négatives pourraient être interprétées comme un phénomène de dilution de l'aluminium lié à deux facteurs limitants primaires différents: l'azote pour le chêne sessile, et le phosphore pour le pin sylvestre (cf. paragraphe précédent).

Les corrélations entre l'accroissement en diamètre et certains rapports entre éléments sont assez difficiles à interpréter étant donné que, mis à part pour le pin sylvestre, les effectifs pris en compte sont faibles (n = 6 pour le douglas, et n = 7 pour le pin maritime). On remarque cependant que (1) les rapports retenus prennent le plus souvent en compte l'azote, et (2) les corrélations significatives ont été observées uniquement chez les résineux.

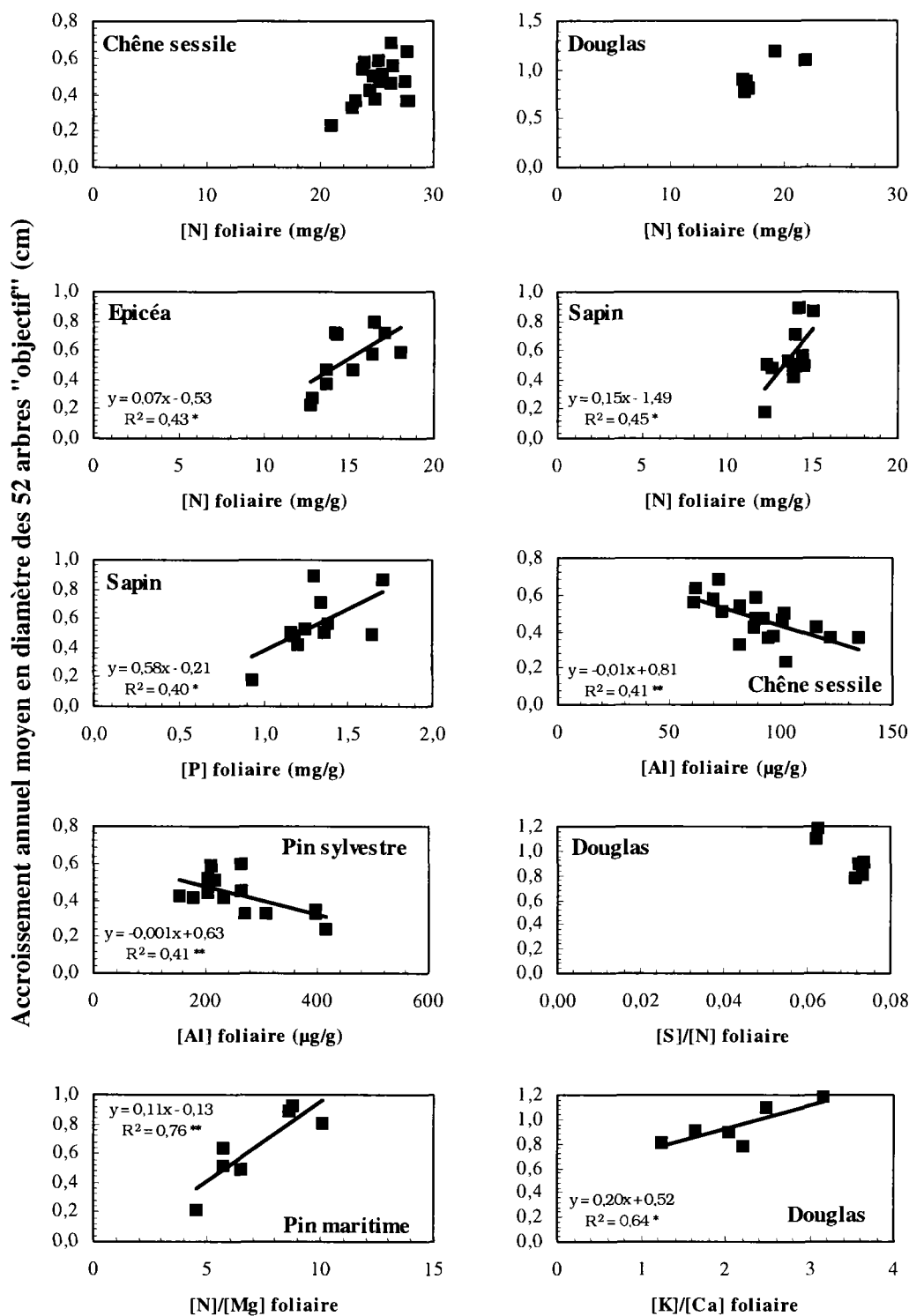


Figure 23: Meilleures régressions linéaires entre l'accroissement annuel moyen en diamètre entre 1993 et 1996 des 52 arbres "objectif" et la moyenne des teneurs en nutriments foliaires (ou des rapports entre nutriments) des 8 arbres "échantillon" entre 1993 et 1995. *, **, régressions significatives respectivement à 5 % et 1 %. L'absence de régression indique des R^2 non significatifs ou des effectifs trop réduits.

Figure 23: Best linear regressions between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 52 "objective" trees, and the mean foliar nutrient concentrations (or ratios) for the 8 "sample" trees between 1993 and 1995. Significance: * 5 %, ** 1 % (no regression indicates that R^2 was not significant or the number of plots are too low).

Tableau 28: Relations significatives entre l'accroissement moyen en diamètre des 52 arbres "objectif" entre 1993 et 1996, et les nutriments foliaires analysés dans les 8 arbres "échantillon" pour les essence du réseau RENECOFOR. Les ajustements linéaires sont tous du type accroissement = a + b * teneur ou rapport de nutriments foliaires. Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Table 28: Significant correlations between mean annual diameter increment from 1993 to 1996 (from girth measurement) of the 52 "objective" trees, foliar nutrients (6 macro and 7 micronutrients) and 9 ratios between nutrients for the 8 "sample" trees. Linear regressions are expressed as diameter increment = a + b × leaf nutrient concentration or ratio. Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01.

Eléments		Essences							
		CHP	CHS	HET	DOU	EPC	PM	PS	SP
N	a		-0,238		-0,148	-0,528			-1,497
	b		0,028		0,061	0,072			0,150
	R ²		0,20 *		0,65 *	0,43 *			0,45 *
	n		19		6	11			11
P	a							0,017	-0,210
	b							0,293	0,585
	R ²							0,28 *	0,40 *
	n							14	11
Mg	a							0,722	
	b							-0,325	
	R ²							0,32 *	
	n							14	
Al	a		0,807					0,631	
	b		-0,004					-0,001	
	R ²		0,41 **					0,41 **	
	n		19					14	
S/N	a				2,871			1,673	
	b				-27,776			-11,953	
	R ²				0,85 **			0,62 *	
	n				6			7	
N/K	a							-0,128	
	b							0,347	
	R ²							0,58 *	
	n							7	
N/Mg	a							-0,134	0,175
	b							0,109	0,013
	R ²							0,76 **	0,37 *
	n							7	14
K/Ca	a				0,522				
	b				0,200				
	R ²				0,66 *				
	n				6				

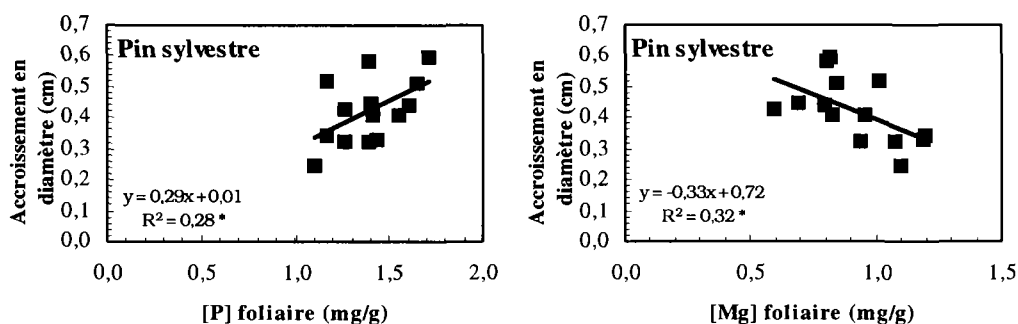


Figure 24: Relations entre l'accroissement annuel moyen en diamètre entre 1993 et 1996 des 52 arbres "objectif", et la moyenne des teneurs foliaires en phosphore et en magnésium des 8 arbres "échantillon" entre 1993 et 1995 pour le pin sylvestre. Seuils de significativité: * 5 %, ** 1 %.

Figure 24: Relation between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 52 "objective" trees, and the mean foliar P and Mg concentration for the 8 "sample" trees between 1993 and 1995 for Scots pine. Significance: * 5 %, ** 1 %.

3.3.2. Accroissements en diamètre des 8 arbres "échantillon" et nutriments foliaires

L'utilisation des 52 arbres "objectif" pour calculer les accroissements moyens en diamètre sur 4 ans était nécessaire pour observer les tendances entre les accroissements et les nutriments foliaires. Cependant, calculer les accroissements sur un lot d'arbres et mesurer les nutriments foliaires sur un sous-échantillon de ce lot pose le problème de la qualité des relations. La confrontation de ces relations avec celles obtenues entre les accroissements en diamètre des 8 arbres "échantillon" et les teneurs foliaires des mêmes arbres permettra de mieux cerner la validité de ces relations.

Les relations significatives entre l'accroissement en diamètre des 8 arbres "échantillon" et les nutriments foliaires des mêmes arbres sont regroupées en annexe (**Tableau A 23**, p.196), et une sélection de ces relations est donnée ci-dessous (**Figure 25**, p.131).

L'azote foliaire est l'élément le plus souvent corrélé à l'accroissement des arbres "échantillon". On observe une corrélation positive chez l'épicéa, le pin maritime, et le sapin, et une corrélation négative chez le hêtre. Ces résultats correspondent à ceux obtenus avec les accroissements calculés sur les 52 arbres "objectif" dans le cas de l'épicéa et du sapin. Par contre, les corrélations significatives obtenues avec les 52 arbres "objectif" pour le chêne sessile et le douglas ne sont pas retrouvées avec les mesures sur les 8 arbres "échantillon".

Le soufre foliaire est corrélé avec l'accroissement en diamètre des 8 arbres "échantillon": négativement chez le hêtre, et positivement chez le pin sylvestre alors qu'aucune relation significative n'a été observée avec l'accroissement des 52 arbres "objectif".

Dans le cas du phosphore, les corrélations positives détectées avec l'accroissement des 52 arbres "objectif" chez le pin sylvestre et le sapin se retrouvent avec l'accroissement des 8 arbres "échantillon".

Pour le calcium, et le potassium, aucune corrélation n'a été obtenue avec l'accroissement des 52 "objectif" alors que le calcium et le potassium sont positivement corrélés à l'accroissement des 8 arbres "échantillon" respectivement chez le sapin et le douglas.

Les corrélations obtenues avec le magnésium foliaire sont négatives, elles concernent le pin sylvestre pour les accroissements des 52 arbres "objectif" et le sapin pour les accroissements des 8 arbres "échantillon".

Au niveau des micronutriments, l'aluminium est négativement corrélé avec l'accroissement en diamètre chez le chêne sessile quel que soit le groupe d'arbre considéré. Par contre, la corrélation négative observée avec l'accroissement des 52 arbres "objectif" chez le pin sylvestre n'est pas retrouvée avec l'accroissement des 8 arbres "échantillon".

Les autres micronutriments analysés présentent soit des corrélations significatives uniquement avec les accroissements calculés sur les 8 arbres "échantillon" (Na, Zn, Mn, et Cu), soit aucune corrélation significative (Fe et Cl).

3.4. Discussion et Conclusions

Les premières données rassemblées sur le réseau RENECOFOR entre 1993 et 1996 ont permis d'étudier directement les relations entre l'accroissement en diamètre des arbres et la nutrition foliaire et de déterminer pour chacune des 8 essences principales du réseau quel nutriment pourrait jouer un rôle sur les accroissements en diamètre, et dans quelle proportion. Dans certains cas des modifications des teneurs optimales en nutriments ont pu être proposées.

L'étude des relations entre les accroissements moyens en diamètre entre 1993 et 1996 et les teneurs foliaires moyennes en nutriment entre 1993 et 1995 a conduit à deux résultats marquants: (1) l'azote est l'élément foliaire qui joue le rôle de facteur limitant de l'accroissement pour le plus d'essences, et (2) l'accroissement en diamètre du pin sylvestre dépend à la fois des teneurs foliaires en phosphore (corrélation positive), en magnésium, et en aluminium (corrélations négatives). Ces résultats se rapportent aux estimations des accroissements réalisées sur les 52 arbres "objectif" et aux mesures des teneurs foliaires sur les 8 arbres "échantillon" par placette. Entre 20 et 65 % de la variabilité observée sur les accroissements en diamètre est expliquée par les teneurs en nutriments foliaires. Les résultats obtenus en retenant comme individu statistique le couple de données: "accroissement des 8 arbres "échantillon" ↔ teneur foliaire des mêmes arbres pour chaque année et par placette" a conduit à une image sensiblement différente des relations significatives, et à des coefficients de détermination plus faibles. Dans cette approche, la qualité des relations est affectée par (1) la variabilité interannuelle des paramètres mesurés, et (2) la faible précision des mesures d'accroissement en diamètre sur une année. Ces deux limitations font que l'approche globale basée sur des moyennes établies sur des périodes d'environ 5 ans sera retenue de préférence pour les études ultérieures. L'abondance des relations positives entre l'azote foliaire et l'accroissement des arbres est un résultat important, non pas pour leur signification physiologique (c'était bien connu) mais pour montrer que les apports atmosphériques d'azote ont probablement un effet plus positif que négatif sur l'accroissement en diamètre des arbres. Les écosystèmes forestiers ne sont donc pas "saturés" en azote.

Ces relations permettent d'autre part de préciser le rôle des nutriments : soit en tant que facteur limitant primaire dans le cas de corrélations positives, soit en tant que facteur limitant secondaire dans le cas de corrélations négatives et quand les teneurs en nutriment sont aux alentours de la valeur optimum. Deux situations semblent correspondre à ce cas de figure: chez le chêne sessile (l'azote étant le facteur limitant primaire et l'aluminium le facteur limitant secondaire), et chez le pin sylvestre (le phosphore jouant le rôle de facteur limitant primaire, le magnésium et l'aluminium pouvant être des facteurs limitants secondaires). Des séries de données plus longues sont cependant nécessaires pour confirmer ou infirmer ces observations. En pratique, de telles relations peuvent expliquer pourquoi une fertilisation non équilibrée peut aboutir à une réduction de croissance si

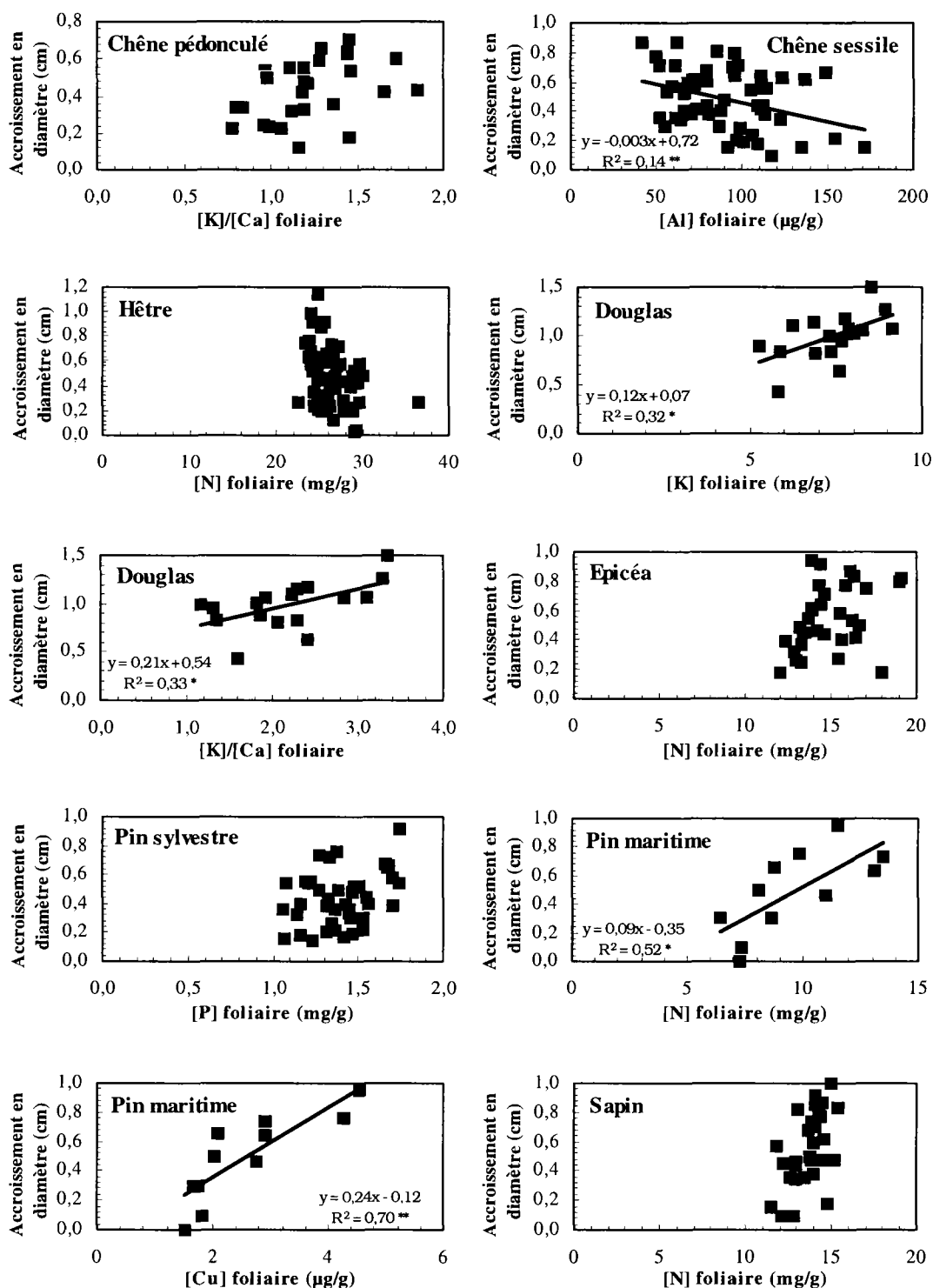


Figure 25: Meilleures régressions linéaires entre l'accroissement annuel moyen en diamètre (par mesure de circonférence, de 1993 à 1996) des 8 arbres "échantillon", et les nutriments foliaires (ou des rapports entre nutriments) de l'année précédente sur les mêmes arbres. *, **, significatif respectivement à 5 % et 1 %. L'absence de régression indique des R^2 non significatifs ou des effectifs trop réduits.

Figure 25: Best linear regressions between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 8 "sample" trees, and the foliar nutrients (or ratios) for the previous year on the same trees. Significance: * 5 %, ** 1 %. (no regression indicates that R^2 was not significant or the number of plots was too low).

l'apport de l'élément limitant primaire (par exemple l'azote) est excessif par rapport à l'apport d'un élément limitant secondaire (par exemple le magnésium).

Dans certains cas, les valeurs des seuils indicatifs^{Fr}, et en particulier les teneurs optimales semblent sous-évaluées par rapport aux indications fournies par les relations entre l'accroissement en diamètre et les teneurs foliaires. On constate ainsi que l'accroissement en diamètre continue à augmenter linéairement avec les teneurs en azote jusqu'à 28 mg/g chez le chêne sessile, et jusqu'à 18 mg/g chez l'épicéa alors que les teneurs optimales indiquées en France sont respectivement de 22 et 15 mg/g. De la même manière, les teneurs optimales en phosphore foliaire pour le sapin semblent être plus proches de 1,7 mg/g que des 1,5 mg/g proposés comme optimum. Pour les autres éléments, le jeu de données collecté sur le réseau RENECOFOR ne permet pas de proposer de modifications des teneurs optimales, et par conséquent des seuils critiques.

Les rapports entre éléments qui ont expliqué une part significative de l'accroissement en diamètre des arbres sont peu nombreux. Ils prennent en compte le plus souvent l'azote, mais les relations significatives sont observées pour les essences avec un faible nombre de placettes (6 pour le douglas, et 7 pour le pin maritime) ce qui limite fortement leur robustesse. On remarque cependant pour le pin maritime que les rapports entre éléments foliaires (S/N, N/K, et N/Mg) semblent discriminer les accroissements en diamètre alors que les nutriments considérés isolément ne semblent pas influencer cet accroissement.

Une approche complémentaire pour l'étude de ces relations pourra utiliser les accroissements déduits des mesures de largeur de cerne sur carottes. Dans ce cas le problème tiendrait à la représentativité des mesures d'accroissement réalisées sur des arbres périphériques de la placette étant donné que les carottages ne peuvent pas être réalisés sur les arbres "objectifs", et à plus forte raison sur les arbres "échantillons".

D'un point de vue méthodologique, l'utilisation des données d'accroissement en surface terrière pourrait procurer davantage de résultats interprétables que la largeur de cerne (Bert, 1992).

Il ressort finalement de cette analyse initiale que les nutriments foliaires peuvent jouer un rôle significatif dans la compréhension de l'accroissement des arbres, mais la limitation imposée par des effectifs assez faibles de placettes pour une essence donnée doit inciter à une interprétation prudente des résultats. On doit notamment rappeler que l'estimation des teneurs en nutriments foliaires est réalisée, pour des raisons de standardisation, à une période de l'année pour laquelle ces teneurs sont relativement stables. Les teneurs obtenues ne reflètent donc pas obligatoirement de manière représentative la disponibilité en nutriments pour l'ensemble de la période de croissance active, ce qui peut conduire à sous-estimer ou au contraire surestimer l'importance de ces nutriments dans l'élaboration des cernes. D'autre part notre approche ne prend absolument pas en considération les phénomènes de redistributions internes des nutriments dans les arbres. Ces phénomènes peuvent représenter une part importante des nutriments utilisés pour l'élaboration des cernes. Les transferts internes en potassium et en azote peuvent ainsi représenter respectivement 60 % et 25 % du total immobilisé au cours d'une rotation entre 2 et 19 ans dans un taillis de châtaignier (Colin-Belgrand et al., 1996). Dans une étude sur pin laricio, Neiryneck *et al.* (1998) ont estimé qu'environ 30 % et 65 % des besoins respectifs en azote et en phosphore étaient couverts par des transferts internes. Ces phénomènes sont étroitement liés aux problèmes des arrières effets de la nutrition minérale sur la croissance des ligneux, et constituent un axe de recherche en lui-même. Quoi qu'il en soit, la part de variabilité de l'accroissement en diamètre entre les années (n) et (n+1) qui reste non expliquée par les teneurs en nutriments foliaires l'année (n) reste importante et suggère la prise en compte d'autres facteurs explicatifs de la croissance tels que la température, la disponibilité en eau, et la concurrence interindividuelle pour l'accès aux ressources. Ces facteurs sont connus depuis longtemps pour agir

sur la croissance végétale. Cependant on remarque qu'un événement climatique défavorable ne produit pas systématiquement une croissance très réduite, et inversement, les années pendant lesquelles la croissance a été faible ne correspondent pas obligatoirement à des années climatiques particulières (Bert, 1992). La richesse minérale du sol ne deviendrait importante en tant que facteur explicatif que pendant des périodes où les paramètres climatiques ne sont pas restrictifs pour la croissance. Ces résultats suggèrent pour l'analyse des données à venir sur le réseau RENECOFOR de stratifier les données en fonction des facteurs climatiques les plus importants, et selon les cas, de prendre ou de ne pas prendre en considération la nutrition minérale des arbres. Dans ce but, le sous-réseau météorologique forestier de 26 stations mis en place en 1994/1995, et son extension souhaitable devait contribuer à quantifier de manière détaillée l'évolution des sources de variabilité de la vigueur des forêts en France et leur importance relative.

En définitive, malgré les limites imposées par la précision des mesures d'accroissement en diamètre et la précision de l'estimation des teneurs foliaires en nutriments au niveau de la placette, cette première étude de corrélation réalisée sur les données du réseau montre qu'il est déjà possible de mettre en évidence des relations significatives entre accroissement et nutriments foliaires. A plus long terme l'importance des facteurs climatiques sera également évaluée pour expliquer l'accroissement des arbres. Cette approche s'intègre finalement dans un contexte plus global de l'étude de l'accroissement des peuplements forestiers, et de leur dysfonctionnement, notamment dans l'optique des changements globaux (température, CO₂ atmosphérique, dépôts atmosphériques).

DISCUSSION

Les objectifs fixés pour ce rapport étaient (1) d'évaluer les procédures d'échantillonnage et d'analyse chimique des teneurs foliaires en nutriments afin de proposer d'éventuelles améliorations dans l'optique d'un suivi à long terme de qualité, (2) de décrire l'état nutritionnel des placettes RENECOFOR pendant les cinq premières années du suivi avec éventuellement l'émergence de tendances continues et (3) de commencer à croiser certaines informations collectées sur le réseau avec les analyses foliaires pour mieux comprendre les variations de teneurs foliaires et pour interpréter d'éventuels problèmes de perte d'accroissement ou de défoliation. Ces trois points vont être discutés avant de présenter les conclusions de ce travail assorties de perspectives.

1. Echantillonnage et analyses chimiques

Un certain nombre de choix ont été faits à la mise en place du suivi des analyses foliaires; en particulier pour les périodes d'échantillonnage, les directions de prélèvement, le nombre d'arbres prélevés par placette et la préparation des échantillons pour les analyses. Les résultats des 5 premières années de mesures permettent d'en apprécier la mise en application et pour certains de ces choix d'en faire une première évaluation (précision des résultats et effet du lavage).

1.1. Période d'échantillonnage

Les périodes d'échantillonnage ont été fixées entre le 15 juillet et le 31 août pour les feuillus et le mélèze et entre le 1^{er} ou le 15 octobre et le 15 décembre ou le 15 janvier pour les résineux. Cela permet de se situer pendant une phase de relative stabilité des teneurs foliaires et cela autorise ainsi les comparaisons interannuelles. Les prélèvements réalisés en dehors de ces périodes risquent par conséquent d'augmenter la variabilité interannuelle des mesures et donc de diminuer la qualité du suivi.

Sur les 5 premières années de suivi on constate que ce planning a globalement été respecté. Seules 4 placettes de feuillus et 4 placettes de résineux ont été prélevées en dehors de ces périodes. D'autre part, l'écart moyen entre deux dates de prélèvement successives sur une même placette est assez faible. Il est de 14 jours chez les feuillus et de 24 jours chez les résineux. L'écart plus important pour ces derniers traduit simplement le fait que les périodes fixées initialement sont plus longues pour les résineux.

1.2. Directions de prélèvement

L'objectif des analyses foliaires sur une placette donnée est d'obtenir, sur un échantillon composé, l'estimation la plus représentative possible des teneurs foliaires à l'échelle de la placette. Toutefois, la variabilité liée à la hauteur dans le houppier a été éliminée en prélevant systématiquement les feuilles dans le tiers supérieur des arbres. Les autres sources de variabilité ont été intégrées en prélevant les feuilles dans des directions décalées de 90 ° d'un arbre au suivant.

La représentativité des prélèvements à l'échelle de la placette a donc été appréciée en recherchant l'absence de direction de prélèvement privilégiée. Cet objectif n'a pas toujours été atteint. Pour l'ensemble des 5 années de suivi, environ 50 % des placettes ont été prélevées dans toutes les directions. Cette moyenne masque cependant une dérive au cours du temps. On constate en effet que 72 % des placettes ont été prélevées de cette manière la première année contre seulement 35 % en 1997. Ce point justifie une attention plus soutenue sur le terrain lors des prochaines années.

1.3. Préparation des échantillons pour analyse

En règle générale, les échantillons foliaires ne sont pas lavés avant analyse. Les résultats obtenus sont sensés représenter l'état nutritionnel instantané des arbres alors que les dépôts atmosphériques peuvent provoquer une surestimation des valeurs.

Les tests de lavage d'aiguilles réalisés sur trois placettes de pin maritime ont montré que l'absence de lavage (HNO_3 + mouillant neutre) pouvait induire pour certains éléments une surestimation des valeurs réelles des teneurs foliaires. Des dépôts atmosphériques variables sont à l'origine de ce problème qui semble dépendre à la fois des éléments analysés, de la situation géographique et du moment de prélèvement (tests significatifs une année mais pas la suivante). D'après nos tests, l'ordre de grandeur de cette surévaluation chez le pin maritime est globalement faible pour les macronutriments, seule une surévaluation significative de 3 % a été montrée pour le soufre. Ce résultat rassurant tend à montrer que la validité des analyses n'est pas remise en cause par l'absence de lavage pour les macronutriments. Pour les micronutriments, cette surévaluation est chez les pins maritimes au maximum de 21 % dans le cas du cuivre, mais le chlore, le sodium et le fer peuvent également être affectés (surévaluation comprise entre 6 et 17 %). Pour ces éléments, les variabilités interannuelle, interplacette et peut-être dans une moindre mesure intraplacette risquent d'être affectées par ce biais. Les tests réalisés individuellement par placette ont montré la même tendance: faible effet du lavage pour les macronutriments (entre 2 et 8 %) et effet plus important pour certains micronutriments (surévaluation jusqu'à 38 % pour le cuivre).

Ces résultats ne permettent pas de proposer dès maintenant une modification du protocole de préparation des échantillons. Ils montrent cependant que le risque de surévaluer dans certains cas les teneurs foliaires est non négligeable. Il est par conséquent recommandé de préciser cette source d'erreur potentielle à la fois en effectuant des tests sur d'autres essences du réseau et en étudiant les relations éventuelles entre les dépôts atmosphériques et les écarts de teneurs entre les échantillons lavés et non lavés.

1.4. Assurance qualité des analyses

Le suivi assurance qualité des analyses foliaires a porté sur les deux échantillons de référence européens : le CRM 100 (feuilles de hêtre) et le CRM 101 (aiguilles d'épicéa). Les objectifs de ce suivi étaient de vérifier (1) l'absence de dérive au cours du temps des analyses qui pouvait induire un biais dans le suivi des teneurs foliaires au cours du temps, (2) l'ordre de grandeur de la variabilité interanalyse pour chaque année du suivi et (3) la comparabilité des analyses avec les éléments certifiés par le BCR (Bureau Communautaire de Référence, Reference materials, 1999) dans le but de comparer le suivi en France avec celui d'autres pays Européens.

L'absence de dérives au cours des 5 premières années d'analyses est globalement vérifiée pour les macronutriments (N, P, S, K, Ca et Mg) aussi bien pour les feuilles de hêtre que pour les aiguilles d'épicéa. Une diminution modérée des teneurs foliaires (au maximum de 10 %) par rapport aux valeurs certifiées a cependant été notée entre 1995 et 1997 pour le potassium, le magnésium et le calcium, alors que la stabilité des teneurs a été remarquable pour l'azote et le phosphore. La situation pour les micronutriments (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu et Zn) est moins bonne. Tous ces éléments, à l'exception du sodium et du chlore, accusent une dérive manifeste entre 1995 et 1997 ou 1998 avec des valeurs plus faibles pendant cette période en particulier dans le cas du hêtre. Par rapport aux analyses réalisées en début de période on note dans le cas du hêtre une diminution des teneurs en 1997 comprise entre 16 % pour l'aluminium et 33 % pour le fer. L'interprétation de cette dérive est toutefois difficile car il manque souvent les valeurs certifiées permettant de savoir si la dérive traduit une surévaluation des teneurs les premières années du suivi ou au contraire une sous-

évaluation entre 1995 et 1998. Les quelques valeurs certifiées existantes tendent à montrer qu'il s'agirait plutôt d'une sous-évaluation entre 1995 et 1998.

L'ordre de grandeur de la variabilité interanalyse évalué par le coefficient de variation est globalement très satisfaisant pour les macronutriments aussi bien chez le hêtre que chez l'épicéa (CV^7 moyen entre 1995 et 1998 = 2,3 %). Cette variabilité est homogène sur l'ensemble de la période à l'exception du soufre et du magnésium dans les feuilles de hêtre en 1998 (CV respectivement 14 et 10 %). La variabilité interanalyse des micronutriments est plus importante mais reste en moyenne assez faible ($CV = 6,6 \%$) sauf dans le cas du sodium ($CV = 19,6 \%$ et $71,6 \%$ pour les CRM 100 et 101). Ces résultats montrent finalement que l'imprécision due aux techniques d'analyses est en moyenne faible mais qu'elle peut être assez différente selon les années en particulier pour les micronutriments.

La comparabilité des analyses avec les valeurs certifiées par le BCR a pu être évaluée seulement pour les macronutriments (sauf le potassium: CRM 101), le chlore, l'aluminium (CRM 100 et CRM 101), le manganèse et le zinc (CRM 101). Sur l'ensemble de la période considérée, les teneurs foliaires en azote, en phosphore, en calcium (CRM 101) et en magnésium (CRM 101) sont très proches des valeurs certifiées. Par contre les teneurs foliaires en soufre, en potassium, en calcium (CRM 100), en magnésium (CRM 100), en aluminium, en manganèse et en zinc sont en moyenne inférieures aux valeurs certifiées. Comme mentionné ci-dessus, les teneurs les plus faibles ont été obtenues entre 1995 et 1997 ou 1998. Seules les teneurs en chlore sont selon les années tantôt supérieures, tantôt inférieures aux valeurs certifiées.

En définitive, les 5 premières années d'analyses ont montré la robustesse des données dans le cas des macronutriments et deux problèmes dans le cas des micronutriments: (1) une grande variabilité interanalyse pour le sodium qui empêche quasiment d'analyser correctement son évolution au cours du temps et (2) une dérive des analyses dans le sens d'une diminution des teneurs dans les années 1995-1997 pour l'aluminium, le fer, le manganèse, le cuivre et le zinc mais dont les valeurs ne sont pas toutes certifiées. Cette dérive représente une difficulté surtout dans la perspective de comparaisons avec d'autres pays Européens. D'autre part, l'absence de valeur certifiée pour un certain nombre de ces éléments, demandera l'application d'une correction en fonction des valeurs moyennes calculées sur des périodes suffisamment longues (20 ou 30 ans).

1.5. Evaluation de différentes sources de variabilité

Malgré tout leur intérêt pour apprécier l'état nutritionnel des arbres, les analyses foliaires présentent des difficultés d'interprétation liées principalement au caractère provisoire des seuils indicatifs utilisés dans ce rapport et aux nombreuses sources de variabilité qui déterminent finalement les teneurs foliaires. Le protocole d'échantillonnage pour le réseau RENECOFOR a été conçu pour réduire certaines sources de variabilité (choix initial des placettes d'aspect homogène et arbres dominants ni trop jeunes ni trop âgés, périodes dans l'année correspondant à une relative stabilité des teneurs, prélèvement uniquement dans le tiers supérieur des houppiers) et pour en intégrer d'autres de manière aussi homogène que possible (directions de prélèvement équilibrées pour chaque placette). Selon les objectifs poursuivis (évolution au cours du temps des teneurs foliaires, différence d'état sanitaire entre deux placettes, différence de fertilité de deux sites, ...) les facteurs autres que les facteurs étudiés constituent autant de "bruits de fond" et apportent une variabilité dont il est important de connaître un ordre de grandeur de leur amplitude. Les cinq premières années d'analyses réalisées sur le réseau ont permis d'en évaluer trois: les variabilités intraplacette, interplacette et interannuelle en plus de la variabilité liée aux techniques d'analyse qui a été exposée ci-dessus.

⁷ $CV = \text{coefficient de variation} = (\text{écart type}/\text{moyenne}) * 100$

La variabilité due (1) aux arbres d'une même placette, (2) aux différentes placettes d'une même essence, et (3) aux différences interannuelles est comprise en moyenne entre 10 et 35 % de coefficient de variation, exception faite pour la variabilité de la teneur foliaire en sodium qui est globalement de 80 %. Pour les autres nutriments, ces valeurs globales masquent en fait des différences selon les cas. L'azote, le phosphore, et le soufre présentent un CV moyen proche de 10 %. Le potassium, le magnésium, le calcium, le zinc, et le fer présentent un CV compris entre 15 et 20 % et pour le chlore, l'aluminium, le manganèse, et le cuivre, le CV est compris entre 30 et 35 %. Toutes sources de variabilité confondues, on constate que la variabilité des teneurs est généralement moins importante pour les macronutriments que pour les micronutriments. Cette variabilité globale des macronutriments est comprise entre 10 et 20 %, alors que celle des micronutriments est comprise entre 20 et 35 % exception faite du sodium. Le même classement est observé pour la variabilité due aux analyses (CV < 5 % pour les macronutriments et CV entre 5 et 10 % pour les micronutriments). Cette observation coïncide avec le fait que pour les macronutriments, des seuils indicatifs ont été proposés pour la plupart des essences du réseau alors que pour les micronutriments, très peu de seuils indicatifs ont été proposés. Finalement, l'ordre de grandeur trouvé pour les variabilités intraplacette, interplacette et interanalyse relativise les comparaisons avec les systèmes de seuils indicatifs. Quand les teneurs trouvées se trouvent proches des seuils indicatifs (carence, critique ou optimum) il est donc nécessaire de tenir compte de ces ordres de grandeur pour savoir si la placette, l'essence une année donnée ou l'essence pendant une période donnée est en dessous ou au dessus de ces seuils. Toutefois, dans le cas des seuils de carence, le fait de trouver des teneurs proches de ces seuils constitue déjà en soi un signal d'alarme.

L'importance relative des trois sources de variabilité: intraplacette, interplacette et interannuelle dépend fortement des éléments foliaires et dans une moindre mesure des essences. Dans le cas des macronutriments (sauf pour le soufre) et de certains micronutriments (le manganèse et le zinc) la variabilité interannuelle est inférieure aux variabilités intra- et interplacette. Les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") conduisent sensiblement aux mêmes conclusions pour le classement de ces deux facteurs à l'exception du zinc pour lequel l'effet "année" est tantôt supérieur (DOU, EPC, SP), tantôt inférieur (CHP, CHS, HET, PS) à l'effet "placette". Pour les mêmes éléments, le coefficient de variation intraplacette est supérieur au CV interplacette (soufre, potassium, et zinc), inférieur (azote, phosphore, et manganèse) ou égal (calcium, et magnésium). Dans le cas des autres micronutriments (sodium, chlore, aluminium, fer, et cuivre), la variabilité interannuelle est relativement proche de la variabilité entre placettes ou entre arbres. Les analyses de variance à deux facteurs ("placette" et "année") conduisent à des conclusions semblables. Les différences de classement des sources de variabilité apparaissent pour ces éléments au cas par cas, selon les essences. Les données actuellement disponibles ne permettent pas de savoir si l'effet placette dépend de l'année d'analyse. En effet l'interaction entre les effets "placette" et "année" ne pourra être testée à l'aide d'analyses de variance factorielles seulement quand plusieurs années d'analyses individuelles, arbre par arbre seront disponibles.

Dans des cas particuliers relativement peu nombreux, certaines sources de variabilité liées à une essence et un élément foliaire donné sont nettement supérieures à la moyenne. Dans ces situations les éléments dans le sol ou les dépôts atmosphériques permettent de mieux comprendre ces observations. C'est notamment le cas pour la variabilité interplacette du calcium foliaire chez le hêtre (CV = 45 %) et l'épicéa (CV = 50 %). Ces essences sont installées pour certaines placettes sur calcaire et pour d'autres sur sol non calcaire. Une variabilité interplacette des teneurs foliaires en chlore particulièrement élevée chez le hêtre (CV = 93 %) pourrait être due à des écarts importants des dépôts atmosphériques entre placettes. Les premiers tests de lavage d'échantillons foliaires ont en effet montré que les teneurs foliaires en chlore pouvaient être surévaluées du fait de l'absence de lavage (cf. p.18). Les dépôts annuels de chlorure sous couvert forestier dans les trois placettes de hêtre du sous-réseau CATAENAT indiquent des écarts importants entre placettes pouvant aller

jusqu'à un facteur 8 (entre 7,5 et 61,1 kg/ha/an en 1996) pour une année donnée (Ulrich et al., 1998). Cette comparaison est cependant donnée uniquement à titre indicatif car nous ne savons pas si les valeurs de dépôts enregistrés sur trois placettes sont représentatives des 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. D'autre part, on constate que la variabilité interplacette des teneurs foliaires en chlore est moyenne chez le pin maritime (CV = 25 %) alors que les dépôts sous couvert en chlorure varient d'un facteur 9 pour 4 des 7 placettes de pin maritime (Ulrich et al., 1998). La variabilité interplacette importante des teneurs foliaires en manganèse chez le hêtre, le pin maritime et le sapin ne semblent pas résulter d'un biais du à l'absence de lavage des échantillons étant donné qu'aucun effet "lavage" n'a été mis en évidence pour cet élément (cf. **Tableau 6**, p.20 et **Tableau 7**, p.21). On remarque cependant que les dépôts de manganèse peuvent être très élevés (jusqu'à 4,6 kg/ha/an sous couvert pour la placette de sapin SP 57 en 1995, Ulrich et al., 1998) et qu'ils sont très variables entre les différentes placettes d'une même essence (facteur 4 chez le hêtre mais pour seulement 3 placettes, facteur 9 pour le pin maritime et facteur 57 pour le sapin). Une variabilité intraplacette élevée des teneurs foliaires en cuivre chez le pin laricio et pour les placettes en mélange chêne sessile/chêne pédonculé pourrait résulter d'une variabilité intraplacette importante du cuivre dans le sol (voir Ponette et al., 1998). Dans le cas des placettes en mélange chêne sessile/chêne pédonculé, cette variabilité pourrait également résulter du mélange lui-même. Le phénomène de récession connu en particulier pour le potassium, le magnésium et le manganèse peut jouer un rôle non négligeable dans des tests de lavage.

Il est enfin important de mentionner que les variabilités intraplacette, interplacette et analytique sont vraisemblablement bien définies à partir des cinq premières années d'analyses alors que la variabilité interannuelle est certainement appelée à évoluer en fonction du nombre d'années d'analyses pris en compte. La prise en compte de cinq années ne reflète en effet pas l'essentiel de la variabilité interannuelle du fait notamment des conditions climatiques variables. Hippeli et Branse (1992) ont montré par exemple qu'une augmentation de pluviosité et des températures moyennes plus élevées pendant la saison de végétation augmentait les teneurs foliaires en N, P, Ca et Mg chez le pin (in Duquesnay et al., *in press*).

2. Etat nutritionnel initial des placettes

A l'issue des cinq premières années de suivi des teneurs en nutriments foliaires sur le réseau RENECOFOR, l'état nutritionnel de ces 102 placettes apparaît globalement satisfaisant à la fois selon les seuils^{Eu} proposés pour la comparaison des analyses foliaires dans les différents pays Européens et selon les seuils indicatifs^{Fr} proposés par rapport à l'état sanitaire et la croissance des arbres. Les équilibres entre les principaux nutriments sont également satisfaisants pour la plupart des placettes. Ces résultats correspondent en ce sens aux critères de choix initiaux des placettes qui ont été sélectionnées, entre autres, d'après leur aspect plutôt sain et exempt de particularités manifestes. D'autre part ces résultats vont dans le même sens que les premières évaluations réalisées pour les analyses foliaires en 1995 à l'échelle de l'Europe aussi bien pour les teneurs foliaires que pour les équilibres entre éléments (Stefan et al., 1997). Une analyse plus précise des résultats permet cependant de mettre en évidence certains points relatifs à une essence particulière ou à un nutriment donné. Dans la suite du texte, toutes les comparaisons avec les teneurs foliaires dans d'autres pays Européens sont issues des analyses réalisées en 1995 et présentées par Stefan et al., 1997.

Par rapport aux seuils^{Eu}, on observe sur le réseau RENECOFOR que certains nutriments présentent des teneurs assez élevées (classe 3). C'est notamment le cas pour l'azote, en particulier chez le chêne pédonculé et le hêtre (respectivement 73 % et 66 % des placettes en classe 3 pour la période 1993-1997). Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour l'Angleterre en 1995 (respectivement 55 % et 93 % des placettes de hêtre et de chêne étaient en classe 3). On remarque d'autre part que ces teneurs élevées en azote foliaire ne se retrouvent pas dans d'autres pays d'Europe. Elles sont au

contraire parfois assez faibles comme en Espagne pour les chênes (62 % des placettes en classe 1), en Slovaquie et en Slovénie pour le hêtre (respectivement 55 % et 67 % des placettes en classe 1). Les dépôts atmosphériques permettent d'expliquer une part importante de la variabilité des teneurs foliaires en azote à l'échelle de l'Europe (De Vries et al., 1998). Les teneurs foliaires en phosphore sont également particulièrement élevées dans les placettes d'épicéa du réseau RENECOFOR (82 % des placettes en classe 3). Par rapport aux teneurs observées en 1995 dans d'autres pays Européens, ces valeurs sont particulièrement élevées (au maximum 20 % des placettes en classe 3 pour la Bulgarie).

Toujours par rapport aux seuils^{Eu}, certains nutriments sont présents à des teneurs assez faibles dans les placettes du réseau RENECOFOR. L'essence la plus caractéristique de ce point de vue est le pin maritime (respectivement 89 %, 89 % et 97 % des placettes en classe 1 pour l'azote, le phosphore et le soufre). Ces pourcentages reflètent directement la pauvreté en éléments minéraux de ces placettes. Les comparaisons avec les valeurs pour d'autres pays d'Europe sont difficiles étant donné que les différentes espèces de pin ont été regroupées dans le rapport de synthèse. Toutefois on remarque pour les pins que des valeurs particulièrement faibles ont été observées en Russie (région de St Petersburg) et en Finlande pour l'azote, en Autriche, en république Tchèque et en Finlande pour le soufre. Les faibles teneurs en soufre sont observées également dans les placettes RENECOFOR d'épicéa, et de pin sylvestre (respectivement 100 % et 70 % en classe 1). Par contre, les placettes de hêtre sont pour la plupart en classe 2 pour cet élément. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans d'autres pays Européens (De Vries et al., 1998).

Par rapport aux seuils indicatifs^{Fr} un nombre restreint de placettes se caractérise globalement pendant la période 1993-1997 par des valeurs au dessus du seuil optimum ou en dessous du seuil de carence. Les situations correspondant à des teneurs foliaires supérieures aux seuils optimaux concernent l'azote (les placettes de chêne et de hêtre), le potassium (les placettes de chêne pédonculé et d'épicéa), et le manganèse (les placettes d'épicéa, de pin laricio, de pin sylvestre et de sapin). A l'opposé, on a observé pour certaines essences et certains éléments des teneurs foliaires inférieures aux seuils indicatifs de carence (cf. **Carte 2**, à 7, p.53 à 58 et **Tableau A 1**, p.150). Ces cas peu nombreux concernent l'azote (une placette de pin maritime et une placette de pin sylvestre), le magnésium (deux placettes de hêtre et une placette de sapin), et le soufre (une placette d'épicéa) pour les macronutriments et le fer (trois placettes d'épicéa et une placette de sapin) pour les micronutriments.

L'utilisation des deux systèmes de seuils pour évaluer l'état nutritionnel des arbres représente finalement deux approches complémentaires qui permettent (1) de détecter des problèmes nutritionnels de grande ampleur (seuils^{Eu}) et (2) de détecter dans des contextes écologiques plus restreints des problèmes nutritionnels traduits par des pertes de productivité et une détérioration de l'état sanitaire (Seuils indicatifs^{Fr}).

L'attention du lecteur doit finalement être attirée sur deux points importants destinés à relativiser l'état nutritionnel apparemment correct des placettes RENECOFOR dans leur ensemble pour la période considérée.

Le premier concerne la valeur réelle des seuils proposés, aussi bien dans le cas des seuils^{Eu} que dans celui des seuils indicatifs^{Fr}. Les premiers ont été proposés à partir des fourchettes de valeurs observées dans 16 pays Européens sur des arbres en condition naturelle. Faute de disposer de véritables témoins, une dérive généralisée des teneurs foliaires risque de ne pas être décelée, au moins dans un premier temps, si les teneurs moyennes observées dans ces pays sont soit élevées soit faibles au moment de la proposition des seuils. Ce système de seuils^{Eu} doit finalement être utilisé strictement dans le but de comparaisons entre pays, sans faire aucune référence à l'état physiologique des arbres. La comparaison des teneurs foliaires observées dans le réseau

RENECOFOR avec ces seuils permet finalement uniquement de conclure que ces données sont globalement situées dans les valeurs moyennes observées dans d'autres pays Européens. Les seuils indicatifs^{Fr} ont été proposés à partir de résultats obtenus le plus souvent sur de jeunes plants. Or les teneurs foliaires en nutriments sont fonction de l'âge des arbres et les prélèvements dans le sol ainsi que les phénomènes de redistribution interne sont également fonction de l'âge. Cela revient finalement à dire que les besoins nutritifs des arbres sont fonction de l'âge (ils sont plus importants chez de jeunes arbres) et par conséquent les seuils indicatifs^{Fr} devraient également dépendre de l'âge des arbres. Il semble donc raisonnable d'envisager une révision à la baisse de ces seuils, ce qui aurait comme conséquence une appréciation à la hausse de l'état nutritionnel des arbres sur le réseau. S'il est encore prématuré de proposer de telles révisions des seuils, le pourcentage de défoliation globalement faible et des accroissements généralement corrects (cf. Cluzeau et al., 1998) sont autant d'indices qui vont dans le sens d'une révision des seuils.

Le deuxième point important à prendre en compte pour relativiser l'état nutritionnel globalement satisfaisant des placettes RENECOFOR est lié aux différentes sources de variabilité des teneurs foliaires (intraplacette, interplacette et interannuelle). Plus la variabilité des teneurs foliaires est élevée, plus le risque est élevé de mal qualifier l'état nutritionnel d'un nombre important d'arbres par rapport à ces seuils. Il semble d'après les premières estimations faites sur le réseau que ce risque est assez faible dans le cas des macronutriments et plus élevé pour les micronutriments.

3. Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments

Après avoir caractérisé l'état nutritionnel initial des arbres sur les placettes du réseau RENECOFOR un des objectifs majeur de ce dispositif est de suivre les variations de cet état au cours du temps. Le nombre d'années de mesures est encore trop faible pour discerner des tendances continues à l'échelle de l'essence. Les ordres de grandeur des variabilités intraplacette, interplacette et interannuelle estimés à l'aide des coefficients de variation sont en effet assez proches (globalement entre 10 et 35 %). Cependant on constate que l'effet de l'année d'échantillonnage est significatif pour la plupart des éléments, des rapports entre éléments et des essences à l'exception du douglas (effet "année" significatif uniquement pour Ca, Cl, Fe, Cu et Zn), du pin maritime (effet "année" significatif uniquement pour N, S, Na, Cl, Al, et Cu), et quelques cas ponctuels. Parallèlement à ce résultat, l'effet lié à la placette est globalement plus important que celui lié à l'année d'échantillonnage (cf. **Tableau 19**, p.78).

A l'échelle de la placette les évolutions des teneurs foliaires moyennes au cours du temps sont indiquées dans les fiches individuelles. On peut constater sur ces graphiques que très peu de placettes présentent des tendances continues pour un élément donné.

4. Premiers croisements avec les données édaphiques, dendrométriques et sanitaires

Les premiers croisements avec les autres données acquises sur le réseau avaient pour but soit d'interpréter les variations des teneurs foliaires (richesse minérale du sol), soit d'interpréter l'état sanitaire ou les variations d'accroissement des arbres.

4.1. Relations entre les teneurs foliaires et la richesse minérale du sol

Les relations analysées dans ce rapport entre les teneurs foliaires en nutriments et la richesse minérale du sol sont basées sur le premier inventaire réalisé entre 1993 et 1995 sur la chimie des sols (Ponette et al., 1997) et sur les teneurs foliaires moyennes en azote, magnésium, potassium et calcium entre 1993 et 1997 (ce rapport). La richesse minérale du sol a été appréciée à la fois par les

teneurs en éléments (N, Mg, K et Ca) et leur stock jusqu'à 40 cm de profondeur. Les relations avec les teneurs foliaires ont été étudiées selon les teneurs et les stocks d'éléments dans les différentes couches de sol (humus LFH, 0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm) et selon les stocks cumulés sur les différentes combinaisons possibles.

Ces relations en général peu étroites dépendent à la fois des éléments, des essences et des couches de sol considérées. Pour les relations significatives à au moins 10 % entre les teneurs foliaires, et les stocks d'éléments dans le sol, en moyenne 46 % de la variance totale des éléments dans les feuilles est expliquée par la régression pour l'azote et le magnésium, 48 % pour le potassium, et 56 % pour le calcium. Les relations entre les teneurs foliaires et les teneurs dans le sol sont généralement moins étroites que celles entre les teneurs foliaires et les stocks dans le sol. Ces résultats sont globalement en accord avec les données de la littérature.

Différents facteurs peuvent contribuer à découpler les teneurs foliaires en nutriments et les éléments minéraux dans le sol. Parmi ces facteurs on peut notamment citer: une forte variabilité intraplacette des éléments dans le sol, des écarts importants entre les éléments échangeables dosés dans le sol et la fraction réellement assimilable par les arbres, l'importance des formes solubles des nutriments dans les feuilles alors que seuls les éléments totaux ont été dosés, et d'un point de vue statistique le nombre de placettes trop réduit pour certaines essences (cf. p.109 et suivantes). L'importance des transferts et des remobilisations internes des nutriments dans les arbres est d'autre part à même de découpler fortement les relations entre les teneurs foliaires en nutriments et les éléments dans le sol. Ce phénomène est particulièrement marqué pour certains éléments (potassium) et chez les arbres adultes. L'activité mycorhizienne doit également être citée pour le rôle important qu'elle peut jouer dans l'alimentation minérale des arbres.

En plus de ces facteurs, le rôle du climat pour mieux comprendre les variations de teneurs foliaires en nutriments est conforté par différents travaux de recherche. Il semble de plus en plus évident que la disponibilité en eau et la température peuvent expliquer une part importante de ces variations (cf. p.112 et suivantes).

Si les mesures réalisées sur le réseau RENECOFOR ne permettent pas de tester chacune de ces différentes sources de variabilité des teneurs foliaires, il n'en reste pas moins que le rôle du climat considéré comme majeur pourra être testé dans les années à venir grâce aux données accumulées dans le sous-réseau météorologique forestier depuis 1995. Cette approche pourra se faire à l'aide d'analyses en régression multiple intégrant les facteurs "sol" et "climat".

4.2. Relations entre l'accroissement en diamètre des arbres et les teneurs foliaires en nutriments

Ces relations ont été étudiées en considérant (1) la moyenne par placette des accroissements en diamètre des 52 arbres "objectif" entre 1993 et 1996 et (2) chaque année entre 1993 et 1996, la moyenne par placette des accroissements en diamètre des 8 arbres "échantillon". Les 13 nutriments dosés et 9 rapports entre nutriments (N/P, S/N, N/K, N/Mg, N/Ca, K/Ca, K/Mg, Ca/Mg, et Fe/Mn) ont été testés.

L'étude de ces relations a été réalisée à la fois pour essayer de déterminer si un élément donné a représenté un facteur limitant de la croissance pendant la période considérée et pour confronter les valeurs seuil de teneur foliaire indiquées dans la littérature avec les renseignements fournis par ces relations.

Sur l'ensemble des relations analysées, globalement peu de relations significatives ont été mises en évidence. L'élément foliaire le plus souvent corrélé positivement à l'accroissement des 52 arbres "objectifs" est l'azote pour le chêne sessile, le douglas, l'épicéa et le sapin. Ces relations ne sont cependant pas très étroites (significatives à 5 % et R^2 compris entre 0,20 et 0,65) et les effectifs réduits de placettes par essence incitent à considérer ces relations avec prudence. D'autre part, le pin sylvestre est l'essence pour laquelle le plus de relations significatives ont été observées. L'accroissement en diamètre est positivement corrélé à la teneur foliaire en phosphore tandis qu'il est négativement corrélé aux teneurs foliaires en magnésium et en aluminium. Les relations entre l'accroissement des 8 arbres "échantillon" et les teneurs foliaires des mêmes arbres étaient encore moins étroites. Deux limitations importantes ont vraisemblablement réduit la qualité des relations: (1) la variabilité interannuelle des paramètres mesurés, et (2) la faible précision des mesures d'accroissement en diamètre sur une année. Pour les études ultérieures, il sera donc préférable d'évaluer les accroissements sur des périodes plus longues. Les équilibres entre nutriments foliaires ne semblent pas devoir expliquer une part plus importante de l'accroissement en diamètre des arbres. Les relations significatives entre éléments prennent en compte le plus souvent l'azote mais ces relations correspondent aux essences représentées par un nombre faible de placettes ce qui limite fortement leur robustesse.

Malgré le faible degré de liaison avec l'accroissement en diamètre des arbres, ces relations permettent de préciser le rôle de certains nutriments : soit en tant que facteur limitant primaire dans le cas de corrélations positives, soit en tant que facteur limitant secondaire dans le cas de corrélations négatives quant les teneurs en nutriments sont aux alentours de la valeur optimum. Deux situations semblent correspondre à ce cas de figure: chez le chêne sessile (l'azote étant le facteur limitant primaire et l'aluminium le facteur limitant secondaire), et chez le pin sylvestre (le phosphore jouant le rôle de facteur limitant primaire, le magnésium et l'aluminium pouvant être des facteurs limitants secondaires). Des séries de données plus longues sont cependant nécessaires pour confirmer ou infirmer ces observations.

Une révision des valeurs des seuils indicatifs^{Fr} peut être proposée dans un nombre limité de cas. L'accroissement en diamètre continue à augmenter linéairement avec les teneurs en azote jusqu'à 28 mg/g chez le chêne sessile, et jusqu'à 18 mg/g chez l'épicéa alors que les teneurs optimales indiquées en France sont respectivement de 22 et 15 mg/g. De la même manière, les teneurs optimales en phosphore foliaire pour le sapin semblent être plus proches de 1,7 mg/g que des 1,5 mg/g proposés comme optimum. Ces résultats suggèrent donc une révision à la hausse des teneurs optimales pour ces essences et pour ces éléments. Les seuils critiques devraient également être modifiés en conséquence.

Comme mentionné ci-dessus pour les relations entre les teneurs foliaires et les éléments minéraux dans le sol, d'autres facteurs tels que les conditions climatiques et la concurrence interindividuelle pour l'accès aux ressources (eau, lumière, éléments minéraux) doivent être considérés pour expliquer l'accroissement des arbres.

Malgré les limites imposées par la précision des mesures d'accroissement en diamètre et la précision de l'estimation des teneurs foliaires en nutriments au niveau de la placette, cette première étude de corrélation réalisée sur les données du réseau montre qu'il est déjà possible de mettre en évidence des relations significatives entre accroissement et nutriments foliaires. A plus long terme l'importance des facteurs climatiques sera également évaluée pour expliquer l'accroissement des arbres. Cette approche s'intègre finalement dans un contexte plus global de l'étude de l'accroissement des peuplements forestiers, et de leur dysfonctionnement, notamment dans l'optique des changements globaux (température, CO₂ atmosphérique, dépôts atmosphériques).

4.3. Relations entre le pourcentage de défoliation et les teneurs foliaires en nutriments

Parmi les nombreux facteurs pouvant expliquer le pourcentage de défoliation des arbres, une nutrition minérale insuffisante, ou au contraire des phénomènes de toxicité ont été cités dans la littérature. La tendance à l'augmentation des pourcentages de défoliation observée sur le réseau Européen et sur le réseau RENECOFOR depuis 1995 représente une conjoncture favorable pour étudier les relations avec différents facteurs potentiellement explicatifs. Les relations entre la défoliation et chacun des 13 nutriments foliaires analysés la même année ont été étudiées. D'autre part, les relations entre les défoliations l'année (n) et les teneurs foliaires l'année (n-1) ont également été étudiées pour chaque élément foliaire afin de prendre en compte un éventuel effet différé des teneurs foliaires sur la défoliation.

Cette première approche des relations entre les pourcentages de défoliation et les teneurs en nutriments foliaires rassemblés sur le réseau RENECOFOR a montré que globalement l'état nutritionnel est faiblement corrélé avec les variations de défoliations d'une année sur l'autre. Les liaisons les plus étroites (R^2 entre 0,43 et 0,62) ont été observées chez le pin maritime (aluminium foliaire), chez l'épicéa (zinc et calcium foliaire), et chez le douglas (magnésium foliaire). Si un problème de carence peut être envisagé chez le pin maritime et le douglas (corrélations négatives), on peut supposer des phénomènes de toxicité chez l'épicéa (corrélations positives). D'autre part, l'absence d'arrière effet de l'état nutritionnel des arbres sur la défoliation est suggéré par des corrélations encore plus faibles avec les teneurs foliaires l'année n-1.

Il est raisonnable de penser que la série de mesures encore trop réduite dans le temps, et l'absence de pourcentage de défoliation nettement au dessus de 25 % pour certaines essences peut expliquer en partie ces relations peu étroites. Le rôle d'autres facteurs non liés à la nutrition des arbres est vraisemblablement important en particulier l'âge, les facteurs climatiques, et les défoliateurs. La relation assez générale avec l'âge des arbres pose un problème pour l'analyse des données étant donné la structure d'âge des placettes RENECOFOR. Cela oblige par conséquent à envisager une stratification des données en fonction de l'âge pour dissocier cet effet sur la défoliation de celui de la nutrition minérale. Le nombre limité de placettes pour une essence donnée ne permet cependant pas une telle stratification.

Cette première étude des relations entre la défoliation et les nutriments foliaires souligne finalement tout l'intérêt d'une approche multifactorielle pour la compréhension des atteintes à la santé des forêts. Les données récoltées dans le sous-réseau météorologique forestier et les observations de l'état sanitaire des arbres seront à ce titre précieuses pour aborder d'ici quelques années une analyse multifactorielle intégrant les facteurs climatiques, nutritionnels et biotiques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude des cinq premières années d'analyse sur le réseau RENECOFOR a permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

- Le planning de prélèvement des échantillons a globalement été respecté entre 1993 et 1997 et l'écart moyen entre deux dates de prélèvement successives sur une même placette est assez faible.
- L'équilibre entre les directions de prélèvement a mieux été respecté la première année que les années suivantes ce qui justifierait un rééquilibrage des prélèvements à l'échelle de la placette.
- La surévaluation des teneurs foliaires en nutriments due à l'absence de lavage des aiguilles de pin maritime est faible pour les macronutriments (au maximum 3 % pour le soufre) et plus élevée pour les micronutriments (au maximum de 21 % pour le cuivre). Ce biais dépend à la fois des éléments, du site et de l'année et l'effet "essence" devrait être évalué.
- L'assurance qualité des analyses a montré grâce aux échantillons de référence (CRM 100 et CRM 101) la robustesse des données dans le cas des macronutriments et dans le cas des micronutriments une grande variabilité interanalyse pour le sodium ainsi qu'une dérive négative des analyses dans les années 1995-1997 pour l'aluminium, le fer, le manganèse, le cuivre et le zinc.
- Les coefficients de variation intraplacette, interplacette et interannuelle des teneurs foliaires en nutriments sont comprises en moyenne entre 10 et 35 % de (sauf pour le sodium: CV = 80 %). Ils sont moins importants pour les macronutriments (CV entre 10 et 20 %) que pour les micronutriments (CV entre 20 et 35 %) et l'effet placette est généralement supérieur à l'effet "année" mais la variabilité interannuelle est vraisemblablement moins bien décrite que les deux autres.
- L'état nutritionnel des 102 placettes du réseau apparaît globalement satisfaisant à la fois selon les seuils^{Eu} et selon les seuils indicatifs^{Fr}. Les équilibres entre les principaux nutriments sont également satisfaisants pour la plupart des placettes. Les teneurs en azote sont cependant élevées pour le chêne et le hêtre, les teneurs en soufre sont étonnamment moyennes à faibles et des teneurs faibles sont visibles pour le pin maritime (N, P, S).
- Aucune tendance continue des teneurs en nutriments foliaires ne se dessine au cours du temps d'après les 5 années de suivi.
- Les relations entre les nutriments foliaires et la richesse minérale du sol sont en général peu étroites (en moyenne R^2 entre 46 % et 56 % pour les regressions significatives) et dépendent à la fois des éléments, des essences et des couches de sol considérées. Le calcium est l'élément pour lequel les relations semblent les plus étroites. Les relations entre les teneurs foliaires et les teneurs dans le sol sont généralement moins étroites que celles entre les teneurs foliaires et les stocks dans le sol.
- Peu de relations significatives ont été obtenues entre les accroissements en diamètre des 52 arbres "objectif" et les teneurs foliaires en nutriments. L'azote foliaire est significativement corrélé avec l'accroissement pour le chêne sessile, le douglas, l'épicéa et le sapin (R^2 entre 0,20 et 0,65). Le pin sylvestre est l'essence pour laquelle le plus de relations significatives ont été

observées (P, Mg, Al). La variabilité interannuelle des paramètres mesurés, et la faible précision des mesures d'accroissement en diamètre sur une année ont vraisemblablement réduit la qualité des relations. Les teneurs foliaires optimales semblent devoir être révisées à la hausse pour l'azote chez le chêne sessile (28 mg/g au lieu de 22 mg/g) et chez l'épicéa (18 mg/g au lieu de 15 mg/g) et pour le phosphore chez le sapin (1,7 mg/g au lieu de 1,5 mg/g).

- Peu de relations significatives entre les pourcentages de défoliation et les teneurs en nutriments foliaires ont été mises en évidence. Les liaisons les plus étroites (R^2 entre 0,43 et 0,62) ont été observées chez le pin maritime (Al), chez l'épicéa (Zn et Ca), et chez le douglas (Mg).

A l'issue de cette première évaluation des données d'analyses foliaires, il est possible d'envisager les perspectives et améliorations suivantes:

- Améliorer l'équilibre des prélèvements entre les différentes directions à l'échelle de la placette.
- Evaluer l'ordre de grandeur de la variabilité des teneurs foliaires en nutriments introduite par les écarts entre les dates de prélèvement d'une année sur l'autre.
- Préciser l'effet "lavage des échantillons" pour d'autres essences et d'autres années.
- Améliorer la précision des mesures d'accroissement en diamètre (sur des périodes plus longues) pour préciser les relations entre les teneurs foliaires en nutriments et les accroissements.
- Tester les données d'accroissement en surface terrière à la place des accroissements en diamètre pour étudier les relations avec les teneurs foliaires.
- Tester les relations entre les teneurs foliaires et certains rapports de teneurs en éléments minéraux dans le sol.
- Tester les relations entre les teneurs en nutriments foliaires et les teneurs en d'autres éléments dans le sol.
- Augmenter le nombre de placettes par essence (notamment en douglas, pin maritime et chêne pédonculé, essences pour lesquelles le réseau compte actuellement 6, 7 et 9 placettes respectivement) pour les analyses foliaires en associant éventuellement des placettes du réseau Européen.
- Etudier les relations entre les teneurs en nutriments foliaires, certains paramètres climatiques (pluviosité, température disponibilité en eau ...), la solution du sol, le rapport C/N et le taux de saturation en bases.
- Utiliser l'approche en régression multiple pour intégrer les facteurs climatiques et l'alimentation minérale.
- Une série de données plus longue permettra également de préciser les valeurs des seuils indicatifs^{Fr} pour les essences du réseau.
- La prochaine évaluation pourrait être réalisée en 2005, après la deuxième série d'analyses individuelles par arbre sur chaque placette.

BIBLIOGRAPHIE

- Althere E., Evers F.H., 1974. Unerwarteter Düngungserfolg bei Magnesiummangel in einem jungen Buchenbestand auf mittlerem Buntsandstein der Adenwaldes. *Allg. Forst. und jagdz.*, 145 (7) 121-124.
- Bassow S.L., Bazzaz F.A., 1997. Intra- and inter-specific variation in canopy photosynthesis in a mixed deciduous forest. *Oecologia*, 109 : 507-515.
- Bert G. D., 1992. Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude phytoécologique et dendrochronologique. Thèse de doctorat, 214 p.+ annexes.
- Bonneau M., 1986. Diagnostic foliaire. Cours de pédologie forestière -2^{ème} partie, chapitre VI. ENGREF, 58 p.
- Bonneau M., 1988. Le diagnostic foliaire. *Revue Forestière Française*, XL, n° spécial : 19-28.
- Bonneau M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF ed., 367 p.
- Bonneau M., Landmann G., Vannière B., Ulrich E., Duplat P., Demolis C., 1994. Manuel de référence n° 1 pour la sélection et l'implantation des placettes permanentes. Placettes de niveau 1 (Level II plots within the European Union). Première version, décembre 1994. O.N.F., Département des Recherches Techniques, D.T.C. 5 (Fontainebleau), 34 p.
- Boswell M.T., Gore S.D., Lovison G., Patil G.P., 1996. Annotated bibliography of composite sampling Part A: 1936-92. *Environmental and Ecological Statistics* 3, 1-50.
- Brêthes A., Ulrich E. (coordinateurs), 1997. RENECOFOR - Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Direction des Recherche Techniques, ISBN 2 - 84207 - 112 -3, 573 p.
- Bureau Communautaire de Référence, référence materials, 1999. European commission joint research centre, IRMM (Institute for Référence Materials and Measurements).
- Castro-Díez P., Villar-Salvador P., Pérez-Rantomé C., Maestro-Martinez M., Montserrat-Martí G., 1997. Leaf morphology and leaf chemical composition in tree *Quercus* (Fagaceae) species along a gradient rainfall in NE Spain. *Tree*, 11, 127-134.
- Cenni E., Bussotti F., Galeotti L., 1998. The decline of a *Pinus nigra* Arn. reforestation stand on a limestone substrate: the rôle of nutritional factors examined by means of foliar diagnosis. *Ann. Sci. For.*, 55 (5) : 567-576.
- Clément A., Gessel, S.A., 1985. N, S, P status and protein synthesis in the foliage of Norway (*Picea abies* L. Karst) and Austrian black Pine (*Pinus nigra* Arnold var *nigra*). *Plant and soil*, 85, 345-359.
- Clüsener M. G., 1990. The content of Mg, Ca and K in plant tissues and their relationship to soils in natural ecosystems p.345-356. In "Element concentration cadasters in ecosystems, methods of assessment and evaluation. Lieth H. and Markert B. (eds). VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim 448 p.
- Cluzeau C., 1998. RENECOFOR - Manuel de référence n°2 pour les méthodes de mesure des paramètres dendrométriques. 1^{ère} version, décembre 1998. O.N.F., Département des Recherches Techniques, D.T.C. 5 (Fontainebleau), 27 p.
- Cluzeau C., Ulrich E., Lanier M., Garnier F., 1998. RENECOFOR - Interprétation des mesures dendrométriques de 1991 à 1995 des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207-151-4, 309 p.
- Colin-Belgrand M., Ranger J., Bouchon J., 1996. Internal nutrient translocation in chestnut tree stemwood: III. Dynamics across an age series of *Castanea sativa* (Miller). *Annals of Bot.*, 78, 729-740.
- Dagnélie P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. Volume II. Presses agronomiques de Gembloux ed., 463 p.
- Dambrine E., Le Goaster S., Ranger J., 1991. Croissance et nutrition d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. II Prélèvement racinaire et translocation d'éléments minéraux au cours de la croissance. *Acta Oecologica*, 12, 791-808.
- de Vries W., Reinds G.J., Deelstra H.D., Klap J.M., Vel E.M, 1998. Intensive Monitoring of Forests Ecosystems in Europe, FIMCI, Technical Report. EC-UN/ECE, Brussel and Geneva, 104 p.(ISSN 1020-6078).
- Dobremez J.-F., Camaret S., Bourjot L., Ulrich E., Brêthes A., Coquillard P ; Dume G., Dupouey J.-L., Forgeard F., Gauberville C., Gueugnot J., Picard J.-F., Savoie J.-M., Schmitt A., Timbal J.-F.,

- Touffet J., Trémolières M., 1997. RENECOFOR - Inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements du réseau (Campagne 1994/1995). Editeur : Office National des Forêts, Département des recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 111 - 5, 513 p.
- Duplat P., Perrotte G., 1981. Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers. Office National des Forêts - section technique ed., 432 p.
- Duquesnay A., 1998. Changements de la composition foliaire et de la productivité des hêtraies dans le quart Nord-Est de la France entre 1970 et 1995. Thèse de doctorat de l'Université Nancy I, INRA-Nancy, 220 p.+ annexes.
- Duquesnay A., Dupouey J.L., Clement A., Ulrich E., Le Tacon F., *in press*. Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. *Tree Physiology*, 19.
- Duvigneaud P., 1984. L'écosystème forêt. ENGREF-Nancy (ed.), 160 p.
- Ernst W.H.O., 1990. Element allocation and (re)translocation in plants and its impact on representative sampling, p.17-40. In "Element concentration cadasters in ecosystems : methods of assessment and evaluation", Lieth H et Markert B. (eds), VCH, 448 p.
- Evers F. H., 1972. Die jahrweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadel-analytischer Befunde. *Allg. Forst. und jagdz.*, 143 (3/4) 68-73.
- F.I.M.C.I. (Forest Intensive Monitoring Coordinating Institute), 1997. Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe. Technical Report. European Commission-United Nations/Economic Commission for Europe (Bruxelles, Genève) eds., 104 p.
- Fober H., 1986. Genetic differences in the level of macroelements in spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needles of several clones. *Arboretum Kornickie Rocznik XXXI* : 195-204.
- Garner, F.C., Stapanian, M.A. and Williams, L.R., 1988. Composite sampling for environmental monitoring. In "Principles of Environmental Sampling", L.H. Keith (ed), American Chemical Society, Washington, DC, 363-74.
- Heller R., Esnault R., Lance C., 1993. *Physiologie végétale*, 1. Nutrition. Masson ed. 294 p.
- Helmisaari H-S, 1990. Temporal Variation in Nutrient Concentrations of *Pinus sylvestris* Needles. *Scand. J. For. Res.*, 5: 177-193.
- Hendriks C.M.A., de Vries W., van den Burg J., 1994. Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands. Relationships between forest vitality characteristics and the chemical composition of foliage, humus layer, mineral soil and soil solution. Agricultura Research Department. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen. Report 69.2. 55 pp.
- Hippeli P., and Branse C., 1992. Veränderungen der Nährelementkonzentrationen in den Nadeln mittelalter Kiefernbestände auf pleistozänen Sandstandorten Brandeburgs in den Jahren 1946 bis 1988. *Forstwiss. Centralbl.* 111:44-60.
- Hunger W., 1970. Über den Ernährungszustand älterer Fichtenreinbestände auf Pseudogley-Standorten in Jahren mit stark unterschiedlichen Niederschlagverhältnissen. *Archiv für Forstwesen*, vol. 19, n° 9-10, 937-961.
- Ilvesniemi H., 1992. The combined effect of mineral nutrition and soluble aluminium on *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Forest Ecology and Management*, 51 : 227-238.
- Katyal I.C., Sharma R.D., 1980. A new technique of plant analysis to resolve iron chlorosis. *Plant and Soil* 55 (1) 105-119.
- Khalil N., Leyval C., Bonneau M., Guillet B., 1989. Influence du type de nutrition azoté sur le déclenchement de la chlorose du sapin de Nordmann (*Abies nordmanniana*, Spach, 1842). *Ann. Sci. For.* 46, 325-343.
- Kölling C., Pauli B., Häberle K.-H., Rehfuess K.E., 1997. Magnesium deficiency in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) trees influenced by NH₄NO₃ application. *Plant and Soil*, 195 : 283-291.
- Kratochvil, B., and Taylor, J.K., 1981. Sampling for chemical analysis. *Anal. Chem.* 53, 924-38.
- Krivan V., Schaldach G., 1986. Untersuchungen zur Probenahme und - vorbehandlung von Baumadeln zur Elementanalyse. *Fresenius Z Anal Chem*, 324 : 158-167.
- Landmann G. (ed.), 1992. Les recherches en France sur les écosystèmes forestiers. Actualités et perspectives. D.E.R.F., 143 p.
- Landmann G., Bonneau M., Bouhot-Delduc L., Fromard F., Chéret V., Dagnac J., Souchier B., 1995. Crown damage in Norway Spruce and Silver fir: relation to nutritional status and soil chemical characteristics in the french mountains, Chapter 1.2, p.41-81. In "Forest decline and atmospheric deposition effects

- in the french mountains" Landmann G. et Bonneau M. (eds), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 461 p.
- Landmann G., Hunter I. R., Hendershot W., 1997. Temporal and spatial development of magnesium deficiency in forests stands in Europe, North America and New Zealand, Chapter 2, p.23-64. In "Magnesium Deficiency in Forest Ecosystems", Hüttl R. F. et Scaaf W. (eds), Kluwer Academic Publishers (NL), 360 p.
- Landmann G., Nageleisen L.M., Ulrich E., 1998. De nouveaux éléments en faveur d'un glissement récent d'origine méthodologique dans l'appréciation visuelle des cimes des feuillus. Les Cahiers du DSF, 1-1998 (La santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri. Pêche (DERF), Paris, pp.74-76.
- Lange O. L., Weikert R. M., Wedler M., Gebel J., Heder U., 1989. Photosynthese und Nährstoffversorgung von Fichten aus einem Waldschadensgebiet auf basenarmen Untergrund. *Allg Forst Z.*, 3 : 55-64.
- Le Tacon F., 1976. La présence de calcaire dans le sol, influence sur le comportement de l'épicéa commun (*Picea excelsa* Link) et du Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra nigricans* Host.). Nancy: Institut national polytechnique de Lorraine, Thèse Doctorat ès Sciences, 214 p.
- Lemée G., 1978. Précis d'écologie végétale. Chapitre V : "Les facteurs chimiques". Masson (ed), 105-142.
- Liu J.C., Trüby P., 1989. Bodenanalytisch Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) *Z. Pflanzenernähr Bodenk* 152 (4): 307-311.
- Liu X., Ellsworth D.S., Tyree M.T., 1997. Leaf nutrition and photosynthetic performance of sugar maple (*Acer saccharum*) in stands with contrasting health conditions. *Tree Physiol.*, 17 : 169-178.
- Lowry, G.L., 1970. Variations in nutrients of black spruce needles. In "Tree Growth and Forest Soils", pp.235-59. Proc. 3rd N. Am. For. Soils Conf. Raleigh 1968. (Oregon State University Press).
- Mitschick G., Fiedler H.J., 1991. Vergleich verschiedener Reinigungsmethoden für Koniferennadeln aus Immissionsgebieten. *Beiträge für die Forstwirtschaft* 25 1, 1-7.
- Müller-Edzards C., Erisman J.W., deVries W., Dobbertin M., Ghosh S., 1997. Ten years of monitoring forest condition in Europe-Studies on temporal development, spatial distribution and impacts of natural and anthropogenic stress factors. EC-UN/ECE, Overview report. Brussels and Geneva. viii + 19 p.(ISBN 3-926301-01-5).
- Nageleisen L.M., 1998. Les résultats 1997 du réseau Européen de suivi des dommages forestiers. Les Cahiers du DSF, 1-1998 (La santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri. Pêche (DERF), Paris, pp.65-74.
- Neiryneck J., Maddelein D., De Keersmaeker L., Lust N., Muys B., 1998. Biomass and nutrient cycling of a highly productive Corsican pine stand on former heathland in northern Belgium. *Ann Sci. For.*, 55, 389-405.
- Nguyen-Queyrens A., Derré N., Lamant A., Seillac P., 1995. Tolérance au chlorure de sodium et sélectivité Na/K chez 3 races géographiques de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait). *Ann Sci For*, 52 : 465-475.
- Niinemets U., Kull K., 1994. Leaf weight per area and leaf size of 85 Estonian woody species in relation to shade tolerance and light availability. *Forest Ecology and Management*, 70 : 1-10.
- O.N.F. (Office National des Forêts), 1996. Notice de présentation du Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers. Département des Recherches Techniques (Fontainebleau) 38 p.(ISBN 2-84207-021-6).
- Oren R., Schulze E.-D., 1989. Nutritional disharmony and forest decline: a conceptual model, Chapter 4-H, p.425-444. In "Forest decline and air pollution. A study of spruce (*Picea abies*) on acid soils", Schulze E.-D., Oren R., Lange O. L (eds.), *Ecological Studies* vol. 77, Springer-Verlag, 475 p.
- Ponce R., Ulrich E., Garnier F., 1998 : RENECOFOR - Essai de synthèse sur l'histoire des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 133 - 6, 237 p.
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M., Lanier M., 1997. RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 100 - X, 427 p.
- Ponette Q., Ulrich E., Collet G., Kot J., Bruno F., Lanier M., 1996. RENECOFOR - Sous-réseau météorologique forestier. Bilan de la phase test (1994/1995) et perspectives. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 2, 102 p.
- Raitio H., 1999. Needle chemistry, pp.51-69. In "Forest condition monitoring in finland, national report 1998" Hannu Raitio and Tuire Kilponen (Eds). The Finnish Forest Research Institute, Parkano Research Station, research papers 743, 1999, 147 p.

- Schulze E.-D., Oren R., Lange O. L., 1989. Nutrient relations of trees in healthy and declining Norway spruce stands, Chapter 4-F, p.392-417. In "Forest decline and air pollution. A study of spruce (*Picea abies*) on acid soils", Schulze E.-D., Oren R., Lange O. L (eds.), *Ecological Studies* vol. 77, Springer-Verlag, 475 p.
- Snowdon P., Waring H.D., 1984. Composite samples for foliar analysis. *Aust. For. Res.*, 14, 235-42.
- Stefan K., Fürst A., 1998. Indication of S and N inputs by means of needle analyses based on the Austrian bio-indicator grid. *ESPR-Environ. Sci. & Pollut. Res.*, Special Issue No. 1, 63-69.
- Stefan K., Fürst A., Hacker R., Bartels U., 1997. Forest Foliar Condition in Europe. Results of large-scale foliar chemistry surveys (survey 1995 and data from previous years) EC-UN/ECE, Austrian Federal Forest Research Center, 207 p.
- Ulrich E., Adrian M., Lanier M., 1994. Manuel de référence n°6 pour l'échantillonnage foliaire, la préparation des échantillons et l'analyse, 2^{ème} version, juin 1994. O.N.F., Département des Recherches Techniques, D.T.C. 5 (Fontainebleau), 43 p.
- Ulrich E., Lanier M., 1996. RENECOFOR - Etat sanitaire des peuplements du réseau en 1994 et 1995. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-047-X, 36 p.
- Ulrich E., Lanier M., Combes D., 1998. RENECOFOR - Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous-réseau CATAENAT) - Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-134-4, 135 p.
- UN-ECE/I.C.P.(International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), 1998. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part IV : *sampling and analysis of needles and leaves*, 30 p. Programme Coordinating Centre, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (Hamburg, Germany), 4th edition.
- van der Burg J., 1985. Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data. Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw "De Dorschkamp", Wageningen, Rapport n° 414 , 615 p.
- van der Burg J., 1990. Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data, 2. Literature 1985-1989. "De Dorschkamp" Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen, The Netherlands, Rapport n° 591, 220 p.
- van der Eerden L. J., de Vries W., de Visser P.H.B., van Dobben H.F., Steingröver E.G., Dueck T.A., van Grinsven J.J.M., Mohren G.M.J., Boxman A.W., Roelofs J.G.M., Graveland J., 1997. Acid atmospheric deposition and its effects on terrestrial ecosystems in the Netherlands : effects on forest ecosystems, p.83-128. Heij G.J. et Erisman J.W. (eds), Elsevier, 705 p.
- Wagner G., 1990. Variability of element concentrations in tree leaves depending on sampling parameters, p.41-54. In "Element concentration cadasters in ecosystems : methods of assessment and evaluation", Lieth H et Markert B. (eds), VCH, 448 p.
- Weikert R. M., Wedler M., Lippert M., Schramel P., Lange O. L., 1989. Photosynthetic performance, chloroplast pigments, and mineral content of various needle age classes of spruce (*Picea abies*) with and without the new flush: an experimental approach for analysing forest decline phenomena. *Trees*, 3 : 161-172.
- Yin X., 1993. Variation in foliar nitrogen concentration by forest type and climatic gradients in North America. *Can. J. For. Res.* 23: 1587-1602.
- Zech W, Popp E, 1983. Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten - und Tannensterben in NO-Bayern. *Forstwiss Centralbl.*, 102 : 50-55.
- Zech W., 1970. Nadelanalytische Untersuchungen über die Kalkchlorose der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 125 (1) 1-15.
- Zöttl H.W., Mies E., 1983. Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosysteme in Südschwabwald unter Immissionseinfluss. *Mitt. der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 38: 429-434.

ANNEXES

1. Synthèse des principales données sur les nutriments foliaires

Tableau A 1: Synthèse des données d'analyse foliaire pour les 102 placettes du réseau RENECOFOR (1993-1997), (⊙: pas de carence, ?: pas de seuil indicatif, ⊗: carence).

Table A 1: Summary of the foliar analysis data in the 102 plots of the RENECOFOR network (1993 -1997) (⊙: no deficiency, ?: no indicative threshold, ⊗: deficiency).

(Pages suivantes)

Légende:

Code: Identification de la placette, les 2 ou 3 lettres correspondent à l'essence (CHP = Chêne pédonculé, CHS = Chêne sessile, CPS = Chêne pédonculé et sessile en mélange, DOU = Douglas, EPC = Epicéa, HET = Hêtre, PL = Pin laricio, PM = Pin maritime, PS = Pin sylvestre, SP = Sapin). Les deux chiffres correspondent au département où se trouve la placette. Dans certains cas, deux placettes ou plus de la même essence sont situées dans le même département. La lettre qui suit le code du département permet alors d'individualiser les placettes (par exemple PM 40a, PM 40b, et PM 40c).

Age: Correspond à l'âge à 1,30 m estimé en 1994 par lecture des cernes (Lebourgeois, 1998).

Défoliation, "8 éch.": défoliation moyenne des 8 arbres "échantillon" utilisés pour les analyses foliaires. "36 obs.": défoliation moyenne des 36 arbres "observation" (entre 1994 et 1997).

"dG/dt": Accroissement annuel en surface terrière ($m^2/ha/an$) de l'essence principale entre 1991 (ou 1992) et 1994, compte tenu des éclaircies éventuelles.

"Masse de ref.": la masse de référence en gramme de 100 feuilles ou 1000 aiguilles avec le coefficient de variation interannuel (CV_{IA}).

"Carence": Pour les macro- ou les microéléments, les éléments dont la teneur moyenne sur les 5 années de mesures (1993-1997) est inférieure au seuil de carence proposé pour le réseau.

Teneurs foliaires en éléments: Pour tous les éléments foliaires analysés (6 macronutriments: N, P, S, K, Ca, et Mg, et 7 micronutriments: Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu, et Zn) les teneurs sont indiquées en mg/g ou $\mu g/g$. Les coefficients de variation intraplacette (CV_{IP}) et interannuel (CV_{IA}) sont reportés pour chaque élément.

Rapports entre éléments foliaires: 8 rapports entre macroéléments sont indiqués (N/P, N/Mg, N/K, N/Ca, S/N, Ca/Mg, K/Mg, K/Ca). Les valeurs en dehors des fourchettes proposées par Stefan et Fürst (1998) sont en caractères gras.

2. Quantité de feuilles ou d'aiguilles prélevée par arbre

Tableau A 2: Quantité de feuilles ou d'aiguilles à prélever par arbre selon les essences et le type d'analyse (individuelle ou moyenne).

Table A 2: Number of leaves or needles to be sampled per tree by species and depending on the intensity to the level of analysis (plot analysis or individual analysis every five years).

Essences	Poids (g) de 100 feuilles ou 1000 aiguilles mesuré entre 1993 et 1996		Nombre de feuilles ou d'aiguilles nécessaires par arbre pour l'analyse moyenne (biomasse + analyse chimique)		Nombre de feuilles ou d'aiguilles nécessaires par arbre pour l'analyse individuelle (biomasse + analyse chimique)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Chêne pédonculé	15,40	33,50	19	26	145	197
Chêne sessile	16,00	44,50	18	26	134	194
Hêtre	4,60	18,20	24	56	182	426
Mélèze	0,53	2,50	850	3 824	6 400	28 702
Douglas	3,28	5,99	384	660	2 904	4 973
Epicéa	3,47	6,56	355	626	2 687	4 723
Pin laricio	33,20	55,25	86	110	671	852
Pin maritime	103,50	158,50	63	69	495	545
Pin sylvestre	9,00	24,85	130	272	1 004	2 067
Sapin pectiné	2,80	7,16	329	764	2 495	5 757

3. Directions de prélèvement

Au cours des 5 premières années d'échantillonnage foliaire, une direction de prélèvement a été privilégiée au moins une fois dans 28 placettes. Dans 3 de ces 28 placettes ceci s'est produit deux fois en 5 ans (HET 03, PS 61, MEL 05).

Sur ces 28 placettes, 13 sont situées en altitude. La direction de prélèvement coïncide, ou est proche, de l'exposition de la placette dans 7 de ces 13 placettes.

En 1997 dans la placette HET 55 la direction de prélèvement de l'arbre 109 n'a pas été précisée. La même année, l'arbre 108 de la placette PS 88 a été échantillonné dans 3 directions différentes et l'arbre 106 de la placette SP 09 dans deux directions (N et S).

Tableau A 3: Placettes où plus de la moitié des arbres a été échantillonnée dans la même direction. Exposition pour les placettes d'altitude seulement (> 500 m) et/ou avec une pente > 20 %.

Table A 3: Plots where more than half of the trees were sampled in the same direction. The exposure is only given for the plots situated above >500 m altitude or for plots located on slopes of > 20 %.

Placette	Année	Direction d'éch. privilégiée	Exposition de la placette
CHP 40	1994	Ouest	
CHP 65	1997	Ouest	
CHP 70	1995	Sud	
CHP 71	1995	Sud	
CHS 01	1995	Sud	
CHS 21	1993	Est	
CHS 60	1994	Est	
CHS 81	1997	Est	
CHS 88	1997	Sud	
DOU 61	1994	Sud	
EPC 73	1995	Sud	Nord-Ouest
EPC 74	1996	Ouest	Ouest
EPC 87	1996	Nord	Ouest
HET 03	1993	Sud	Nord
HET 03	1996	Nord	Nord
HET 09	1995	Est	Sud-Ouest
HET 26	1997	Est	Ouest
HET 60	1997	Nord	
HET 64	1993	Nord	Nord-Ouest
MEL 05	1996	Ouest	Nord-Est
MEL 05	1997	Sud	Nord-Est
PL 20	1995	Nord	Nord-Ouest
PM 20	1994	Nord	Nord-Ouest
PM 40c	1993	Ouest	
PS 61	1994	Ouest	
PS 61	1996	Est	
PS 63	1995	Nord	Nord-Ouest
PS 76	1996	Nord	
PS 88	1996	Sud	
SP 09	1997	Nord	Nord-Ouest
SP 26	1997	Est	Ouest

Tableau A 4: Arbres échantillonnés plus de trois fois en cinq ans dans la même direction (54 arbres et 27 placettes).

Table A 4: *Trees which were sampled more than three times in five years in the same cardinal direction (54 trees and 27 plots).*

Placette	N° arbre	Fréquence	Direction
CHP 40	110	4	N
CHP 40	112	5	O
CHP 40	113	4	E
CHP 59	101	5	S
CHP 59	105	4	N
CHP 59	107	4	S
CHP 59	109	4	O
CHP 71	111	4	S
CHS 27	105	4	N
CHS 27	109	4	N
CHS 57a	106	4	S
CHS 60	102	4	S
CHS 61	108	5	N
CHS 61	113	5	N
CHS 61	114	4	S
CHS 61	116	5	E
CHS 88	107	4	O
CPS 77	103	4	N
DOU 23	103	5	E
DOU 23	113	4	N
DOU 61	112	4	S
EPC 73	113	4	S
EPC 73	116	4	S
EPC 74	104	4	N
EPC 81	113	4	E
EPC 81	115	5	E
HET 02	101	4	N
HET 02	104	4	O
HET 02	108	4	E
HET 02	113	4	S
HET 02	114	5	S
HET 03	108	4	O
HET 09	107	4	E
HET 14	103	4	E
HET 14	105	5	S
HET 14	113	4	N
HET 60	101	4	N
HET 60	103	4	N
HET 60	107	4	E
HET 60	113	5	O
HET 65	102	5	S
HET 76	107	4	O
HET 76	115	4	E
HET 81	104	5	S
HET 81	106	4	O
HET 81	107	5	N
PS 61	108	4	E
SP 05	104	4	S
SP 05	108	5	N
SP 26	106	4	E
SP 38	110	4	N
SP 38	113	5	S
SP 38	115	4	S
SP 68	104	4	S

4. Écarts moyens entre deux dates de prélèvements

Tableau A 5: Placettes où les écarts de date entre deux prélèvements foliaires annuels successifs sont supérieurs à 50 jours (soit un mois et demi).

Table A 5: Plots with a difference in date of more than 50 days between two successive annual foliar samplings.

Placette	Période	Ecart en nb de jours
DOU 34	1995/1994	57
DOU 34	1996/1995	-52
DOU 34	1997/1996	61
DOU 65	1994/1993	-75
DOU 65	1995/1994	90
DOU 65	1996/1995	-80
DOU 65	1997/1996	50
EPC 74	1994/1993	-65
EPC 81	1994/1993	-80
EPC 81	1995/1994	102
EPC 81	1996/1995	-66
PL 41	1997/1996	-89
PM 40a	1994/1993	-83
PM 40b	1994/1993	-91
PM 40c	1994/1993	-91
PS 04	1996/1995	-62
PS 04	1997/1996	59
PS 35	1997/1996	-50
PS 44	1997/1996	-52
PS 45	1996/1995	50
SP 09	1994/1993	-60
SP 09	1997/1996	56
SP 11	1994/1993	-80
SP 11	1995/1994	62
SP 11	1996/1995	-51
SP 11	1997/1996	71
SP 57	1994/1993	-52
SP 68	1995/1994	-56
SP 68	1996/1995	62

5. Valeurs moyennes des masses foliaires^{100f (1000a)} et des teneurs en nutriments

Tableau A 6: Valeurs moyennes (Moy) et extrêmes (Min, Max) des masses foliaires^{100f (1000a)} et des teneurs foliaires en macro et micronutriments des 102 peuplements RENECOFOR calculées par espèce et pour l'ensemble des 5 années de suivi (1993 à 1997). "Std" = écart type, "CV" = coefficient de variation, "Nb" = nombre de placettes x nombre d'années.

Table A 6: Average (Moy) and extreme values (Min, Max) of the dry weight per 100 leaves or 1000 needles and the macro and micronutrient foliar concentrations for the 102 RENECOFOR plots, given per species and for the five years of monitoring (1993 to 1997). "Std" = standard deviation, "CV" = coefficient of variation, "Nb" = number of plots x number of years.

	Teneurs foliaires en nutriments et masse foliaire ^{100f (1000a)}						Teneurs foliaires en nutriments et masse foliaire ^{100f (1000a)}					
	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb
	Masse foliaire^{100f (1000a)} (g)						Azote (mg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	21,49	4,27	19,87	15,40	33,50	45	26,26	2,22	8,44	22,16	30,70	45
Chêne sessile	28,72	5,24	18,26	16,00	44,50	95	24,81	2,57	10,35	19,44	31,41	95
Ch. pédonculé/sessile	27,63	6,85	24,80	15,80	38,60	10	26,49	2,31	8,73	23,91	30,50	10
Hêtre	12,61	2,52	19,96	4,60	18,20	100	26,39	2,38	9,03	21,40	36,50	100
Douglas	4,18	0,63	15,10	3,28	5,99	30	17,58	1,80	10,25	15,55	22,40	30
Epicéa	4,71	0,74	15,75	3,47	6,56	55	14,68	1,74	11,86	12,00	19,05	55
Mélèze	0,98	0,84	85,43	0,11	2,50	5	20,97	1,71	8,16	17,80	22,38	5
Pin Laricio	42,24	5,89	13,93	33,20	55,25	10	12,14	1,09	9,02	10,80	14,30	10
Pin maritime	134,62	19,62	14,57	103,50	189,41	35	9,35	2,00	21,38	6,12	13,50	35
Pin sylvestre	15,00	3,73	24,86	8,44	24,85	70	16,41	2,51	15,33	11,03	23,13	70
Sapin pectiné	5,18	1,04	20,01	2,80	7,50	53	13,44	1,07	7,96	11,35	15,40	54
	Phosphore (mg.g⁻¹)						Soufre (mg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	1,40	0,23	16,65	0,89	1,82	45	1,60	0,11	6,66	1,42	1,83	45
Chêne sessile	1,33	0,24	17,78	0,95	2,10	95	1,43	0,16	10,87	1,10	1,99	95
Ch. pédonculé/sessile	1,29	0,17	13,03	1,06	1,56	10	1,47	0,16	10,69	1,28	1,81	10
Hêtre	1,24	0,27	21,47	0,80	2,64	100	1,55	0,15	9,55	1,26	2,03	100
Douglas	1,27	0,11	9,00	1,07	1,56	30	1,23	0,09	7,63	1,08	1,47	30
Epicéa	1,47	0,25	17,04	0,96	2,00	55	0,86	0,12	14,23	0,57	1,06	55
Mélèze	2,48	0,20	8,03	2,13	2,67	5	1,38	0,11	8,14	1,19	1,52	5
Pin Laricio	1,19	0,09	7,39	1,02	1,34	10	0,77	0,13	17,37	0,46	0,92	10
Pin maritime	0,80	0,12	15,68	0,55	1,06	35	0,86	0,15	17,05	0,50	1,14	35
Pin sylvestre	1,33	0,19	14,22	0,92	1,74	70	1,02	0,17	16,85	0,55	1,47	70
Sapin pectiné	1,29	0,22	16,78	0,89	1,80	54	0,96	0,12	12,72	0,68	1,22	54
	Potassium (mg.g⁻¹)						Calcium (mg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	9,57	1,74	18,22	5,62	12,96	45	7,67	1,47	19,17	4,63	11,19	45
Chêne sessile	8,73	1,54	17,60	5,54	12,26	95	6,87	1,37	20,00	3,84	10,10	95
Ch. pédonculé/sessile	9,81	1,35	13,76	7,06	12,59	10	6,43	0,86	13,41	4,68	7,31	10
Hêtre	7,82	1,59	20,34	4,44	13,25	100	9,02	4,17	46,22	2,86	17,34	100
Douglas	7,47	0,98	13,17	5,29	9,25	30	3,71	1,28	34,44	1,90	6,92	30
Epicéa	6,19	1,14	18,45	3,78	8,63	55	4,11	2,16	52,57	1,34	11,10	55
Mélèze	6,16	0,53	8,62	5,57	6,80	5	4,57	0,68	14,78	3,97	5,54	5
Pin Laricio	5,89	0,63	10,69	4,84	6,96	10	2,83	0,39	13,67	2,19	3,53	10
Pin maritime	4,66	0,92	19,69	3,03	7,18	35	2,33	0,38	16,24	1,66	3,26	35
Pin sylvestre	6,08	0,82	13,43	4,23	8,02	70	2,56	0,60	23,54	1,15	4,26	70
Sapin pectiné	5,82	0,88	15,15	4,29	8,30	54	6,73	2,32	34,54	3,40	16,10	54

Tableau A6 (suite) :

	Teneurs foliaires en nutriments											
	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb
	Magnésium (mg.g⁻¹)						Sodium (µg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	1,71	0,27	15,65	1,00	2,49	45	65,2	56,6	86,8	0,0	288,3	45
Chêne sessile	1,66	0,27	16,17	1,15	2,33	95	56,4	37,0	65,6	0,0	147,0	95
Ch. pédonculé/sessile	1,27	0,16	12,33	1,08	1,58	10	45,2	28,5	63,2	8,3	93,3	10
Hêtre	1,18	0,34	28,87	0,47	2,04	100	109,0	119,6	109,7	0,0	548,6	100
Douglas	1,35	0,22	16,09	0,99	2,08	30	25,2	24,5	97,5	0,0	120,0	30
Epicéa	1,00	0,19	18,80	0,66	1,36	55	22,9	20,9	91,5	0,0	94,4	55
Mélèze	2,04	0,30	14,51	1,76	2,46	5	31,8	39,1	122,8	0,0	106,4	5
Pin Laricio	1,12	0,26	22,97	0,76	1,49	10	40,8	34,4	84,5	0,0	127,6	10
Pin maritime	1,42	0,23	16,32	0,96	2,32	35	339,4	173,7	51,2	81,6	647,8	35
Pin sylvestre	0,88	0,18	20,59	0,50	1,27	70	58,3	65,1	111,6	0,0	325,8	70
Sapin pectiné	1,30	0,28	21,58	0,49	1,96	54	28,8	36,8	127,8	0,0	171,3	54
	Chlore (µg.g⁻¹)						Aluminium (µg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	363,3	171,2	47,1	60,9	986,0	45	84,1	51,3	61,0	25,8	267,9	45
Chêne sessile	395,2	154,8	39,2	101,6	754,0	95	79,6	29,0	36,4	28,6	171,2	95
Ch. pédonculé/sessile	379,3	139,4	36,8	212,8	663,3	10	68,9	25,5	37,1	33,3	115,7	10
Hêtre	329,4	341,4	103,6	0,0	2221,6	100	98,7	54,3	55,0	19,4	290,9	100
Douglas	292,2	165,3	56,6	60,2	713,1	30	282,4	47,0	16,6	201,3	401,0	30
Epicéa	532,1	141,9	26,7	173,0	858,8	55	83,9	54,1	64,5	3,8	300,0	55
Mélèze	870,9	76,1	8,7	732,5	944,6	5	143,4	41,1	28,7	94,0	219,1	5
Pin Laricio	219,9	44,6	20,3	136,2	277,1	10	416,3	78,5	18,9	283,0	539,6	10
Pin maritime	540,9	139,7	25,8	320,0	986,2	35	114,3	72,3	63,2	7,9	283,0	35
Pin sylvestre	414,3	201,8	48,7	141,5	1570,0	70	250,1	96,3	38,5	115,0	730,0	70
Sapin pectiné	472,6	154,2	32,6	81,0	841,0	54	167,0	63,9	38,3	51,6	304,0	54
	Fer (µg.g⁻¹)						Manganèse (µg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	129,1	56,3	43,6	65,1	371,2	45	1280,3	545,5	42,6	414,3	2723,6	45
Chêne sessile	102,2	28,7	28,1	55,8	245,0	95	2360,6	803,4	34,0	772,0	4380,1	95
Ch. pédonculé/sessile	79,0	19,3	24,4	46,9	107,1	10	2864,1	1456,3	50,8	1351,1	5781,5	10
Hêtre	97,4	33,9	34,8	48,0	219,5	100	1257,8	981,2	78,0	108,0	4060,7	100
Douglas	54,2	11,5	21,3	32,9	76,6	30	1078,3	466,0	43,2	469,0	2410,0	30
Epicéa	38,0	16,3	43,0	16,1	120,0	55	608,3	278,5	45,8	209,5	1219,8	55
Mélèze	104,3	22,1	21,2	73,8	142,6	5	360,8	45,9	12,7	300,4	423,3	5
Pin Laricio	47,4	20,6	43,5	27,1	97,4	10	616,9	287,8	46,7	328,1	1120,0	10
Pin maritime	34,3	18,9	55,2	16,5	124,0	35	160,9	155,8	96,8	23,5	637,0	35
Pin sylvestre	45,0	10,9	24,2	22,5	73,4	70	633,8	346,4	54,7	138,0	1470,0	70
Sapin pectiné	34,3	9,7	28,4	18,3	67,8	54	891,4	1059,2	118,8	139,1	4557,4	54
	Cuivre (µg.g⁻¹)						Zinc (µg.g⁻¹)					
Chêne pédonculé	9,11	7,58	83,14	4,02	56,65	45	17,84	3,23	18,09	10,96	26,30	45
Chêne sessile	8,07	3,65	45,21	4,29	35,00	95	17,41	4,05	23,24	10,39	25,58	95
Ch. pédonculé/sessile	11,18	6,26	55,95	6,14	25,61	10	19,30	4,76	24,65	11,52	26,47	10
Hêtre	8,36	3,89	46,59	4,33	28,80	100	24,36	6,72	27,57	11,33	44,87	100
Douglas	3,94	0,95	24,01	3,18	7,50	30	20,87	4,69	22,46	11,50	30,84	30
Epicéa	2,86	1,76	61,57	1,51	12,30	55	26,78	7,95	29,68	12,50	54,80	55
Mélèze	4,36	0,72	16,53	3,55	5,58	5	16,87	2,85	16,90	14,30	22,26	5
Pin Laricio	5,05	6,55	129,67	1,83	24,64	10	26,72	4,58	17,14	20,20	33,76	10
Pin maritime	2,44	0,85	34,64	0,93	4,55	35	28,06	5,64	20,08	15,60	38,81	35
Pin sylvestre	3,34	0,57	17,15	2,32	5,33	70	38,97	8,01	20,55	25,40	67,66	70
Sapin pectiné	3,27	0,79	24,32	2,11	5,77	54	27,39	3,42	12,50	19,90	36,90	54

Tableau A 7: Teneurs foliaires en macronutriments et masse foliaire^{100f (1000a)} pour les placettes du réseau RENECOFOR (le nombre de placettes par essence est indiqué dans la dernière colonne).

Table A 7: Foliar macronutrient concentrations and dry weight (per 100 leaves or 1000 needles) per species and per year for the RENECOFOR plots (the number of plots per species is given in the last column).

		Masse de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (g)				Azote (mg.g ⁻¹)				Phosphore (mg.g ⁻¹)				Soufre (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Chêne pédonculé	1993	19,6	2,2	16,3	23,1	26,0	1,6	23,4	29,6	1,51	0,25	1,09	1,82	1,59	0,12	1,46	1,83	9
	1994	23,6	5,5	15,4	33,5	24,6	1,8	22,2	28,6	1,38	0,19	1,06	1,67	1,59	0,12	1,42	1,75	9
	1995	19,6	4,9	15,4	32,4	27,9	1,5	25,3	30,5	1,34	0,23	0,89	1,63	1,58	0,08	1,45	1,76	9
	1996	22,4	3,5	17,4	28,2	25,1	1,5	22,7	26,6	1,38	0,19	0,99	1,59	1,60	0,07	1,49	1,74	9
	1997	22,2	2,4	17,6	24,9	27,7	2,4	24,8	30,7	1,40	0,26	0,98	1,74	1,65	0,12	1,49	1,83	9
Chêne sessile	1993	30,5	4,4	24,2	39,8	24,4	2,1	20,3	30,5	1,43	0,25	1,03	2,10	1,41	0,12	1,10	1,72	19
	1994	30,5	4,3	24,4	38,3	24,6	2,1	20,4	28,4	1,36	0,24	0,98	1,88	1,39	0,13	1,17	1,72	19
	1995	25,6	3,8	16,0	32,5	26,4	2,0	22,2	30,4	1,26	0,19	0,99	1,83	1,39	0,10	1,22	1,60	19
	1996	32,2	5,7	22,6	44,5	23,6	2,3	19,6	27,3	1,27	0,21	0,95	1,78	1,43	0,14	1,22	1,77	19
	1997	24,9	3,2	19,5	30,8	25,0	3,2	19,4	31,4	1,33	0,25	0,98	1,99	1,52	0,21	1,25	1,99	19
Ch. pédonculé/sessile	1993	34,4		30,2	38,6	25,8		24,4	27,2	1,39		1,30	1,48	1,33		1,28	1,38	2
	1994	31,1		25,0	37,1	26,4		23,9	28,8	1,29		1,14	1,44	1,40		1,36	1,45	2
	1995	26,4		24,3	28,5	26,8		25,1	28,5	1,17		1,06	1,28	1,41		1,32	1,50	2
	1996	23,9		15,8	32,0	27,4		24,3	30,5	1,23		1,06	1,40	1,58		1,46	1,69	2
	1997	22,4		19,2	25,6	26,1		24,0	28,3	1,37		1,18	1,56	1,61		1,41	1,81	2
Hêtre	1993	13,3	1,7	9,4	16,0	25,3	1,3	23,8	28,6	1,28	0,22	0,88	1,81	1,47	0,12	1,32	1,74	20
	1994	12,6	1,8	8,3	14,9	26,4	1,7	23,5	29,3	1,27	0,17	0,96	1,65	1,47	0,12	1,20	1,68	22
	1995	10,9	2,6	4,6	15,2	27,6	3,0	22,7	36,5	1,30	0,36	0,80	2,64	1,56	0,15	1,26	1,93	22
	1996	14,2	2,2	9,4	18,2	25,6	2,3	21,4	32,4	1,20	0,20	0,84	1,62	1,60	0,15	1,36	2,03	22
	1997	12,4	2,4	5,8	16,3	26,6	2,2	22,2	31,6	1,21	0,27	0,87	2,07	1,63	0,14	1,36	1,89	22

		Potassium (mg.g ⁻¹)				Calcium (mg.g ⁻¹)				Magnésium (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Chêne pédonculé	1993	10,1	1,8	7,5	13,0	8,58	1,43	5,93	11,19	1,88	0,32	1,52	2,49	9
	1994	10,2	1,5	7,9	12,1	7,64	1,41	4,78	10,03	1,78	0,19	1,52	2,22	9
	1995	8,2	1,4	5,6	10,6	7,58	1,43	5,13	9,79	1,68	0,22	1,45	2,24	9
	1996	9,2	1,3	6,9	11,5	7,20	1,38	4,63	9,04	1,65	0,17	1,42	1,95	9
	1997	10,1	1,7	7,3	12,1	7,33	1,29	4,74	8,95	1,55	0,28	1,00	1,90	9
Chêne sessile	1993	9,6	1,5	6,8	12,3	7,32	1,35	5,05	9,29	1,78	0,27	1,19	2,23	19
	1994	9,1	1,2	6,7	11,3	6,97	1,22	4,76	9,19	1,67	0,24	1,34	2,33	19
	1995	7,2	0,8	5,5	8,5	7,49	1,32	5,54	10,10	1,58	0,23	1,15	2,05	19
	1996	8,8	1,3	5,7	11,0	6,22	1,13	4,16	7,90	1,62	0,24	1,16	2,13	19
	1997	9,1	1,6	6,5	12,1	6,33	1,34	3,84	8,15	1,63	0,30	1,23	2,27	19
Ch. pédonculé/sessile	1993	10,3		10,3	10,4	6,89		6,47	7,31	1,33		1,08	1,58	2
	1994	9,9		9,7	10,1	7,19		7,16	7,23	1,32		1,21	1,44	2
	1995	8,3		7,1	9,4	6,83		6,42	7,23	1,17		1,15	1,19	2
	1996	9,9		9,2	10,6	5,73		5,11	6,35	1,37		1,28	1,46	2
	1997	10,7		8,8	12,6	5,49		4,68	6,29	1,16		1,13	1,19	2
Hêtre	1993	8,7	1,9	5,3	13,3	9,26	4,22	4,00	17,34	1,21	0,34	0,62	1,74	20
	1994	7,8	1,6	5,2	10,6	9,22	4,05	4,46	16,53	1,21	0,31	0,68	1,86	22
	1995	7,3	1,3	5,0	10,2	10,04	4,40	4,34	16,60	1,28	0,38	0,59	2,04	22
	1996	7,8	1,3	5,4	11,4	8,02	3,42	3,28	14,60	1,14	0,30	0,47	1,60	22
	1997	7,2	1,4	4,4	9,1	7,92	3,66	2,86	15,29	1,03	0,27	0,55	1,44	22

Tableau A7 (suite) :

		Biomasse de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (g)				Azote (mg.g ⁻¹)				Phosphore (mg.g ⁻¹)				Soufre (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Douglas	1993	4,8	0,8	3,9	6,0	18,4	2,2	16,2	22,4	1,29	0,14	1,10	1,56	1,26	0,08	1,13	1,40	6
	1994	3,9	0,5	3,3	4,8	17,7	2,1	15,7	21,9	1,26	0,14	1,07	1,45	1,26	0,11	1,11	1,47	6
	1995	4,2	0,5	3,4	5,0	17,8	1,7	16,6	21,3	1,30	0,08	1,19	1,40	1,19	0,05	1,12	1,27	6
	1996	4,1	0,4	3,7	4,7	17,2	1,1	15,6	19,1	1,23	0,05	1,15	1,28	1,29	0,09	1,16	1,40	6
	1997	3,9	0,6	3,4	4,9	16,9	1,2	15,6	18,9	1,29	0,11	1,16	1,45	1,16	0,06	1,08	1,22	6
Epicéa	1993	5,0	0,8	3,5	6,6	15,1	2,3	12,1	19,0	1,48	0,25	1,10	1,93	0,92	0,09	0,81	1,06	11
	1994	4,4	0,5	3,5	5,2	14,8	1,7	12,3	18,0	1,52	0,26	1,10	2,00	0,89	0,06	0,79	1,01	11
	1995	4,7	0,7	3,7	5,8	14,9	1,4	12,9	17,3	1,40	0,22	0,96	1,71	0,66	0,05	0,57	0,74	11
	1996	5,1	0,8	3,6	6,1	14,4	1,8	12,0	17,5	1,42	0,26	1,01	1,78	0,88	0,07	0,79	1,02	11
	1997	4,3	0,4	3,7	5,2	14,2	1,3	12,8	16,1	1,51	0,24	1,07	1,93	0,95	0,06	0,83	1,05	11
Sapin pectiné	1993	5,9	0,8	4,3	7,2	13,5	1,0	11,5	15,0	1,33	0,22	0,95	1,72	0,98	0,10	0,83	1,22	11
	1994	4,6	0,7	3,5	5,7	13,9	1,0	12,2	15,4	1,31	0,25	0,89	1,77	1,04	0,05	0,94	1,14	11
	1995	4,7	0,9	2,8	6,4	13,6	0,8	12,1	15,2	1,30	0,20	0,95	1,62	0,77	0,06	0,68	0,85	11
	1996	5,9	1,0	4,1	7,5	13,5	1,2	11,8	15,3	1,29	0,24	0,93	1,80	1,00	0,06	0,88	1,08	11
	1997	4,6	0,7	3,4	6,1	12,6	0,8	11,4	13,8	1,23	0,15	1,05	1,52	1,03	0,08	0,93	1,19	10
Mélèze	1993	1,2				20,6				2,67				1,41				1
	1994	2,5				22,4				2,61				1,34				1
	1995	0,5				21,8				2,13				1,19				1
	1996	0,6				22,3				2,60				1,52				1
	1997	0,1				17,8				2,39				1,45				1

		Potassium (mg.g ⁻¹)				Calcium (mg.g ⁻¹)				Magnésium (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Douglas	1993	7,4	0,9	5,9	8,5	3,60	1,20	2,55	5,89	1,31	0,14	1,14	1,58	6
	1994	7,2	1,3	5,3	9,1	3,70	1,05	2,80	5,48	1,37	0,19	0,99	1,59	6
	1995	7,6	0,9	5,8	9,0	4,22	1,72	2,54	6,92	1,37	0,24	1,06	1,73	6
	1996	7,8	0,6	6,9	8,7	3,16	0,90	1,90	4,51	1,23	0,11	1,02	1,34	6
	1997	7,4	1,0	5,9	9,2	3,89	1,13	2,62	5,97	1,48	0,28	1,22	2,08	6
Epicéa	1993	5,6	0,9	3,8	6,7	4,44	2,06	2,29	7,63	1,04	0,19	0,72	1,28	11
	1994	6,9	1,1	4,9	8,6	3,73	1,72	1,85	6,93	0,99	0,15	0,71	1,22	11
	1995	6,0	1,1	4,2	7,7	4,65	2,79	1,64	11,10	0,94	0,17	0,73	1,21	11
	1996	6,1	1,1	4,3	7,6	3,41	2,02	1,34	8,44	0,91	0,20	0,66	1,36	11
	1997	6,3	1,1	4,3	8,4	4,34	1,81	2,44	7,88	1,12	0,16	0,85	1,35	11
Sapin pectiné	1993	5,7	0,9	4,3	7,7	6,51	1,99	3,66	9,86	1,31	0,26	0,60	1,61	11
	1994	5,4	0,6	4,3	6,1	7,91	2,97	5,14	16,10	1,40	0,29	0,67	1,96	11
	1995	5,9	1,1	4,6	8,3	6,02	1,82	3,49	9,18	1,20	0,27	0,54	1,69	11
	1996	6,1	0,8	4,5	7,4	6,44	2,14	3,40	11,70	1,21	0,24	0,49	1,38	11
	1997	6,0	0,8	4,8	6,9	6,76	2,04	3,62	11,10	1,37	0,28	0,61	1,74	10
Mélèze	1993	6,8				5,54				2,32				1
	1994	6,8				3,99				1,87				1
	1995	5,6				4,13				1,77				1
	1996	5,6				3,97				1,76				1
	1997	6,1				5,25				2,46				1

Tableau A7 (suite) :

		Biomasse de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (g)				Azote (mg.g ⁻¹)				Phosphore (mg.g ⁻¹)				Soufre (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Pin Laricio	1993	39,9		39,8	40,0	12,6		12,3	13,0	1,24		1,23	1,26	0,83		0,82	0,84	2
	1994	39,2		33,2	45,2	13,2		12,0	14,3	1,26		1,17	1,34	0,86		0,80	0,92	2
	1995	49,1		43,0	55,3	12,7		12,0	13,4	1,15		1,02	1,27	0,52		0,46	0,58	2
	1996	37,8		36,4	39,1	10,9		10,8	10,9	1,12		1,09	1,15	0,78		0,78	0,78	2
	1997	45,3		42,7	47,8	11,4		10,9	11,8	1,17		1,17	1,18	0,85		0,82	0,89	2
Pin maritime	1993	127,1	21,0	103,5	158,5	9,6	1,5	7,4	11,5	0,82	0,15	0,63	1,03	0,93	0,08	0,85	1,05	7
	1994	137,9	14,7	110,0	156,0	9,6	2,2	7,1	13,1	0,77	0,12	0,55	0,94	0,87	0,08	0,74	0,99	7
	1995	140,0	15,4	109,3	156,5	10,3	2,4	6,4	13,5	0,84	0,13	0,72	1,06	0,65	0,14	0,50	0,88	7
	1996	130,4	14,9	109,0	152,0	8,4	1,4	6,1	10,3	0,76	0,07	0,61	0,84	0,87	0,07	0,80	1,01	7
	1997	137,8	26,2	105,3	189,4	8,8	1,7	6,2	11,4	0,79	0,11	0,59	0,96	0,96	0,09	0,87	1,14	7
Pin sylvestre	1993	16,5	3,8	10,6	23,0	17,0	3,0	11,2	23,1	1,38	0,17	1,06	1,74	1,08	0,16	0,86	1,47	14
	1994	15,2	3,6	9,0	24,0	17,3	2,5	11,5	22,3	1,43	0,20	1,14	1,74	1,07	0,16	0,73	1,44	14
	1995	15,3	4,2	10,7	24,9	17,2	2,3	12,9	21,1	1,36	0,20	1,07	1,70	0,86	0,17	0,55	1,21	14
	1996	14,2	3,4	9,4	21,1	14,9	1,4	11,8	18,0	1,17	0,13	0,92	1,34	0,96	0,10	0,75	1,17	14
	1997	13,9	3,0	8,4	18,7	15,6	2,0	11,0	19,6	1,29	0,13	1,12	1,52	1,11	0,13	0,76	1,36	14

		Potassium (mg.g ⁻¹)				Calcium (mg.g ⁻¹)				Magnésium (mg.g ⁻¹)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Pin Laricio	1993	5,8		5,8	5,9	2,91		2,56	3,26	1,29		1,09	1,49	2
	1994	6,5		6,1	7,0	3,28		3,02	3,53	1,18		0,90	1,45	2
	1995	5,7		4,8	6,6	2,60		2,44	2,75	1,06		0,81	1,31	2
	1996	5,7		5,1	6,3	2,55		2,19	2,90	0,98		0,76	1,20	2
	1997	5,7		5,3	6,1	2,82		2,56	3,09	1,10		0,88	1,33	2
Pin maritime	1993	4,4	0,9	3,0	5,6	2,29	0,24	1,99	2,67	1,54	0,35	1,16	2,32	7
	1994	4,8	1,0	3,5	6,3	2,46	0,44	2,00	3,26	1,32	0,20	0,96	1,58	7
	1995	4,6	1,2	3,3	7,2	2,39	0,25	1,97	2,81	1,42	0,12	1,22	1,60	7
	1996	5,0	0,6	4,2	6,0	2,04	0,29	1,66	2,48	1,32	0,15	1,05	1,56	7
	1997	4,5	0,7	3,8	5,6	2,46	0,43	1,85	2,99	1,51	0,17	1,15	1,69	7
Pin sylvestre	1993	6,3	0,9	4,7	8,0	2,58	0,46	1,75	3,55	0,94	0,20	0,57	1,26	14
	1994	6,4	0,6	5,2	7,6	2,85	0,59	1,79	4,26	0,94	0,18	0,65	1,27	14
	1995	6,3	0,8	4,8	7,7	2,62	0,51	1,76	3,42	0,87	0,15	0,56	1,12	14
	1996	5,5	0,6	4,2	6,9	1,95	0,45	1,15	2,78	0,75	0,15	0,50	1,07	14
	1997	5,9	0,7	5,0	7,5	2,79	0,51	1,75	3,66	0,91	0,16	0,61	1,22	14

Tableau A 8: Teneurs foliaires en micronutriments des placettes du réseau RENECONFOR (le nombre de placettes par essence est indiqué dans la dernière colonne).

Table A 8: Foliar micronutrient concentrations per species and per year for the RENECONFOR plots (the number of plots per species is given in the last column).

		Sodium ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Chlore ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Aluminium ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Fer ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Chêne pédonculé	1993	53,9	50,8	11,6	179,8	243,3	119,8	60,9	448,4	126,3	60,3	81,2	267,9	163,6	75,8	109,9	371,2	9
	1994	69,0	83,3	12,3	288,3	395,7	174,7	205,5	763,4	110,0	60,2	48,7	251,2	154,2	52,0	104,0	285,3	9
	1995	83,9	28,3	52,7	149,0	514,3	190,6	288,0	986,0	70,9	29,9	38,4	137,0	129,6	42,4	85,8	210,0	9
	1996	22,6	24,9	0,0	60,6	313,4	135,1	126,0	635,0	56,7	18,4	35,4	95,8	93,8	28,4	70,3	169,0	9
	1997	96,6	42,2	41,0	172,6	349,5	77,9	234,8	488,0	56,7	23,3	25,8	99,7	104,2	32,8	65,1	179,6	9
Chêne sessile	1993	45,0	28,7	8,3	109,8	274,2	119,7	101,6	510,2	103,6	25,2	52,3	171,2	113,1	16,0	85,5	145,8	19
	1994	50,6	40,4	9,2	146,9	409,3	142,0	234,4	735,8	97,5	27,8	59,0	153,7	119,3	34,2	83,9	245,0	19
	1995	68,9	19,6	34,1	111,0	510,7	147,5	283,0	754,0	71,9	18,5	42,2	122,0	105,8	22,7	72,6	162,0	19
	1996	32,7	35,6	0,0	104,0	335,2	134,8	145,0	606,0	56,4	20,9	30,0	112,0	82,1	14,0	58,9	118,0	19
	1997	84,5	32,4	36,3	147,0	446,6	104,9	222,9	646,3	68,5	19,7	28,6	115,6	91,0	32,1	55,8	210,2	19
Ch.pédonculé / sessile	1993	15,5		8,3	22,7	482,2		301,0	663,3	87,2		82,6	91,8	94,2		81,3	107,1	2
	1994	23,7		8,9	38,6	293,3		212,8	373,8	96,3		76,9	115,7	97,8		92,5	103,2	2
	1995	90,5		87,6	93,3	508,5		446,0	571,0	75,0		67,9	82,1	81,1		72,0	90,2	2
	1996	34,7		31,4	38,0	283,0		258,0	308,0	49,2		33,3	65,1	64,2		46,9	81,4	2
	1997	61,5		57,4	65,5	329,5		246,2	412,9	36,7		34,1	39,2	57,6		53,5	61,6	2
Hêtre	1993	107,3	127,7	18,5	521,9	279,8	257,7	0,0	1006	130,6	49,7	64,9	262,8	119,6	27,9	89,9	185,4	20
	1994	88,0	87,0	18,1	331,0	211,6	163,5	4,0	579,7	121,5	60,7	57,9	290,9	120,5	33,9	77,5	219,5	22
	1995	132,0	93,4	34,4	397,0	397,4	342,1	99,8	1170	99,1	46,8	43,2	196,0	104,2	25,6	62,2	148,0	22
	1996	78,8	128,4	0,0	534,0	233,1	272,9	26,2	994,0	57,3	16,2	19,4	85,6	72,2	11,3	49,1	96,6	22
	1997	125,5	128,3	20,5	548,6	481,7	452,4	159,6	2222	77,6	42,6	28,7	172,1	73,5	24,4	48,0	133,9	22

		Manganèse ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Cuivre ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Zinc ($\mu\text{g.g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Chêne pédonculé	1993	1559,6	710,1	414,3	2723,6	8,2	1,2	6,4	10,4	21,1	2,2	18,5	25,2	9
	1994	1331,1	507,9	505,2	2348,7	15,2	14,9	6,7	56,6	18,1	1,6	15,9	21,0	9
	1995	1192,9	368,7	520,0	1850,0	8,1	3,1	5,5	16,5	17,5	3,3	14,8	26,3	9
	1996	1182,7	484,9	480,0	2170,0	6,6	1,0	5,2	8,8	15,3	2,0	12,1	18,0	9
	1997	1135,3	485,7	517,8	2272,0	7,5	2,2	4,0	12,4	17,1	3,4	11,0	22,3	9
Chêne sessile	1993	2649,1	880,4	945,0	4380,1	8,1	0,8	6,5	10,3	21,6	2,3	17,9	25,6	19
	1994	2696,9	848,0	1114,5	4377,8	9,0	2,8	6,0	16,6	20,4	2,9	15,3	25,0	19
	1995	2284,2	602,1	1100,0	3690,0	8,9	6,2	5,9	35,0	16,7	2,5	13,8	22,3	19
	1996	2141,6	643,5	821,0	3130,0	6,3	0,7	5,4	7,8	13,8	1,0	12,4	16,4	19
	1997	2031,3	773,4	772,0	4265,3	8,0	3,8	4,3	22,6	14,5	3,6	10,4	21,6	19
Ch.pédonculé / sessile	1993	3698,9		2209,7	5188,1	9,2		8,8	9,7	25,9		25,2	26,5	2
	1994	3826,8		1872,1	5781,5	16,4		7,2	25,6	23,1		21,5	24,7	2
	1995	2270,0		1630,0	2910,0	8,6		6,4	10,8	16,4		15,2	17,6	2
	1996	2305,0		1470,0	3140,0	7,1		6,1	8,1	18,1		18,0	18,1	2
	1997	2219,9		1351,1	3088,7	14,6		8,3	20,8	13,1		11,5	14,6	2
Hêtre	1993	1368,9	1046,2	173,1	4060,7	8,0	1,1	6,2	10,2	30,1	5,3	20,8	44,9	20
	1994	1479,8	1060,6	150,0	3466,4	8,4	2,1	6,3	14,1	27,7	6,7	18,0	43,7	22
	1995	1398,3	1029,2	150,0	3850,0	11,2	6,9	6,5	28,8	24,5	6,4	13,1	37,0	22
	1996	1216,0	895,8	108,0	3400,0	6,8	0,8	5,6	8,4	22,9	5,8	15,1	41,1	22
	1997	1109,8	726,0	117,2	2380,9	7,0	1,8	4,3	10,8	20,5	6,4	11,3	35,6	22

Tableau A8 (suite) :

		Sodium ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Chlore ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Aluminium ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Fer ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Douglas	1993	37,1	19,0	12,8	63,6	160,0	154,7	60,2	499,6	299,8	56,7	201,3	386,6	60,5	6,4	49,9	71,3	6
	1994	22,6	8,2	12,2	35,4	368,7	95,2	290,0	549,0	304,0	51,2	247,0	401,0	56,9	12,5	41,3	76,6	6
	1995	11,5	11,5	0,0	30,2	141,5	35,9	82,2	188,0	270,5	30,7	218,0	321,0	56,9	9,6	48,1	75,6	6
	1996	35,8	43,7	0,0	120,0	310,5	78,9	242,0	480,0	254,3	25,9	209,0	291,0	42,7	9,6	32,9	61,2	6
	1997	18,8	6,8	5,3	26,9	480,3	119,9	351,7	713,1	283,5	43,3	234,1	360,7	54,1	9,8	43,6	69,8	6
Epicéa	1993	20,4	10,0	9,8	44,5	567,9	142,1	335,8	723,1	103,1	44,0	33,5	171,4	45,9	11,3	30,0	69,2	11
	1994	15,7	5,7	5,9	26,5	597,3	64,1	483,0	705,0	87,2	42,1	25,8	150,0	34,6	11,6	16,1	54,5	11
	1995	6,9	9,5	0,0	27,1	373,6	131,4	173,0	625,0	89,1	78,7	10,8	300,0	42,4	26,7	25,6	120,0	11
	1996	30,0	29,6	0,0	94,4	537,3	70,5	415,0	642,0	65,8	34,5	16,5	129,0	28,3	9,3	20,4	50,6	11
	1997	41,4	19,7	15,3	79,9	584,3	144,0	384,8	858,8	74,2	52,3	3,8	166,8	38,6	8,8	26,2	52,6	11
Sapin pectiné	1993	16,9	7,6	10,3	33,8	320,6	137,5	81,0	545,0	178,0	55,8	90,5	267,5	41,7	8,8	29,0	56,1	11
	1994	14,0	5,0	8,8	27,2	536,6	105,3	421,0	749,0	195,4	73,7	91,6	304,0	34,9	6,6	21,6	47,8	11
	1995	16,3	34,2	0,0	114,0	466,5	138,2	284,0	841,0	137,7	54,1	65,9	222,0	33,9	5,0	25,4	41,0	11
	1996	26,8	26,1	0,0	73,3	422,7	83,2	270,0	604,0	139,0	50,7	51,6	224,0	23,7	3,4	18,3	28,7	11
	1997	74,1	50,8	8,1	171,3	630,8	95,3	419,0	745,1	186,8	58,5	103,3	295,5	37,5	12,0	27,0	67,8	10
Mélèze	1993	12,2				901,6				219,1				142,6				1
	1994	6,0				732,5				129,6				104,6				1
	1995	34,5				850,0				94,0				73,8				1
	1996	0,0				926,0				139,0				97,9				1
	1997	106,4				944,6				135,0				102,5				1

		Manganèse ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Cuivre ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Zinc ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Douglas	1993	1103,7	396,2	649,2	1725,4	3,4	0,2	3,2	3,9	22,9	3,0	18,5	27,2	6
	1994	1124,3	490,2	554,0	1870,0	4,8	1,5	3,4	7,5	21,1	5,0	13,6	29,6	6
	1995	1163,5	644,0	511,0	2410,0	3,6	0,3	3,3	4,2	17,5	3,6	11,5	20,9	6
	1996	879,7	355,4	469,0	1500,0	3,4	0,2	3,2	3,8	20,2	3,9	14,7	26,7	6
	1997	1120,5	310,5	662,1	1649,7	4,5	0,7	3,6	5,7	22,8	5,3	16,3	30,8	6
Epicéa	1993	667,8	289,1	209,5	1178,9	2,5	0,3	2,0	3,0	29,5	6,6	20,3	43,7	11
	1994	559,0	216,8	222,0	933,0	2,4	0,2	1,9	3,0	26,1	5,0	19,3	38,7	11
	1995	637,2	266,0	275,0	1110,0	3,1	3,0	1,6	12,3	26,6	11,0	12,5	54,8	11
	1996	476,2	208,7	212,0	809,0	3,3	2,4	1,5	8,9	24,5	7,6	13,1	38,0	11
	1997	701,2	331,9	222,5	1219,8	3,1	0,4	2,5	4,1	27,2	7,3	17,4	40,5	11
Sapin pectiné	1993	924,9	1227,3	139,1	4557,4	3,2	0,3	2,8	3,7	27,2	3,4	22,4	33,5	11
	1994	1051,6	1238,3	205,0	4510,0	2,9	0,4	2,1	3,5	28,2	1,9	24,6	31,1	11
	1995	735,8	742,3	180,0	2760,0	3,0	0,4	2,3	3,8	28,4	4,6	19,9	36,9	11
	1996	737,6	727,8	182,0	2600,0	2,7	0,3	2,1	3,2	25,8	3,2	21,9	32,2	11
	1997	1018,6	1195,0	202,4	4261,3	4,6	0,7	3,6	5,8	27,4	2,6	23,2	32,2	10
Mélèze	1993	391,4				5,6				22,3				1
	1994	300,4				3,5				16,4				1
	1995	372,0				4,4				14,3				1
	1996	317,0				3,7				14,7				1
	1997	423,3				4,6				16,7				1

Tableau A8 (suite) :

		Sodium ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Chlore ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Aluminium ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Fer ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Pin Laricio	1993	84,1		40,5	127,6	175,7		136,2	215,1	525,5		511,4	539,6	77,0		56,5	97,4	2
	1994	32,1		20,2	44,0	196,5		187,0	206,0	440,0		437,0	443,0	44,0		41,4	46,6	2
	1995	2,1		0,0	4,2	201,0		162,0	240,0	345,0		302,0	388,0	31,1		29,8	32,4	2
	1996	38,1		18,3	57,8	254,5		252,0	257,0	337,0		283,0	391,0	37,4		33,0	41,7	2
	1997	47,5		47,4	47,6	272,0		266,8	277,1	434,1		392,9	475,3	47,8		27,1	68,6	2
Pin maritime	1993	368,7	178,9	132,8	647,8	482,9	89,4	369,8	620,5	145,7	83,9	27,5	283,0	42,1	13,9	26,8	70,0	7
	1994	350,4	135,2	174,0	489,0	595,9	123,3	362,0	750,0	123,2	80,5	18,2	252,0	40,1	35,5	17,3	124,0	7
	1995	269,0	104,3	119,0	416,0	426,1	68,0	320,0	515,0	102,8	66,3	18,0	232,0	33,2	7,2	25,0	48,4	7
	1996	265,5	159,0	81,6	567,0	565,3	109,0	423,0	759,0	91,1	53,9	7,9	154,0	22,4	2,9	16,5	26,3	7
	1997	443,5	205,4	125,9	626,1	634,4	170,2	470,4	986,2	108,7	59,6	16,3	164,4	33,6	6,5	18,6	39,2	7
Pin sylvestre	1993	76,9	81,8	6,5	325,8	336,2	198,6	141,5	922,0	258,4	80,9	150,0	429,2	55,1	7,4	38,3	67,9	14
	1994	68,4	80,5	10,7	298,0	520,9	315,6	258,0	1570	272,3	84,5	168,0	481,0	43,9	7,3	36,0	57,2	14
	1995	25,5	41,3	0,0	149,0	366,1	128,4	152,0	590,0	262,9	144,4	139,0	730,0	44,9	11,1	32,8	73,4	14
	1996	54,3	57,3	0,0	164,0	348,0	110,2	249,0	604,0	189,6	46,6	115,0	298,0	38,3	11,3	22,5	65,4	14
	1997	66,5	37,7	11,9	132,0	500,4	66,8	407,5	692,7	267,2	70,9	183,0	459,5	42,9	8,7	26,6	59,6	14

		Manganèse ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Cuivre ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Zinc ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				Nb
		Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	Moy	Std	Min	Max	
Pin Laricio	1993	689,9		328,1	1051,7	3,4		3,2	3,5	30,1		26,5	33,8	2
	1994	730,0		340,0	1120,0	2,6		2,5	2,8	30,5		27,7	33,2	2
	1995	518,5		355,0	682,0	2,5		2,4	2,7	20,9		20,2	21,5	2
	1996	517,0		348,0	686,0	2,5		1,8	3,2	23,2		20,8	25,5	2
	1997	628,9		434,3	823,5	14,2		3,8	24,6	29,1		28,9	29,2	2
Pin maritime	1993	185,1	183,8	26,0	573,6	3,0	1,0	1,8	4,5	31,6	6,1	19,9	38,8	7
	1994	166,4	153,5	27,7	497,0	2,2	0,8	1,4	3,6	27,1	6,0	16,4	33,3	7
	1995	191,9	197,9	23,5	637,0	2,6	0,5	1,7	3,2	25,0	3,5	17,7	29,0	7
	1996	122,7	89,2	25,0	277,0	1,8	0,6	0,9	2,7	27,2	5,2	15,6	32,6	7
	1997	138,3	115,5	29,2	354,0	2,6	0,8	1,5	3,7	29,6	4,4	20,6	34,5	7
Pin sylvestre	1993	649,7	350,1	181,2	1351,7	3,4	0,5	2,5	4,4	42,5	7,9	30,6	67,7	14
	1994	721,3	392,7	203,0	1470,0	3,3	0,5	2,3	4,3	44,4	7,4	33,6	59,9	14
	1995	638,6	344,2	189,0	1410,0	3,4	0,3	2,9	4,0	34,8	5,8	25,4	45,7	14
	1996	455,4	207,8	138,0	731,0	2,9	0,3	2,4	3,6	31,8	4,6	26,0	40,2	14
	1997	704,2	341,9	232,4	1239,2	3,7	0,7	2,6	5,3	41,4	5,6	32,1	52,0	14

6. Comparaison des teneurs foliaires du réseau RENECOFOR avec les seuils indicatifs^{Fr} (Seuils adaptés d'après Bonneau, 1995; van den Burg, 1985 et 1990)

Tableau A 9: Répartition des placettes en fonction des seuils indicatifs^{Fr}. Pourcentages moyens calculés sur 5 ans (1993 à 1997). Quant les seuils ne sont pas définis, les valeurs entre tirets sont déduites des autres pourcentages sur la même ligne.

Table A9: Percentage of plots in the RENECOFOR network classified according to the French thresholds for foliar nutrients based on five years of foliar analysis (1993 to 1997). If thresholds are not defined, values between dotted lines are deduced from the other percentages on the same line.

Eléments	Essences	Classes nutritionnelles <u>indicatives</u>				Nb pl.
		≤ seuil de carence	≤ au seuil critique	critique < optimum	≥ seuil optimum	
Azote	Chêne pédonculé	0	0	0	100	9
	Chêne sessile	0	2	12	86	19
	Hêtre	0	0	5	95	20
	Douglas	0	0	-----100-----	-----	6
	Epicéa	0	18	42	40	11
	Mélèze	0	20	0	80	1
	Pin Laricio	0	0	-----100-----	-----	2
	Pin maritime	11	40	37	11	7
	Pin sylvestre	7	20	-----73-----	-----	14
Sapin pectiné	0	39	61	0	10	
Phosphore	Chêne pédonculé	0	13	47	40	9
	Chêne sessile	0	15	67	18	19
	Hêtre	0	-----98-----	-----	2	20
	Douglas	0	87	-----13-----	-----	6
	Epicéa	2	31	18	49	11
	Mélèze	0	0	20	80	1
	Pin Laricio	0	0	60	40	2
	Pin maritime	6	77	17	0	7
	Pin sylvestre	3	79	19	0	14
Sapin pectiné	0	39	43	18	10	
Soufre	Chêne pédonculé	0	0	-----100-----	-----	9
	Chêne sessile	0	18	-----82-----	-----	19
	Hêtre	2	39	-----59-----	-----	20
	Douglas	0	40	-----60-----	-----	6
	Epicéa	24	62	-----14-----	-----	11
	Mélèze	20	60	-----20-----	-----	1
	Pin Laricio	20	30	50	0	2
	Pin maritime	14	14	71	0	7
	Pin sylvestre	1	43	-----66-----	-----	14
Sapin pectiné	15	37	-----48-----	-----	10	
Potassium	Chêne pédonculé	0	2	27	71	9
	Chêne sessile	0	3	42	55	19
	Hêtre	2	29	49	20	20
	Douglas	0	13	-----87-----	-----	6
	Epicéa	2	11	13	75	11
	Mélèze	0	40	60	0	1
	Pin Laricio	0	0	10	90	2
	Pin maritime	0	43	-----57-----	-----	7
	Pin sylvestre	0	0	49	51	14
Sapin pectiné	0	7	53	39	10	

Tableau A9 (suite) :

Eléments	Essences	Classes nutritionnelles <u>indicatives</u>				Nb pl.
		≤ seuil de carence	≤ au seuil critique	critique < optimum	≥ seuil optimum	
Calcium	Chêne pédonculé	0	7	-----93-----		9
	Chêne sessile	0	8	-----92-----		19
	Hêtre	1	24	-----75-----		20
	Douglas	0	3	0	97	6
	Epicéa	0	11	40	49	11
	Mélèze	0	40	60	0	1
	Pin Laricio	0	0	0	100	2
	Pin sylvestre	0	0	-----21-----	79	14
	Sapin pectiné	0	7	11	81	10
Magnésium	Chêne pédonculé	0	2	4	93	9
	Chêne sessile	0	3	16	81	19
	Hêtre	17	-----46-----		17	20
	Epicéa	0	53	47	0	11
	Mélèze	0	0	-----100-----		1
	Pin Laricio	0	40	-----60-----		2
	Pin maritime	0	3	-----97-----		
	Pin sylvestre	0	16	57	27	14
	Sapin pectiné	9	0	55	36	10
Fer	Epicéa	42	-----56-----		2	11
	Pin sylvestre	6	-----94-----			14
	Sapin pectiné	39	-----61-----		0	10
Manganèse	Epicéa	0	-----0-----		100	11
	Pin Laricio	-----0-----			100	2
	Pin maritime	-----0-----	29	63	9	7
	Pin sylvestre	-----0-----	0	0	100	14
	Sapin pectiné	0	-----2-----		98	10
Cuivre	Douglas	-----?-----	0	-----?-----		6
	Epicéa	16	64	-----20-----		11
	Pin sylvestre	3	-----87-----		10	14
Zinc	Douglas	-----?-----	13	-----?-----		6
	Epicéa	0	15	-----85-----		11
	Pin sylvestre	0	-----0-----		100	14

7. Corrélations entre la masse foliaire^{100r (1000a)} et les 13 nutriments analysés

Tableau A 10: Coefficients de corrélation entre la masse foliaire^{100r (1000a)} et les teneurs foliaires en nutriments. R_{th} correspond à la valeur critique du coefficient de corrélation pour un risque de 1^{ère} espèce de 5 % et n-2 degrés de liberté (ddl), n étant le nombre de placettes par espèce. Les corrélations significatives sont marquées d'un *.

*Table A 10: Correlation coefficients for the relationships between the dry weight per 100 leaves or 1000 needles and the foliar concentration of the 13 analysed nutrients. R_{th} is the critical value of the correlation coefficient at a first level risk of 5 % and a n-2 degree of freedom (ddl), with n being the number of plots by species. The significant correlations are indicated by *.*

Chêne pédonculé - pedunculate oak (ddl = 7 ; R_{th} = 0,666; n = 9)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	-0,52	1												
S	-0,18	0,81 *	1											
P	0,07	-0,13	-0,09	1										
Ca	0,19	0,14	-0,13	-0,29	1									
Mg	-0,65	0,01	-0,45	-0,02	0,28	1								
K	0,23	0,15	0,00	0,49	0,65	0,15	1							
Na	-0,43	0,11	-0,03	-0,38	0,02	0,15	-0,40	1						
Zn	-0,29	0,68 *	0,40	0,04	0,34	0,00	0,38	0,11	1					
Mn	0,17	0,15	0,55	0,18	-0,53	-0,48	-0,23	-0,29	-0,44	1				
Fe	-0,16	-0,28	-0,51	-0,35	0,22	0,25	-0,20	0,76 *	0,03	-0,70 *	1			
Cu	-0,28	-0,17	-0,40	-0,09	-0,05	0,18	-0,29	0,81 *	0,23	-0,59	0,84 *	1		
Al	-0,22	-0,41	-0,16	0,02	-0,63	0,06	-0,54	0,29	-0,70 *	0,31	0,21	0,13	1	
Cl	-0,32	-0,03	-0,24	-0,56	0,08	0,27	-0,55	0,82 *	-0,03	-0,28	0,62	0,70 *	0,09	1

Chêne sessile - sessile oak (ddl = 17 ; R_{th} = 0,456; n = 19)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	-0,16	1												
S	0,17	0,76 *	1											
P	0,04	0,31	0,37	1										
Ca	0,11	0,05	-0,05	0,56 *	1									
Mg	0,09	0,02	-0,09	0,25	0,44	1								
K	0,33	-0,13	-0,03	0,24	0,35	0,27	1							
Na	-0,19	0,27	0,01	-0,06	-0,21	-0,18	-0,30	1						
Zn	0,05	0,48 *	0,63 *	0,29	0,04	0,25	0,23	-0,17	1					
Mn	-0,30	0,08	-0,04	-0,29	-0,43	-0,52 *	-0,63 *	0,37	-0,44	1				
Fe	-0,09	0,20	0,38	0,12	0,01	0,01	-0,02	-0,30	0,09	-0,24	1			
Cu	0,34	0,18	0,48 *	0,18	-0,02	-0,25	0,09	-0,06	0,18	-0,19	0,26	1		
Al	-0,12	-0,19	-0,09	0,28	-0,17	0,24	-0,22	-0,21	-0,03	-0,08	0,19	0,11	1	
Cl	0,10	-0,07	-0,06	0,03	-0,20	-0,38	-0,03	0,55 *	-0,30	0,35	-0,49 *	0,09	-0,01	1

Tableau A10 (suite) :

Hêtre - beech (ddl = 20 ; $R_{th} = 0,423$; n = 22)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	-0,51 *	1												
S	-0,50 *	0,89 *	1											
P	-0,27	0,39	0,33	1										
Ca	-0,05	0,02	-0,04	-0,04	1									
Mg	0,16	-0,25	-0,30	0,20	0,64 *	1								
K	-0,18	0,31	0,42	-0,09	-0,10	-0,40	1							
Na	-0,24	-0,18	-0,12	0,07	-0,51 *	-0,02	-0,16	1						
Zn	0,06	0,19	0,16	0,23	0,50 *	0,43 *	0,02	-0,49 *	1					
Mn	0,11	-0,03	0,05	-0,08	-0,75 *	-0,61 *	0,14	0,16	-0,17	1				
Fe	-0,11	0,30	0,26	0,33	-0,43 *	-0,32	0,24	0,31	-0,42	0,18	1			
Cu	-0,15	0,54 *	0,61 *	0,17	0,35	0,10	0,06	-0,41	0,33	-0,29	-0,24	1		
Al	-0,11	0,27	0,23	0,36	-0,39	-0,30	0,20	0,28	-0,40	0,06	0,93 *	-0,27	1	
Cl	-0,12	-0,29	-0,21	-0,01	-0,50 *	0,07	-0,18	0,94 *	-0,50 *	0,23	0,19	-0,43 *	0,15	1

Douglas - douglas-fir (ddl = 4 ; $R_{th} = 0,811$; n = 6)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	0,38	1												
S	0,36	0,77	1											
P	0,41	-0,08	-0,27	1										
Ca	-0,72	-0,57	-0,35	-0,07	1									
Mg	0,79	0,08	0,11	0,34	-0,22	1								
K	0,39	-0,03	-0,18	0,92 *	0,13	0,54	1							
Na	0,25	0,19	0,14	-0,64	-0,62	0,07	-0,71	1						
Zn	-0,06	-0,31	-0,30	-0,10	0,53	0,56	0,24	-0,09	1					
Mn	0,29	0,05	0,53	-0,63	-0,21	0,26	-0,56	0,60	0,07	1				
Fe	-0,03	-0,14	-0,30	-0,40	-0,52	-0,33	-0,67	0,79	-0,37	0,20	1			
Cu	-0,07	-0,27	0,05	0,41	0,10	-0,38	0,17	-0,50	-0,64	-0,12	-0,13	1		
Al	0,25	0,82 *	0,52	0,26	-0,58	-0,24	0,11	-0,06	-0,71	-0,31	-0,04	0,20	1	
Cl	0,65	0,05	-0,02	-0,16	-0,74	0,47	-0,26	0,83 *	-0,02	0,49	0,67	-0,37	-0,12	1

Epicéa commun - spruce (ddl = 9 ; $R_{th} = 0,602$; n = 11)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	0,06	1												
S	0,11	0,84 *	1											
P	0,20	0,41	0,69 *	1										
Ca	-0,21	-0,66 *	-0,61 *	-0,50	1									
Mg	0,29	-0,55	-0,32	0,34	0,21	1								
K	0,17	0,01	0,28	0,02	-0,35	-0,19	1							
Na	0,08	0,47	0,26	0,08	-0,27	-0,44	0,01	1						
Zn	-0,12	-0,50	-0,49	-0,45	0,77 *	0,21	-0,29	-0,09	1					
Mn	-0,13	0,14	0,26	0,33	-0,61 *	0,04	0,40	0,22	-0,14	1				
Fe	0,23	0,40	0,48	0,29	-0,36	-0,47	0,36	0,72 *	-0,33	0,24	1			
Cu	0,12	-0,10	-0,33	-0,62 *	0,24	-0,38	-0,17	-0,17	0,41	-0,21	-0,15	1		
Al	0,69 *	0,47	0,62 *	0,63 *	-0,69 *	0,06	0,47	0,15	-0,58	0,24	0,40	-0,24	1	
Cl	-0,44	-0,05	0,00	0,34	0,00	0,34	-0,41	-0,38	0,12	0,22	-0,55	-0,06	-0,15	1

Tableau A10 (suite) :

Pin maritime - maritime pine (ddl = 5 ; $R_{th} = 0,755$; n = 7)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	-0,42	1												
S	0,27	0,43	1											
P	-0,81 *	0,11	-0,14	1										
Ca	-0,12	0,25	-0,20	-0,05	1									
Mg	-0,26	-0,52	-0,12	0,60	-0,58	1								
K	-0,15	0,32	0,69	0,34	-0,60	0,47	1							
Na	0,30	-0,83 *	-0,63	-0,06	0,21	0,17	-0,70	1						
Zn	0,68	-0,36	-0,06	-0,38	-0,14	-0,22	-0,30	0,49	1					
Mn	0,49	0,39	0,91 *	-0,42	-0,20	-0,39	0,43	-0,50	0,24	1				
Fe	-0,30	0,20	0,50	0,42	-0,32	0,57	0,86 *	-0,58	-0,62	0,11	1			
Cu	-0,21	0,93 *	0,66	0,05	0,15	-0,41	0,54	-0,88 *	-0,30	0,56	0,42	1		
Al	-0,35	0,70	0,49	0,26	0,27	-0,07	0,56	-0,72	-0,57	0,20	0,71	0,83 *	1	
Cl	0,37	-0,69	-0,15	0,17	-0,39	0,60	0,13	0,54	0,58	-0,19	0,07	-0,49	-0,32	1

Pin sylvestre - Scot pine (ddl = 12 ; $R_{th} = 0,532$; n = 14)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	0,51	1												
S	0,54 *	0,72 *	1											
P	0,50	0,06	0,43	1										
Ca	-0,49	-0,43	-0,35	-0,53	1									
Mg	-0,63 *	-0,16	-0,25	-0,45	0,50	1								
K	0,03	0,24	0,51	0,41	-0,33	0,20	1							
Na	0,55 *	0,47	0,80 *	0,42	-0,18	0,02	0,55 *	1						
Zn	-0,09	0,55 *	0,16	-0,56 *	0,21	0,25	-0,10	0,03	1					
Mn	0,33	-0,11	0,18	0,22	-0,14	-0,48	-0,12	0,24	-0,37	1				
Fe	0,62 *	0,39	0,68 *	0,27	-0,22	-0,14	0,21	0,76 *	0,10	0,16	1			
Cu	-0,08	0,61 *	0,31	-0,26	-0,09	0,04	0,24	-0,03	0,35	-0,22	-0,24	1		
Al	-0,62 *	-0,56 *	-0,41	-0,50	0,63 *	0,69 *	0,06	-0,12	-0,09	-0,04	-0,13	-0,20	1	
Cl	0,47	0,32	0,76 *	0,49	-0,19	0,00	0,59 *	0,97 *	-0,09	0,34	0,69 *	-0,14	-0,06	1

Sapin pectiné - Fir (ddl = 9 ; $R_{th} = 0,602$; n = 11)

	Masfol	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Zn	Mn	Fe	Cu	Al	Cl
Masfol	1													
N	0,63 *	1												
S	0,51	0,32	1											
P	0,53	0,73 *	0,52	1										
Ca	0,07	0,12	0,47	-0,12	1									
Mg	-0,28	-0,49	0,15	-0,25	0,30	1								
K	0,06	-0,34	0,44	0,13	0,18	0,08	1							
Na	-0,01	0,19	0,06	-0,14	0,36	0,11	-0,36	1						
Zn	-0,09	0,54	-0,39	0,44	-0,30	-0,46	-0,32	-0,12	1					
Mn	0,17	0,37	-0,32	0,31	-0,58	-0,89 *	-0,08	-0,24	0,55	1				
Fe	0,00	0,18	0,56	0,25	0,06	0,00	0,03	-0,08	-0,12	0,03	1			
Cu	0,55	0,69 *	0,01	0,45	-0,19	-0,77 *	-0,28	-0,12	0,44	0,64 *	0,00	1		
Al	0,05	0,10	-0,22	0,35	-0,62 *	-0,08	-0,05	-0,16	0,35	0,32	-0,19	-0,17	1	
Cl	0,17	-0,11	-0,29	-0,06	0,09	-0,02	0,23	-0,32	-0,02	0,14	-0,59	0,01	0,09	1

8. Rapports entre éléments

Tableau A 11: Valeurs moyennes et extrêmes des rapports entre nutriments des 102 peuplements RENECOFOR calculées par espèce et pour l'ensemble des 5 années de suivi (1993 à 1997). "Nb" = nombre de placettes x nombre d'années.

Table A 11: Average and extreme values of foliar nutrient ratios for the 102 RENECOFOR plots, given per species and for the five years of monitoring (1993 to 1997). "Nb" = number of plots x number of years.

Essences	Rapports entre nutriments											
	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb
	N/P						S/N					
Chêne pédonculé	19,3	4,0	20	14,4	30,4	45	0,061	0,004	7	0,054	0,069	45
Chêne sessile	19,1	3,4	18	12,7	28,2	95	0,058	0,005	9	0,046	0,071	95
Ch. pédonculé/sessile	20,7	1,8	9	18,1	23,7	10	0,055	0,004	8	0,050	0,064	10
Hêtre	22,0	4,0	18	13,8	31,8	100	0,059	0,004	7	0,050	0,070	100
Douglas	13,9	1,7	12	11,2	17,9	30	0,071	0,006	9	0,057	0,086	30
Epicéa	10,2	1,6	16	6,8	13,9	55	0,059	0,009	15	0,040	0,074	55
Mélèze	8,5	1,0	11	7,4	10,2	5	0,067	0,009	14	0,055	0,082	5
Pin Laricio	10,3	1,0	10	9,3	13,1	10	0,064	0,012	19	0,035	0,075	10
Pin maritime	12,0	3,1	26	8,1	19,6	35	0,095	0,025	26	0,048	0,146	35
Pin sylvestre	12,5	2,3	18	9,4	19,5	70	0,063	0,010	16	0,042	0,089	70
Sapin pectiné	10,6	1,4	13	7,8	14,6	54	0,072	0,010	14	0,047	0,096	54
	N/K											
Chêne pédonculé	2,84	0,60	21	1,85	4,80	45						
Chêne sessile	2,94	0,66	22	1,83	4,80	95						
Ch. pédonculé/sessile	2,74	0,35	13	2,24	3,56	10						
Hêtre	3,50	0,71	20	2,02	5,40	100						
Douglas	2,39	0,39	16	1,78	3,27	30						
Epicéa	2,46	0,53	22	1,52	3,67	55						
Mélèze	3,43	0,43	13	2,94	4,00	5						
Pin Laricio	2,09	0,32	15	1,72	2,77	10						
Pin maritime	2,07	0,56	27	1,28	3,55	35						
Pin sylvestre	2,73	0,45	16	2,05	3,83	70						
Sapin pectiné	2,37	0,42	18	1,54	3,24	54						
	N/Ca						K/Ca					
Chêne pédonculé	3,57	0,82	23	2,35	5,32	45	1,3	0,2	19	0,8	1,8	45
Chêne sessile	3,76	0,89	24	2,58	7,16	95	1,3	0,3	25	0,7	2,3	95
Ch. pédonculé/sessile	4,24	0,95	22	3,31	6,04	10	1,6	0,4	28	1,0	2,7	10
Hêtre	3,70	1,87	51	1,40	9,62	100	1,1	0,6	58	0,3	3,5	100
Douglas	5,29	1,78	34	2,40	8,79	30	2,2	0,7	33	1,0	4,4	30
Epicéa	4,77	2,69	56	1,20	13,06	55	2,0	1,2	58	0,4	4,9	55
Mélèze	4,72	0,97	20	3,39	5,62	5	1,4	0,2	14	1,2	1,7	5
Pin Laricio	4,36	0,63	14	3,53	5,49	10	2,1	0,2	10	1,7	2,4	10
Pin maritime	4,08	0,91	22	2,57	5,76	35	2,1	0,6	29	1,1	3,6	35
Pin sylvestre	6,82	2,00	29	3,35	12,87	70	2,5	0,7	29	1,4	5,2	70
Sapin pectiné	2,21	0,68	31	0,91	3,95	54	1,0	0,3	35	0,4	1,7	54

Tableau A11 (suite) :

Essences	Rapports entre nutriments											
	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb	Moy	Std	CV	Min	Max	Nb
	N/Mg						K/Mg					
Chêne pédonculé	15,8	2,8	18	10,1	25,1	45	5,7	1,1	20	3,6	8,3	45
Chêne sessile	15,3	2,8	18	10,1	24,7	95	5,4	1,1	21	3,4	9,2	95
Ch. pédonculé/sessile	21,2	3,5	17	15,5	25,1	10	7,8	1,4	18	5,9	10,5	10
Hêtre	24,7	9,4	38	14,0	58,4	100	7,5	3,7	49	2,7	24,1	100
Douglas	13,3	2,3	17	8,0	18,4	30	5,6	1,0	17	3,4	7,4	30
Epicéa	15,4	4,2	27	9,4	26,5	55	6,5	1,7	27	3,1	9,7	55
Mélèze	10,6	2,2	20	7,2	12,7	5	3,1	0,4	13	2,5	3,6	5
Pin Laricio	11,5	3,1	27	8,2	16,6	10	5,4	0,9	16	3,9	6,7	10
Pin maritime	6,8	1,9	29	3,7	11,1	35	3,3	0,8	24	2,2	5,3	35
Pin sylvestre	19,4	4,9	25	8,9	31,8	70	7,1	1,5	21	4,3	10,9	70
Sapin pectiné	11,3	4,6	41	6,6	31,1	54	4,8	1,9	38	2,2	12,5	54
	Ca/Mg						Fe/Mn					
Chêne pédonculé	4,5	0,9	20	2,6	6,6	45	0,14	0,15	109	0,03	0,90	45
Chêne sessile	4,2	0,8	20	2,4	6,2	95	0,05	0,02	47	0,02	0,15	95
Ch. pédonculé/sessile	5,1	0,8	16	3,9	6,1	10	0,03	0,02	49	0,01	0,06	10
Hêtre	7,6	2,7	35	2,9	14,6	100	0,17	0,17	100	0,02	0,69	100
Douglas	2,8	1,0	36	1,6	5,7	30	0,06	0,03	49	0,03	0,14	30
Epicéa	4,1	2,2	53	1,8	9,9	55	0,07	0,03	47	0,03	0,18	55
Mélèze	2,2	0,1	5	2,1	2,4	5	0,29	0,06	22	0,20	0,36	5
Pin Laricio	2,6	0,6	23	1,7	3,9	10	0,10	0,08	76	0,03	0,30	10
Pin maritime	1,7	0,4	25	1,1	3,4	35	0,47	0,42	90	0,04	1,72	35
Pin sylvestre	2,9	0,6	21	1,7	4,2	70	0,10	0,08	77	0,03	0,37	70
Sapin pectiné	5,4	2,0	37	2,4	12,3	54	0,09	0,07	75	0,01	0,25	54

9. Variabilité interannuelle et interplacette des minéralomasses^{100f (1000a)} en nutriments

Tableau A 12: Variabilité entre placettes et entre années des minéralomasses^{100f (1000a)}: coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) de placettes et d'années pris en compte pour calculer chaque CV moyen.

Table A 12: Inter-plot and inter-annual variation in the dry weight of nutrients per 100 leaves or 1000 needles : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of plots and years which have been taken into account to calculate each average CV.

Essences	C.V. interplacette			C.V. interannuel			C.V. interplacette			C.V. interannuel		
	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb
	Azote						Phosphore					
Chêne pédonculé	18	13 - 23	9	17	13 - 26	5	24	13 - 36	9	17	8 - 29	5
Chêne sessile	16	16 - 17	19	13	3 - 26	5	22	19 - 24	19	16	5 - 28	5
Ch. sessile/pédonculé			2	17	15 - 19	5			2	22	21 - 23	5
Hêtre	16	11 - 23	20	12	4 - 24	5	23	21 - 27	20	13	7 - 24	5
Douglas	18	11 - 24	6	14	8 - 21	5	17	9 - 27	6	14	7 - 21	5
Epicéa	18	13 - 23	11	13	8 - 16	5	24	20 - 26	11	14	9 - 17	5
Mélèze			1	88		5			1	88		5
Pin Laricio			2	16	10 - 21	5			2	13	11 - 14	5
Pin maritime	22	16 - 25	7	13	4 - 24	5	13	8 - 16	7	11	8 - 17	5
Pin sylvestre	32	28 - 38	14	18	9 - 29	5	32	25 - 40	14	18	8 - 28	5
Sapin pectiné	20	18 - 23	11	19	10 - 29	5	26	20 - 27	11	20	12 - 38	5
	Soufre						Potassium					
Chêne pédonculé	18	12 - 25	9	18	12 - 24	5	26	14 - 37	9	22	13 - 32	5
Chêne sessile	17	15 - 20	19	14	5 - 27	5	22	20 - 25	19	21	8 - 33	5
Ch. sessile/pédonculé			2	14	14 - 14	5			2	22	19 - 26	5
Hêtre	17	13 - 25	20	14	5 - 30	5	25	22 - 30	20	17	7 - 36	5
Douglas	16	11 - 21	6	14	10 - 20	5	21	12 - 25	6	15	10 - 19	5
Epicéa	16	10 - 20	11	17	11 - 23	5	23	18 - 29	11	11	6 - 15	5
Mélèze			1	84		5			1	92		5
Pin Laricio			2	16	13 - 20	5			2	11	8 - 13	5
Pin maritime	20	15 - 26	7	17	14 - 23	5	21	11 - 30	7	13	4 - 20	5
Pin sylvestre	33	26 - 40	14	18	5 - 27	5	28	19 - 32	14	17	5 - 25	5
Sapin pectiné	19	15 - 23	11	21	10 - 35	5	22	18 - 29	11	19	10 - 29	5
	Calcium						Magnésium					
Chêne pédonculé	27	18 - 42	9	16	8 - 24	5	21	18 - 27	9	19	9 - 28	5
Chêne sessile	25	24 - 26	19	16	5 - 28	5	21	20 - 22	19	17	7 - 26	5
Ch. sessile/pédonculé			2	27	20 - 33	5			2	22	17 - 27	5
Hêtre	48	46 - 50	20	16	4 - 74	5	35	33 - 39	20	17	4 - 40	5
Douglas	26	21 - 32	6	15	11 - 19	5	23	15 - 29	6	14	8 - 21	5
Epicéa	51	39 - 66	11	18	11 - 25	5	24	13 - 32	11	14	7 - 18	5
Mélèze			1	80		5			1	83		5
Pin Laricio			2	16	10 - 21	5			2	12	9 - 16	5
Pin maritime	20	13 - 30	7	17	9 - 23	5	19	13 - 25	7	14	7 - 22	5
Pin sylvestre	25	17 - 32	14	21	10 - 31	5	21	15 - 27	14	17	7 - 27	5
Sapin pectiné	35	32 - 41	11	21	10 - 65	5	25	21 - 28	11	17	7 - 28	5

Tableau A12 (suite) :

Essences	C.V. interplacette			C.V. interannuel			C.V. interplacette			C.V. interannuel		
	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb
Sodium												
Chêne pédonculé	77	27 - 113	9	62	40 - 93	5	40	20 - 56	9	36	19 - 51	5
Chêne sessile	66	30 - 110	19	53	17 - 88	5	39	28 - 47	19	29	11 - 58	5
Ch. sessile/pédonculé			2	62	36 - 88	5			2	42	25 - 59	5
Hêtre	107	73 - 162	20	52	18 - 140	5	88	68 - 119	20	50	14 - 151	5
Douglas	70	35 - 127	6	79	70 - 100	5	51	33 - 114	6	50	35 - 58	5
Epicéa	76	39 - 145	11	70	42 - 90	5	26	14 - 36	11	26	15 - 35	5
Mélèze			1	53		5			1	76		5
Pin Laricio			2	75	60 - 90	5			2	22	17 - 27	5
Pin maritime	52	42 - 68	7	29	22 - 46	5	25	16 - 39	7	21	10 - 32	5
Pin sylvestre	124	60 - 168	14	81	42 - 115	5	62	28 - 96	14	31	11 - 59	5
Sapin pectiné	90	36 - 203	11	90	55 - 134	5	33	25 - 41	11	25	15 - 42	5
Aluminium												
Chêne pédonculé	43	38 - 46	9	37	25 - 60	5	38	24 - 58	9	29	17 - 40	5
Chêne sessile	32	27 - 44	19	33	15 - 67	5	25	17 - 32	19	23	10 - 38	5
Ch. sessile/pédonculé			2	46	35 - 57	5			2	37	30 - 43	5
Hêtre	47	35 - 58	20	35	20 - 51	5	29	21 - 37	20	26	17 - 49	5
Douglas	23	17 - 28	6	19	14 - 27	5	24	15 - 30	6	21	11 - 31	5
Epicéa	66	48 - 101	11	33	8 - 77	5	41	23 - 78	11	27	12 - 70	5
Mélèze			1	85		5			1	88		5
Pin Laricio			2	18	14 - 22	5			2	35	25 - 45	5
Pin maritime	58	52 - 66	7	27	15 - 50	5	38	18 - 86	7	33	21 - 68	5
Pin sylvestre	30	17 - 59	14	25	14 - 68	5	36	28 - 45	14	26	10 - 47	5
Sapin pectiné	39	33 - 46	11	23	9 - 34	5	26	17 - 46	11	27	5 - 47	5
Manganèse												
Chêne pédonculé	47	38 - 54	9	19	11 - 31	5	40	16 - 77	9	37	12 - 115	5
Chêne sessile	33	25 - 42	19	21	13 - 32	5	43	19 - 85	19	29	10 - 76	5
Ch. sessile/pédonculé			2	40	32 - 47	5			2	52	42 - 62	5
Hêtre	79	74 - 85	20	18	8 - 49	5	32	15 - 73	20	25	9 - 72	5
Douglas	46	35 - 55	6	20	13 - 26	5	19	9 - 31	6	18	4 - 34	5
Epicéa	43	39 - 49	11	18	12 - 24	5	46	16 - 95	11	37	9 - 90	5
Mélèze			1	77		5			1	77		5
Pin Laricio			2	19	17 - 21	5			2	75	21 - 129	5
Pin maritime	100	78 - 114	7	25	8 - 32	5	32	18 - 42	7	23	13 - 28	5
Pin sylvestre	64	57 - 70	14	21	13 - 35	5	26	20 - 31	14	18	8 - 30	5
Sapin pectiné	117	97 - 126	11	19	10 - 27	5	23	19 - 30	11	23	11 - 33	5
Zinc												
Chêne pédonculé	22	13 - 33	9	21	8 - 28	5						
Chêne sessile	22	18 - 31	19	27	4 - 53	5						
Ch. sessile/pédonculé			2	41	40 - 42	5						
Hêtre	30	24 - 41	20	23	6 - 39	5						
Douglas	24	21 - 29	6	20	16 - 27	5						
Epicéa	31	18 - 42	11	18	9 - 27	5						
Mélèze			1	86		5						
Pin Laricio			2	16	11 - 22	5						
Pin maritime	26	20 - 29	7	17	10 - 31	5						
Pin sylvestre	28	21 - 36	14	22	8 - 34	5						
Sapin pectiné	20	13 - 28	11	17	8 - 26	5						

10. Variabilité interannuelle et interplacette des teneurs en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Tableau A 13: Variabilité entre placettes et entre années des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)} : coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) de placettes et d'années prises en compte pour calculer chaque CV moyen.

Table A 13: *Inter-plot and inter-annual variation of foliar nutrient concentrations and dry weight per 100 leaves or 1000 needles per species : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of plots and years which have been taken into account to calculate each average CV.*

Essences	C.V. interplacette			C.V. interannuel			C.V. interplacette			C.V. interannuel		
	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb
Masse foliaire^{100f (1000a)}												
Chêne pédonculé	17,3	10,6 - 25,3	9	15,9	8,1 - 23,8	5	6,7	5,5 - 8,5	9	6,5	4,0 - 9,4	5
Chêne sessile	14,8	12,7 - 17,6	19	14,4	1,7 - 26,3	5	9,5	7,7 - 12,9	19	6,5	2,7 - 12,4	5
Ch. sessile/pédonculé			2	18,5	15,2 - 21,7	5			2	2,8	1,8 - 3,8	5
Hêtre	17,9	13,0 - 25,1	20	13,5	2,9 - 26,1	5	8,0	5,0 - 11,1	20	4,9	2,0 - 10,5	5
Douglas	12,7	9,5 - 15,8	6	10,9	6,8 - 15,4	5	9,4	6,5 - 12,0	6	5,0	2,4 - 8,1	5
Epicéa	13,7	8,5 - 16,6	11	11,2	7,0 - 14,2	5	11,4	9,2 - 14,9	11	5,0	2,8 - 9,9	5
Mélèze			1	85,4		5			1	8,2		5
Pin Laricio			2	11,7	8,9 - 14,5	5			2	8,2	6,9 - 9,5	5
Pin maritime	13,7	10,7 - 19,0	7	8,5	6,3 - 10,9	5	19,6	15,5 - 23,5	7	9,6	6,1 - 14,3	5
Pin sylvestre	23,9	21,3 - 27,6	14	13,0	7,4 - 21,6	5	13,6	9,7 - 17,8	14	7,2	3,4 - 14,4	5
Sapin pectiné	16,1	14,1 - 19,7	11	16,8	11,1 - 26,2	5	7,2	6,2 - 8,8	11	5,6	2,9 - 8,8	5
Azote												
Phosphore												
Chêne pédonculé	16,0	13,8 - 18,5	9	6,1	1,8 - 10,4	5	6,3	4,2 - 7,6	9	5,3	2,4 - 8,4	5
Chêne sessile	17,0	14,9 - 19,0	19	6,9	3,7 - 10,4	5	9,9	7,3 - 14,1	19	7,2	2,6 - 20,0	5
Ch. sessile/pédonculé			2	7,1	6,5 - 7,8	5			2	7,4	4,7 - 10,1	5
Hêtre	20,2	14,4 - 29,3	20	8,4	3,9 - 28,7	5	8,6	6,6 - 10,0	20	7,0	3,1 - 12,6	5
Douglas	8,3	4,3 - 11,3	6	5,5	3,3 - 10,2	5	6,2	4,0 - 8,9	6	6,5	4,5 - 10,7	5
Epicéa	16,7	15,8 - 18,0	11	7,1	4,5 - 10,1	5	7,4	6,3 - 9,3	11	13,0	10,2 - 15,4	5
Mélèze			1	8,0		5			1	8,1		5
Pin Laricio			2	6,9	4,3 - 9,4	5			2	16,7	12,3 - 21,1	5
Pin maritime	14,8	9,7 - 18,2	7	7,0	2,5 - 12,6	5	11,4	8,4 - 21,2	7	15,4	10,1 - 21,3	5
Pin sylvestre	12,2	9,8 - 14,5	14	7,8	2,0 - 11,7	5	14,2	10,3 - 19,1	14	10,6	5,9 - 16,6	5
Sapin pectiné	16,2	12,2 - 19,0	11	5,9	1,6 - 10,3	5	7,4	5,0 - 10,6	11	11,8	6,6 - 15,8	5
Soufre												
Potassium												
Chêne pédonculé	16,3	14,3 - 18,1	9	11,3	6,2 - 17,4	5	18,1	16,7 - 19,1	9	8,9	4,4 - 13,8	5
Chêne sessile	14,5	11,0 - 17,2	19	10,9	6,4 - 21,5	5	18,6	17,5 - 21,2	19	9,7	4,4 - 13,8	5
Ch. sessile/pédonculé			2	11,1	10,0 - 12,2	5			2	11,1	6,7 - 15,5	5
Hêtre	19,1	17,1 - 22,1	20	9,5	3,8 - 16,5	5	45,2	43,9 - 46,9	20	14,4	6,1 - 76,3	5
Douglas	12,7	8,3 - 17,6	6	8,0	4,3 - 13,0	5	31,9	28,3 - 40,7	6	13,6	9,4 - 17,8	5
Epicéa	17,1	15,4 - 18,0	11	9,2	5,9 - 14,2	5	50,6	41,6 - 59,9	11	17,8	12,0 - 26,0	5
Mélèze			1	8,6		5			1	14,8		5
Pin Laricio			2	7,6	6,4 - 8,8	5			2	12,5	6,6 - 18,3	5
Pin maritime	18,6	11,3 - 25,4	7	12,1	6,3 - 17,8	5	14,1	10,3 - 18,0	7	12,3	8,5 - 16,3	5
Pin sylvestre	12,1	9,7 - 13,9	14	7,6	4,4 - 12,8	5	20,0	17,9 - 23,3	14	14,5	9,3 - 20,8	5
Sapin pectiné	14,3	11,6 - 18,0	11	7,8	4,6 - 11,5	5	32,4	30,2 - 37,5	11	17,2	5,4 - 48,6	5
Calcium												

Tableau A13 (suite) :

Essences	C.V. interplacette			C.V. interannuel			C.V. interplacette			C.V. interannuel		
	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb	Moy	Min - Max	Nb
	Magnésium						Sodium					
Chêne pédonculé	13,8	10,2 - 18,3	9	10,3	2,9 - 14,8	5	80,5	33,7 - 120,8	9	60,0	40,3 - 89,5	5
Chêne sessile	15,6	14,4 - 18,7	19	8,7	3,5 - 15,3	5	63,8	28,4 - 108,8	19	55,2	18,8 - 94,4	5
Ch. sessile/pédonculé			2	9,1	5,6 - 12,5	5			2	63,3	45,8 - 80,8	5
Hêtre	27,6	25,7 - 29,9	20	15,0	6,0 - 42,4	5	110,8	69,4 - 158,5	20	53,6	14,7 - 138,9	5
Douglas	14,0	8,9 - 18,8	6	9,6	5,3 - 18,3	5	69,2	36,4 - 122,2	6	77,1	69,3 - 95,3	5
Epicéa	17,4	13,9 - 21,3	11	10,1	4,3 - 21,0	5	73,7	36,0 - 137,3	11	72,9	53,1 - 103,9	5
Mélèze			1	14,5		5			1	122,8		5
Pin Laricio			2	10,2	7,6 - 12,9	5			2	75,4	62,2 - 88,5	5
Pin maritime	13,8	8,5 - 22,7	7	10,4	3,0 - 19,5	5	46,4	38,6 - 59,9	7	26,4	20,2 - 48,2	5
Pin sylvestre	18,9	17,0 - 21,4	14	9,1	4,3 - 13,3	5	109,7	56,7 - 162,1	14	76,8	39,7 - 120,4	5
Sapin pectiné	20,7	19,7 - 22,2	11	9,8	3,6 - 17,4	5	91,2	35,8 - 209,3	11	91,4	56,8 - 137,5	5
	Chlore						Aluminium					
Chêne pédonculé	39,2	22,3 - 49,2	9	34,7	22,8 - 52,1	5	43,7	32,4 - 54,7	9	37,7	27,6 - 68,1	5
Chêne sessile	34,2	23,5 - 43,7	19	31,2	15,2 - 47,4	5	28,9	24,3 - 37,0	19	28,2	7,1 - 44,4	5
Ch. sessile/pédonculé			2	36,1	34,0 - 38,3	5			2	35,7	26,6 - 44,8	5
Hêtre	94,2	78,5 - 124,1	20	52,5	22,2 - 149,1	5	44,2	29,7 - 54,4	20	34,1	17,5 - 51,4	5
Douglas	39,7	25,0 - 96,7	6	50,3	34,4 - 60,5	5	14,5	10,2 - 18,9	6	11,9	5,7 - 17,0	5
Epicéa	21,7	10,7 - 35,2	11	22,0	7,6 - 32,7	5	60,4	42,7 - 88,3	11	32,6	5,9 - 69,1	5
Mélèze			1	8,7		5			1	28,7		5
Pin Laricio			2	18,1	9,6 - 26,7	5			2	17,4	10,8 - 23,9	5
Pin maritime	20,3	15,9 - 26,8	7	19,9	8,1 - 32,8	5	60,3	54,8 - 65,3	7	26,9	12,9 - 55,9	5
Pin sylvestre	39,9	13,4 - 60,6	14	27,3	8,4 - 47,0	5	33,7	24,6 - 54,9	14	18,0	8,2 - 64,1	5
Sapin pectiné	25,4	15,1 - 42,9	11	27,5	13,2 - 45,1	5	35,2	31,3 - 39,3	11	20,2	9,7 - 30,3	5
	Fer						Manganèse					
Chêne pédonculé	34,9	30,3 - 46,4	9	24,8	16,8 - 34,3	5	39,7	30,9 - 45,5	9	14,5	6,6 - 26,5	5
Chêne sessile	23,3	14,1 - 35,3	19	19,2	10,7 - 38,0	5	31,8	26,4 - 38,1	19	13,5	5,6 - 23,0	5
Ch. sessile/pédonculé			2	22,7	17,3 - 28,2	5			2	24,0	17,9 - 30,1	5
Hêtre	25,5	14,6 - 34,4	20	24,7	14,7 - 40,6	5	76,3	69,9 - 79,2	20	17,9	8,2 - 49,5	5
Douglas	18,0	10,5 - 22,6	6	14,3	8,6 - 21,5	5	40,6	27,7 - 55,3	6	16,7	13,3 - 20,6	5
Epicéa	35,4	22,7 - 63,1	11	25,0	8,1 - 67,3	5	43,0	38,8 - 47,3	11	17,7	10,5 - 26,3	5
Mélèze			1	21,2		5			1	12,7		5
Pin Laricio			2	35,7	29,0 - 42,4	5			2	15,7	10,4 - 20,9	5
Pin maritime	35,0	13,0 - 88,4	7	30,3	20,7 - 59,2	5	90,2	72,7 - 103,1	7	20,7	7,6 - 28,7	5
Pin sylvestre	21,0	13,5 - 29,7	14	18,7	8,6 - 36,3	5	51,3	45,6 - 54,4	14	15,5	9,8 - 23,5	5
Sapin pectiné	20,2	14,5 - 31,9	11	23,6	10,6 - 43,7	5	113,5	98,7 - 132,7	11	17,6	7,6 - 31,8	5
	Cuivre						Zinc					
Chêne pédonculé	39,1	14,6 - 98,0	9	30,0	5,4 - 124,4	5	14,3	9,0 - 20,1	9	14,2	4,9 - 23,3	5
Chêne sessile	33,8	10,3 - 69,6	19	23,7	4,6 - 75,9	5	14,4	7,5 - 24,5	19	21,0	14,0 - 29,9	5
Ch. sessile/pédonculé			2	54,7	53,0 - 56,4	5			2	24,2	22,3 - 26,1	5
Hêtre	27,9	11,9 - 62,0	20	25,8	4,7 - 75,5	5	22,9	17,6 - 28,6	20	19,3	4,8 - 30,1	5
Douglas	13,8	6,9 - 30,5	6	18,2	6,2 - 34,9	5	19,9	12,9 - 23,7	6	13,3	7,2 - 17,9	5
Epicéa	41,3	10,2 - 96,6	11	34,0	12,6 - 90,5	5	28,2	19,2 - 41,4	11	15,1	5,8 - 28,3	5
Mélèze			1	16,5		5			1	16,9		5
Pin Laricio			2	70,2	15,0 - 125,5	5			2	15,6	9,7 - 21,4	5
Pin maritime	30,6	19,5 - 35,3	7	22,5	17,2 - 28,0	5	18,0	14,0 - 22,3	7	16,0	7,6 - 37,1	5
Pin sylvestre	14,4	9,7 - 19,5	14	11,7	4,8 - 26,6	5	16,0	13,5 - 18,6	14	14,1	9,3 - 23,1	5
Sapin pectiné	12,6	9,8 - 15,2	11	20,9	14,2 - 31,0	5	11,6	6,8 - 16,3	11	8,8	3,0 - 16,7	5

11. Variabilité intraplacette des minéralomasses^{100f (1000a)} foliaires

Tableau A 14: Variabilité entre arbres de la minéralomasse^{100f (1000a)} foliaire: coefficients de variation moyens de toutes les placettes, minimum et maximum et nombre (Nb) d'arbres par placette pris en compte pour calculer chaque CV moyen.

Table A 14: *Intra-plot variation in the foliar mineral mass per 100 leaves or 1000 needles : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of trees per plot taken into account to calculate each average CV.*

Essences	C.V. intraplacette							
	Moy	Min	Max	Nb*	Moy	Min	Max	Nb*
	Azote				Phosphore			
Chêne pédonculé	32,8	21,0	57,2	8	33,8	19,7	50,6	8
Chêne sessile	27,1	14,8	58,1	8	29,4	16,0	61,5	8
Chêne sessile/pédonculé	47,5	29,2	65,7	8	48,6	33,7	63,4	8
Hêtre	20,3	9,7	50,3	8	21,3	11,7	49,0	8
Douglas	22,1	15,7	29,7	8	24,6	15,3	34,4	8
Epicéa	25,6	16,7	33,7	8	26,3	15,3	36,4	8
Mélèze	29,5	29,5	29,5	8	30,7	30,7	30,7	8
Pin laricio	27,8	23,6	32,0	8	19,1	13,2	25,0	8
Pin maritime	22,5	14,9	30,2	8	19,1	8,9	28,0	8
Pin sylvestre	22,3	13,7	38,5	8	24,4	15,9	40,5	8
Sapin pectiné	27,9	16,2	49,3	8	28,5	13,4	49,7	8
	Soufre				Potassium			
Chêne pédonculé	32,3	21,5	60,5	8	37,7	23,3	51,7	8
Chêne sessile	27,1	12,4	58,8	8	32,2	18,2	60,7	8
Chêne sessile/pédonculé	47,7	30,9	64,5	8	49,8	34,5	65,1	8
Hêtre	20,4	7,8	52,9	8	24,7	14,7	51,0	8
Douglas	27,7	24,8	29,0	8	32,2	21,7	44,8	8
Epicéa	26,2	18,9	36,2	8	31,5	23,5	41,9	8
Mélèze	29,3	29,3	29,3	8	31,8	31,8	31,8	8
Pin laricio	25,0	22,5	27,5	8	20,5	20,3	20,7	8
Pin maritime	20,0	9,8	28,4	8	26,4	17,1	51,6	8
Pin sylvestre	24,3	12,9	46,6	8	25,4	18,0	34,9	8
Sapin pectiné	28,9	15,2	45,4	8	29,7	14,2	50,2	8
	Calcium				Magnésium			
Chêne pédonculé	35,0	20,9	65,4	8	32,4	24,4	46,1	8
Chêne sessile	32,7	19,1	50,9	8	31,8	17,6	53,4	8
Chêne sessile/pédonculé	40,7	22,4	59,1	8	31,7	19,3	44,2	8
Hêtre	23,3	12,6	54,7	8	30,0	11,3	62,0	8
Douglas	32,9	25,4	45,4	8	29,0	26,3	32,8	8
Epicéa	30,7	12,0	46,0	8	34,0	14,2	46,7	8
Mélèze	41,8	41,8	41,8	8	27,8	27,8	27,8	8
Pin laricio	36,0	26,4	45,6	8	24,4	18,3	30,6	8
Pin maritime	23,0	12,6	29,0	8	20,3	9,8	32,1	8
Pin sylvestre	33,2	24,0	50,0	8	28,5	13,9	41,5	8
Sapin pectiné	33,6	20,6	49,4	8	34,2	16,4	57,2	8

* Nb = 7 pour les placettes PM 20 (Nbre placettes de Pin maritime : 7) et SP 26 (Nbre placettes de sapin : 11) et tous les nutriments. La masse foliaire^{1000a} de l'arbre N° 106 n'a pas été déterminée sur ces placettes.

Tableau A 14 (suite) :

Essences	C.V. intraplacette							
	Moy	Min	Max	Nb*	Moy	Min	Max	Nb*
	Sodium				Chlore			
Chêne pédonculé	65,4	41,8	107,8	8	38,1	19,2	58,1	8
Chêne sessile	50,8	26,7	85,3	8	39,2	17,8	58,7	8
Chêne sessile/pédonculé	104,3	57,7	150,9	8	39,8	20,3	59,4	8
Hêtre	50,8	19,6	102,1	8	33,0	14,4	70,6	8
Douglas	164,8	118,9	210,8	8	37,3	30,4	44,1	8
Epicéa	130,1	78,1	224,8	8	37,0	16,2	55,0	8
Mélèze	40,6	40,6	40,6	8	24,2	24,2	24,2	8
Pin laricio	103,0	68,6	137,3	8	42,8	31,8	53,8	8
Pin maritime	40,8	31,2	56,8	8	32,9	22,0	45,9	8
Pin sylvestre	66,7	30,5	117,5	8	28,9	16,6	52,4	8
Sapin pectiné	72,9	15,9	164,2	8	34,7	20,2	58,7	8
	Aluminium				Fer			
Chêne pédonculé	33,0	17,8	50,2	8	31,4	22,0	45,3	8
Chêne sessile	40,6	9,3	120,0	8	41,7	10,3	172,6	8
Chêne sessile/pédonculé	74,6	35,8	113,4	8	63,9	31,2	96,6	8
Hêtre	31,8	8,9	129,8	8	21,5	5,5	47,4	8
Douglas	35,1	23,3	55,3	8	26,9	18,9	33,6	8
Epicéa	63,5	24,3	166,7	8	32,4	15,6	46,7	8
Mélèze	49,6	49,6	49,6	8	58,6	58,6	58,6	8
Pin laricio	40,3	37,2	43,3	8	47,0	18,3	75,6	8
Pin maritime	29,5	18,3	50,3	8	35,4	22,0	49,9	8
Pin sylvestre	36,4	20,1	56,0	8	37,6	17,4	93,6	8
Sapin pectiné	48,0	32,2	67,5	8	55,6	18,8	128,2	8
	Manganèse				Cuivre			
Chêne pédonculé	40,2	25,6	55,2	8	63,2	30,0	105,0	8
Chêne sessile	36,1	20,7	51,6	8	55,9	21,0	179,4	8
Chêne sessile/pédonculé	39,7	25,6	53,8	8	95,3	56,4	134,3	8
Hêtre	36,3	12,8	105,5	8	36,7	10,2	124,4	8
Douglas	44,9	28,9	68,6	8	41,8	22,8	101,5	8
Epicéa	39,4	25,7	56,1	8	30,8	14,7	65,3	8
Mélèze	35,7	35,7	35,7	8	31,3	31,3	31,3	8
Pin laricio	38,9	37,8	39,9	8	102,5	36,3	168,7	8
Pin maritime	36,1	18,1	66,9	8	25,9	19,2	37,4	8
Pin sylvestre	33,4	22,2	54,4	8	32,1	14,2	59,7	8
Sapin pectiné	41,2	23,0	58,9	8	54,9	20,8	129,8	8
	Zinc							
Chêne pédonculé	42,7	27,8	79,6	8				
Chêne sessile	35,7	17,2	57,5	8				
Chêne sessile/pédonculé	48,3	42,0	54,5	8				
Hêtre	32,4	10,9	107,7	8				
Douglas	32,8	22,0	39,0	8				
Epicéa	37,4	24,8	63,5	8				
Mélèze	34,0	34,0	34,0	8				
Pin laricio	28,0	26,8	29,2	8				
Pin maritime	26,0	19,2	36,4	8				
Pin sylvestre	28,7	18,6	44,9	8				
Sapin pectiné	33,6	19,8	47,7	8				

* Nb = 7 pour les placettes PM 20 (Nbre placettes de Pin maritime : 7) et SP 26 (Nbre placettes de sapin : 11) et tous les nutriments. La masse foliaire^{1000a} de l'arbre N° 106 n'a pas été déterminée sur ces placettes.

12. Variabilité intraplacette des masses foliaires^{100f (1000a)} et des teneurs foliaires en nutriments

Tableau A 15: Variabilité entre arbres des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)} : coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) d'arbres pris en compte par placette pour calculer chaque CV moyen.

Table A 15: *Intra-plot variation of foliar nutrient concentrations and dry weight per 100 leaves or 1000 needles per species : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of trees per plot taken into account to calculate each average CV.*

Essences	C.V. intraplacette							
	Moy	Min	Max	Nb*	Moy	Min	Max	Nb*
	Masse foliaire^{100f (1000a)}				Azote			
Chêne pédonculé	27,4	17,5	41,8	8	13,8	7,5	38,9	8
Chêne sessile	25,2	14,3	43,1	8	8,8	5,4	16,1	8
Chêne sessile/pédonculé	43,6	29,5	57,7	8	15,1	7,2	23,0	8
Hêtre	19,7	7,0	48,7	8	7,5	3,2	10,6	8
Douglas	20,1	17,0	25,5	8	7,9	4,6	12,6	8
Epicéa	22,5	11,0	31,8	8	8,4	3,5	16,4	8
Mélèze	26,5			8	11,1			8
Pin laricio	21,3	12,4	30,3	8	13,5	10,3	16,7	8
Pin maritime	16,4	10,0	23,6	8	13,8	9,9	16,0	8
Pin sylvestre	20,5	13,6	31,6	8	8,3	4,2	12,9	8
Sapin pectiné	24,5	11,9	49,0	8	11,0	5,5	25,7	8
	Phosphore				Soufre			
Chêne pédonculé	15,2	8,0	32,2	8	13,4	5,4	42,6	8
Chêne sessile	13,8	7,3	22,0	8	10,0	5,5	18,0	8
Chêne sessile/pédonculé	12,5	8,4	16,5	8	13,6	6,5	20,7	8
Hêtre	11,1	6,0	19,4	8	8,5	3,4	13,0	8
Douglas	9,6	6,2	15,6	8	13,0	8,7	16,3	8
Epicéa	12,4	8,4	18,1	8	8,7	4,5	12,3	8
Mélèze	16,8			8	12,5			8
Pin laricio	10,5	10,4	10,6	8	14,3	13,6	14,9	8
Pin maritime	10,6	6,2	13,8	8	11,8	8,0	16,7	8
Pin sylvestre	9,3	5,3	14,9	8	12,7	7,2	54,4	8
Sapin pectiné	14,6	8,7	27,8	8	12,6	7,6	21,9	8
	Potassium				Calcium			
Chêne pédonculé	18,2	9,0	35,1	8	21,3	8,6	41,6	8
Chêne sessile	15,9	7,4	25,0	8	20,3	6,7	38,5	8
Chêne sessile/pédonculé	14,4	9,0	19,9	8	22,1	14,8	29,3	8
Hêtre	16,3	7,2	24,6	8	18,8	5,2	32,1	8
Douglas	18,2	12,4	25,5	8	23,8	18,2	39,9	8
Epicéa	18,0	12,7	27,2	8	22,3	13,2	36,5	8
Mélèze	12,7			8	22,5			8
Pin laricio	13,8	12,5	15,1	8	30,5	24,6	36,5	8
Pin maritime	20,6	9,9	36,7	8	18,6	11,1	26,7	8
Pin sylvestre	14,1	8,7	16,9	8	22,2	15,4	33,9	8
Sapin pectiné	16,7	7,9	31,5	8	18,3	11,7	28,4	8

* Nb = 7 pour les masses foliaires de référence des placettes PM 20 (Nbre placettes de Pin maritime : 7) et SP 26 (Nbre placettes de Sapin : 11). La masse foliaire^{1000a} de l'arbre N° 106 n'a pas été déterminée dans les deux placettes.

Tableau A 15 (suite) :

Essences	C.V. intraplacette							
	Moy	Min	Max	Nb	Moy	Min	Max	Nb
	Magnésium				Sodium			
Chêne pédonculé	21,0	11,6	37,1	8	54,5	37,0	100,1	8
Chêne sessile	19,1	9,7	28,2	8	48,2	21,7	84,7	8
Chêne sessile/pédonculé	24,1	21,8	26,4	8	57,8	40,5	75,1	8
Hêtre	24,4	8,2	40,8	8	47,9	16,2	76,4	8
Douglas	15,3	13,5	19,0	8	161,5	123,2	203,2	8
Epicéa	21,3	12,9	36,1	8	124,5	78,7	210,1	8
Mélèze	11,7			8	28,7			8
Pin laricio	14,0	8,6	19,3	8	81,2	71,1	91,3	8
Pin maritime	13,2	7,7	20,5	8	34,5	19,4	52,8	8
Pin sylvestre	17,6	9,9	24,2	8	69,8	31,3	106,9	8
Sapin pectiné	19,2	15,3	22,8	8	67,4	13,4	163,9	8
	Chlore				Aluminium			
Chêne pédonculé	28,8	14,0	41,3	8	21,9	6,4	45,1	8
Chêne sessile	27,4	15,3	39,0	8	29,7	8,2	125,5	8
Chêne sessile/pédonculé	30,4	18,7	42,2	8	35,6	31,8	39,5	8
Hêtre	27,8	10,0	70,1	8	26,8	7,6	154,4	8
Douglas	28,0	22,6	35,5	8	26,1	14,6	43,8	8
Epicéa	28,3	8,9	41,7	8	57,6	12,3	170,0	8
Mélèze	12,3			8	30,8			8
Pin laricio	32,9	17,7	48,2	8	26,8	18,0	35,6	8
Pin maritime	29,8	20,6	37,2	8	23,9	10,8	47,3	8
Pin sylvestre	18,3	11,9	27,0	8	27,3	17,7	36,0	8
Sapin pectiné	26,2	16,7	39,9	8	33,3	17,3	53,1	8
	Fer				Manganèse			
Chêne pédonculé	23,6	8,3	46,9	8	29,3	12,6	43,2	8
Chêne sessile	31,9	9,2	182,7	8	25,9	9,8	56,0	8
Chêne sessile/pédonculé	23,2	18,5	27,8	8	26,4	25,0	27,8	8
Hêtre	12,9	3,4	35,0	8	31,5	14,8	97,4	8
Douglas	18,4	15,1	25,2	8	35,3	24,6	49,7	8
Epicéa	24,7	8,2	42,6	8	33,7	19,4	58,9	8
Mélèze	53,6			8	19,8			8
Pin laricio	37,3	12,3	62,3	8	30,0	20,5	39,5	8
Pin maritime	24,5	13,8	46,2	8	37,3	15,1	82,0	8
Pin sylvestre	32,4	13,1	81,7	8	25,1	11,9	40,8	8
Sapin pectiné	44,5	4,2	111,1	8	29,4	16,6	43,4	8
	Cuivre				Zinc			
Chêne pédonculé	49,8	16,5	106,1	8	29,3	12,4	51,2	8
Chêne sessile	43,5	13,3	209,6	8	24,7	11,3	53,2	8
Chêne sessile/pédonculé	81,0	44,9	117,1	8	28,7	23,3	34,1	8
Hêtre	28,7	9,7	100,8	8	25,8	7,9	118,8	8
Douglas	38,7	10,0	96,4	8	25,9	18,4	37,1	8
Epicéa	19,0	10,3	60,8	8	27,9	15,3	47,9	8
Mélèze	20,2			8	15,5			8
Pin laricio	98,4	28,4	168,4	8	18,6	17,7	19,6	8
Pin maritime	18,9	13,5	26,2	8	18,0	15,4	20,8	8
Pin sylvestre	31,7	10,1	77,3	8	16,7	10,0	26,3	8
Sapin pectiné	44,1	9,8	119,9	8	19,3	14,9	22,7	8

13. Calcul du nombre d'arbres nécessaire par placette (ou d'analyses par type d'échantillon de référence: CRM 100, CRM 101) pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs foliaires sur la placette (ou par type d'échantillon de référence) à un risque de première espèce (α)

Le nombre d'arbres (ou d'analyses) nécessaire (n) par placette (ou par type d'échantillon de référence) est donné par:

$$n = \frac{t_{1-\alpha/2}^2 \times CV^2}{d_r^2}$$

- avec: **t** • le t de Student au risque de 1^{ère} espèce α , et $\nu = n_i - 1$ degrés de liberté
- n_i** • le nombre d'arbres mesuré par placette pour estimer le coefficient de variation ($n = 8 = \text{constante}$)
- le nombre d'analyses par type d'échantillon de référence pour estimer le CV ($n = 17, 18, \text{ou } 24$)
- CV** • le coefficient de variation moyen au niveau placette estimé par la moyenne sur toutes les placettes d'une essence donnée des coefficients de variation entre arbres
- le coefficient de variation interanalyse en 1998
- d_r** • l'erreur relative acceptée (en pourcentage)

Dans cette formule, la variance peut être utilisée à la place du CV, mais pour des raisons de commodité, le CV a été retenu (Snowdon & Waring, 1982).

Pour $n_i = 8, 17, 18, \text{ et } 24$, les valeurs de $t_{1-\alpha/2}$ correspondant aux 3 valeurs de α retenues sont:

α	$t_{1-\alpha/2}$			
	$n = 8$	$n = 17$	$n = 18$	$n = 24$
0,05	2,365	2,120	2,110	2,069
0,10	1,895	1,746	1,740	1,714
0,20	1,415	1,337	1,334	1,320

Les effectifs obtenus ont été arrondis à l'entier supérieur.

14. Nombre d'arbres nécessaire par placette pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs foliaires sur la placette à un risque de première espèce (α) fixé

Tableau A 16: Nombre d'arbres nécessaire par placette pour chaque essence et chaque élément foliaire pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs sur la placette de 5, 10 ou 20 % au risque de première espèce (α) de 5, 10, ou 20 %

Table A 16: Number of trees required per plot, for each species and nutrient to achieve a given accuracy (P = 5, 10 or 20 %) for concentration averages with a risk α of 5, 10 or 20 %.

Essences	Risque	Précision P (%)											
	α (%)	5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
		Masse foliaire ^{100f(1000a)}			Azote			Phosphore			Soufre		
Chêne pédonculé	5	169	43	11	43	11	3	52	13	4	41	11	3
	10	108	27	7	28	7	2	34	9	3	26	7	2
	20	61	16	4	16	1	1	19	5	2	15	1	1
Chêne sessile	5	143	36	9	18	5	2	43	11	3	23	6	2
	10	92	23	6	12	3	1	28	7	2	15	4	1
	20	51	13	4	7	1	1	16	4	1	8	1	1
Chêne sessile/pédonculé	5	425	107	27	52	13	4	35	9	3	42	11	3
	10	273	69	18	33	9	3	23	6	2	27	7	2
	20	153	39	10	19	2	2	13	4	1	15	1	1
Hêtre	5	88	22	6	13	4	1	28	7	2	17	5	2
	10	56	14	4	9	3	1	18	5	2	11	3	1
	20	32	8	2	5	1	1	10	3	1	6	1	1
Douglas	5	91	23	6	15	4	1	21	6	2	38	10	3
	10	59	15	4	10	3	1	14	4	1	25	7	2
	20	33	9	3	6	1	1	8	2	1	14	1	1
Epicéa	5	114	29	8	16	4	1	35	9	3	18	5	2
	10	73	19	5	11	3	1	22	6	2	11	3	1
	20	41	11	3	6	1	1	13	4	1	7	1	1
Mélèze	5	157	40	10	28	7	2	63	16	4	36	9	3
	10	101	26	7	18	5	2	41	11	3	23	6	2
	20	57	15	4	10	1	1	23	6	2	13	1	1
Pin laricio	5	102	26	7	41	11	3	25	7	2	46	12	3
	10	66	17	5	27	7	2	16	4	1	30	8	2
	20	37	10	3	15	1	1	9	3	1	17	2	2
Pin maritime	5	61	16	4	43	11	3	26	7	2	32	8	2
	10	39	10	3	28	7	2	17	5	2	20	5	2
	20	22	6	2	16	1	1	10	3	1	12	1	1
Pin sylvestre	5	94	24	6	16	4	1	20	5	2	36	9	3
	10	61	16	4	11	3	1	13	4	1	24	6	2
	20	34	9	3	6	1	1	7	2	1	13	1	1
Sapin pectiné	5	135	34	9	28	7	2	48	12	3	36	9	3
	10	87	22	6	18	5	2	31	8	2	23	6	2
	20	49	13	4	10	1	1	18	5	2	13	1	1

Tableau A 16 (suite) :

Essences	Risque α (%)	Précision P (%)											
		5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
		Potassium			Calcium			Magnésium			Sodium		
Chêne pédonculé	5	75	19	5	102	26	7	99	25	7	664	166	42
	10	48	12	3	66	17	5	64	16	4	426	107	27
	20	27	7	2	37	3	3	36	9	3	238	15	15
Chêne sessile	5	57	15	4	93	24	6	82	21	6	521	131	33
	10	37	10	3	60	15	4	53	14	4	335	84	21
	20	21	6	2	34	3	3	30	8	2	187	12	12
Chêne sessile/pédonculé	5	47	12	3	110	28	7	131	33	9	748	187	47
	10	30	8	2	71	18	5	84	21	6	481	121	31
	20	17	5	2	40	3	3	47	12	3	268	17	17
Hêtre	5	60	15	4	80	20	5	134	34	9	513	129	33
	10	39	10	3	51	13	4	86	22	6	330	83	21
	20	22	6	2	29	2	2	48	12	3	184	12	12
Douglas	5	75	19	5	127	32	8	53	14	4	5835	1459	365
	10	48	12	3	82	21	6	34	9	3	3746	937	235
	20	27	7	2	46	3	3	19	5	2	2089	131	131
Epicéa	5	73	19	5	112	28	7	102	26	7	3467	867	217
	10	47	12	3	72	18	5	66	17	5	2226	557	140
	20	27	7	2	40	3	3	37	10	3	1241	78	78
Mélèze	5	37	10	3	114	29	8	31	8	2	185	47	12
	10	24	6	2	73	19	5	20	5	2	119	30	8
	20	13	4	1	41	3	3	11	3	1	66	5	5
Pin laricio	5	43	11	3	209	53	14	44	11	3	1475	369	93
	10	28	7	2	134	34	9	29	8	2	947	237	60
	20	16	4	1	75	5	5	16	4	1	528	33	33
Pin maritime	5	95	24	6	78	20	5	40	10	3	266	67	17
	10	61	16	4	50	13	4	26	7	2	171	43	11
	20	34	9	3	28	2	2	14	4	1	96	6	6
Pin sylvestre	5	45	12	3	111	28	7	70	18	5	1091	273	69
	10	29	8	2	71	18	5	45	12	3	701	176	44
	20	16	4	1	40	3	3	25	7	2	391	25	25
Sapin pectiné	5	63	16	4	75	19	5	83	21	6	1018	255	64
	10	41	11	3	49	13	4	53	14	4	653	164	41
	20	23	6	2	27	2	2	30	8	2	365	23	23

Tableau A 16 (suite) :

Essences	Risque α (%)	Précision P (%)											
		5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
		Chlore			Aluminium			Fer			Manganèse		
Chêne pédonculé	5	187	47	12	108	27	7	125	32	8	192	48	12
	10	120	30	8	70	18	5	80	20	5	124	31	8
	20	67	17	5	39	3	3	45	12	3	69	5	5
Chêne sessile	5	168	42	11	198	50	13	228	57	15	151	38	10
	10	108	27	7	128	32	8	146	37	10	97	25	7
	20	60	15	4	71	5	5	82	21	6	54	4	4
Chêne sessile/pédonculé	5	208	52	13	285	72	18	120	30	8	157	40	10
	10	133	34	9	183	46	12	78	20	5	101	26	7
	20	75	19	5	102	7	7	43	11	3	56	4	4
Hêtre	5	174	44	11	161	41	11	38	10	3	223	56	14
	10	112	28	7	104	26	7	24	6	2	143	36	9
	20	63	16	4	58	4	4	14	4	1	80	5	5
Douglas	5	175	44	11	153	39	10	77	20	5	279	70	18
	10	113	29	8	99	25	7	49	13	4	179	45	12
	20	63	16	4	55	4	4	28	7	2	100	7	7
Epicéa	5	180	45	12	743	186	47	137	35	9	254	64	16
	10	115	29	8	477	120	30	88	22	6	163	41	11
	20	65	17	5	266	17	17	50	13	4	91	6	6
Mélèze	5	34	9	3	212	53	14	644	161	41	89	23	6
	10	22	6	2	137	35	9	414	104	26	57	15	4
	20	13	4	1	76	5	5	231	58	15	32	2	2
Pin laricio	5	243	61	16	161	41	11	312	78	20	202	51	13
	10	156	39	10	104	26	7	200	50	13	130	33	9
	20	87	22	6	58	4	4	112	28	7	72	5	5
Pin maritime	5	199	50	13	128	32	8	135	34	9	312	78	20
	10	128	32	8	82	21	6	87	22	6	201	51	13
	20	72	18	5	46	3	3	49	13	4	112	7	7
Pin sylvestre	5	76	19	5	168	42	11	235	59	15	142	36	9
	10	49	13	4	108	27	7	151	38	10	91	23	6
	20	27	7	2	60	4	4	84	21	6	51	4	4
Sapin pectiné	5	155	39	10	248	62	16	443	111	28	194	49	13
	10	99	25	7	160	40	10	284	71	18	125	32	8
	20	56	14	4	89	6	6	159	40	10	70	5	5

Tableau A 16 (fin) :

Essences	Risque α (%)	Précision P (%)					
		5	10	20	5	10	20
		Cuivre			Zinc		
Chêne pédonculé	5	555	139	35	192	48	12
	10	356	89	23	124	31	8
	20	199	50	13	69	5	5
Chêne sessile	5	424	106	27	137	35	9
	10	273	69	18	88	22	6
	20	152	38	10	49	4	4
Chêne sessile/pédonculé	5	1468	367	92	185	47	12
	10	942	236	59	119	30	8
	20	526	132	33	67	5	5
Hêtre	5	185	47	12	149	38	10
	10	119	30	8	96	24	6
	20	67	17	5	54	4	4
Douglas	5	335	84	21	151	38	10
	10	215	54	14	97	25	7
	20	120	30	8	54	4	4
Épicéa	5	81	21	6	174	44	11
	10	52	13	4	112	28	7
	20	29	8	2	63	4	4
Mélèze	5	92	23	6	54	14	4
	10	59	15	4	35	9	3
	20	33	9	3	20	2	2
Pin laricio	5	2169	543	136	78	20	5
	10	1393	349	88	50	13	4
	20	777	195	49	28	2	2
Pin maritime	5	80	20	5	73	19	5
	10	52	13	4	47	12	3
	20	29	8	2	26	2	2
Pin sylvestre	5	226	57	15	63	16	4
	10	145	37	10	40	10	3
	20	81	21	6	23	2	2
Sapin pectiné	5	436	109	28	84	21	6
	10	280	70	18	54	14	4
	20	156	39	10	30	2	2

15. Corrélations entre les teneurs foliaires en nutriments (ou leur minéralomasse^{100f (1000a)}) et la teneur des mêmes éléments (ou leurs stocks) dans différents horizons de sol

Tableau A 17: Corrélations linéaires entre les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs des mêmes éléments dans les horizons LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, et 20-40 cm. Les ajustements linéaires sont tous du type []⁸ foliaire = a × [] sol + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Table A 17: Correlations between mean foliar nutrient concentrations from 1993 to 1997 (N, Ca, Mg, and K) and soil concentrations of the same elements in the LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-40 cm layers. Linear regressions are expressed as leaf [] = a × soil [] + b. Only correlations significant at least 10 % are presented. Significance: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Horizons	Essences							
	CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS	SP
Azote								
LFH	R ²		0,517(*)	0,354(*)				
	a		0,306	0,277				
	b		12,75	10,54				
	n		6	11				
0-10	R ²		0,811*			0,541(*)		0,285(*)
	a		0,558			1,444		-0,251
	b		14,97			7,30		14,33
	n		6			7		11
10-20	R ²	0,349(*)		0,661*				
	a	-1,811		0,673				
	b	28,65		15,42				
	n	9		6				
20-40	R ²	0,324(*)						
	a	-2,612						
	b	28,44						
	n	9						
Calcium								
0-10	R ²		0,556***			0,808***		0,635**
	a		1,714			0,220		0,155
	b		5,37			6,44		5,23
	n		19			20		11
10-20	R ²		0,346**			0,787***		0,700**
	a		3,134			0,218		0,177
	b		5,85			6,66		5,28
	n		19			20		11
20-40	R ²		0,233*			0,783***	0,411*	0,728***
	a		1,715			0,256	0,798	0,157
	b		6,19			6,60	2,35	5,36
	n		19			19	14	11
Magnésium								
0-10	R ²			0,527*	0,435**	0,500(*)	0,445**	
	a			0,719	0,487	0,242	0,793	
	b			0,811	0,93	1,28	0,75	
	n			9	20	7	14	
10-20	R ²						0,694***	
	a						1,749	
	b						0,74	
	n						14	
20-40	R ²		0,158(*)			0,392**	0,454**	
	a		0,230			0,950	0,797	
	b		1,58			0,98	0,80	
	n		19			19	14	

⁸ [] = teneur d'un élément donné.

Tableau A 17: (suite)

Horizons		Essences						
		CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS
		Potassium						
0-10	R ²		0,356**	0,604(*)				
	a		9,690	13,398				
	b		7,09	5,32				
	n		19	6				
10-20	R ²		0,271*					
	a		11,387					
	b		7,75					
	n		19					
20-40	R ²		0,359**					
	a		9,899					
	b		7,92					
	n		19					

Tableau A 18: Corrélations entre les minéralomasses^{100f (1000a)} moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs des mêmes éléments dans les horizons LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, et 20-40 cm. Les ajustements linéaires sont tous du type minéralomasses^{100f (1000a)} = a × [] sol + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Table A 18: Correlations between mean (1993-1997) foliar mineral mass per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil concentrations of the same elements in the LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-40 cm layers. Linear regressions are expressed as foliar mineral mass = a × soil [] + b. Only correlations significant to at least 10 % are presented. Significance: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Horizons	Essences							
	CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS	SP
Azote								
LFH	R ²		0,674*	0,332(*)			0,270(*)	
	a		2,633	1,839			16,320	
	b		32,3	41,7			47,8	
	n		6	11			14	
0-10	R ²	0,365**						
	a	-78,706						
	b	859,5						
	n	19						
10-20	R ²							
	a							
	b							
	n							
20-40	R ²							
	a							
	b							
	n							
Calcium								
0-10	R ²	0,451*	0,412**		0,630***	0,501(*)		0,560***
	a	5,926	50,290		2,509	-10,911		0,829
	b	139,5	153,3		83,0	357,5		26,5
	n	9	19		20	7		11
10-20	R ²	0,422(*)	0,328**		0,599***			0,680***
	a	5,664	103,906		2,468			0,999
	b	143,2	163,4		85,8			26,4
	n	9	19		20			11
20-40	R ²	0,420(*)	0,271*		0,563***			0,776***
	a	3,594	62,985		2,774			0,923
	b	144,0	172,3		85,2			26,5
	n	9	19		19			11
Magnésium								
0-10	R ²	0,397(*)		0,351(*)	0,284*			
	a	2,980		3,675	6,499			
	b	33,7		3,797	11,5			
	n	9		9	20			
10-20	R ²	0,397(*)	0,152(*)		0,239*			
	a	2,999	16,082		8,611			
	b	34,1	44,5		12,4			
	n	9	19		20			
20-40	R ²	0,456*	0,244*		0,447**			
	a	2,021	10,584		16,711			
	b	34,2	43,9		11,4			
	n	9	19		19			
Potassium								
0-10	R ²	0,341(*)						
	a	200,632						
	b	159,0						
	n	9						
10-20	R ²							
	a							
	b							
	n							
20-40	R ²	0,391(*)	0,161(*)					
	a	181,168	262,584					
	b	177,2	231,5					
	n	9	19					

Tableau A 19: Corrélations entre les minéralomasses^{100f (1000a)} moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol. Les ajustements linéaires sont tous du type minéralomasses^{100f (1000a)} = a × (stocks dans le sol) + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Table A 19: Correlations between mean foliar mineral mass (from 1993 to 1997) per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil pools of the same elements in different soil layers. Linear regressions are expressed as foliar mineral mass = a × (soil nutrient pools) + b. Only correlations significant to at least 10 % are presented. Significance: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Horizons		Essences							
		CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS	SP
Azote									
LFH	R ²								
	a								
	b								
	n								
0-10	R ²		0,390**						
	a		-87,56						
	b		865,29						
	n		19						
10-20	R ²								
	a								
	b								
	n								
20-40	R ²								
	a								
	b								
	n								
LFH-10	R ²	0,365(*)	0,335**						
	a	57,09	-74,66						
	b	439,38	858,94						
	n	9	19						
LFH-20	R ²		0,246*						
	a		-52,38						
	b		861,54						
	n		19						
LFH-40	R ²								
	a								
	b								
	n								
0-20	R ²								
	a								
	b								
	n								
0-40	R ²								
	a								
	b								
	n								
10-40	R ²								
	a								
	b								
	n								
Calcium									
0-10	R ²	0,491*	0,457**			0,725***			0,524*
	a	0,03	0,32			0,02			0,00
	b	136,04	146,089			78,26			27,295
	n	9	19			20			11
10-20	R ²		0,354**			0,661***			0,678**
	a		0,58			0,02			0,01
	b		160,41			82,23			26,77
	n		19			20			11
20-40	R ²		0,379**			0,582**			0,782**
	a		0,18			0,01			0,00
	b		167,79			81,82			26,89
	n		19			18			11
0-20	R ²	0,455*	0,450**			0,699***			0,605**
	a	0,02	0,22			0,01			0,00
	b	139,20	148,02			79,99			26,93
	n	9	19			20			11
0-40	R ²		0,485**			0,613***			0,722**

Tableau A 19 (suite):

Horizons		Essences						
		CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS
Calcium (suite)								
10-40	a		0,12			0,01		0,00
	b		152,02			80,53		26,67
	n		19			18		11
	R ²		0,409**			0,592**		0,760**
	a		0,15			0,01		0,00
	b		163,07			81,60		26,78
n		19			18		11	
Magnésium								
0-10	R ²	0,489*				0,505***		
	a	0,03				0,10		
	b	33,08				10,34		
	n	9				20		
10-20	R ²	0,468*	0,271*			0,399**		
	a	0,03	0,18			0,11		
	b	33,68	43,21			11,70		
	n	9	19			20		
20-40	R ²	0,488*	0,382**			0,504**		
	a	0,01	0,05			0,07		
	b	33,99	43,19			11,66		
	n	9	19			18		
0-20	R ²	0,479*	0,233*			0,468***		
	a	0,01	0,08			0,05		
	b	33,40	42,27			10,87		
	n	9	19			20		
0-40	R ²	0,495*	0,357**			0,543***		
	a	0,01	0,03			0,03		
	b	33,72	42,45			10,83		
	n	9	19			18		
10-40	R ²	0,491*	0,372**			0,500**		
	a	0,01	0,04			0,05		
	b	33,88	43,04			11,44		
	n	9	19			18		
Potassium								
0-10	R ²	0,395*	0,178(*)					0,321(*)
	a	0,70	0,87					0,12
	b	141,52	199,32					24,12
	n	9	19					11
10-20	R ²		0,227*			0,146(*)		
	a		1,39			0,49		
	b		204,82			75,14		
	n		19			20		
20-40	R ²	0,417(*)	0,432**					
	a	0,22	0,73					
	b	173,02	203,45					
	n	9	19					
0-20	R ²	0,370(*)	0,204(*)					0,301(*)
	a	0,35	0,55					0,07
	b	151,18	199,69					24,26
	n	9	19					11
0-40	R ²	0,409(*)	0,359**					
	a	0,14	0,37					
	b	163,38	191,59					
	n	9	19					
10-40	R ²	0,399(*)	0,401**					
	a	0,17	0,53					
	b	170,10	198,49					
	n	9	19					

Tableau A 20: Corrélations entre les teneurs moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol. Les ajustements linéaires sont tous du type teneurs foliaires = a × (stocks dans le sol) + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. Dans le cas de Ca, Mg, et K les pentes (a) sont × par 100.

Table A 20: Correlations between mean foliar nutrient mass (from 1993 to 1997) per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil pools of the same elements in different soil layers. Linear regressions are expressed as foliar nutrient concentration = a × (soil nutrient pools) + b. Only correlations significant to at least 10 % are presented. Significance: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. For Ca, Mg, and K, slopes (a) are multiplied by 100.

Horizons		Essences							
		CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS	SP
Azote									
LFH	R ²	0,820***							
	a	14,03							
	b	24,79							
	n	9							
0-10	R ²		0,198(*)	0,683*				0,384*	
	a		-1,55	1,31				2,23	
	b		27,58	14,55				13,28	
	n		19	6				14	
10-20	R ²	0,448*		0,633(*)			0,596*	0,267(*)	
	a	-2,33		1,13			2,44	3,18	
	b	29,75		15,55			7,46	13,82	
	n	9		6			7	14	
20-40	R ²								
	a								
	b								
	n								
LFH-10	R ²		0,208*	0,685*			0,470(*)	0,375*	
	a		-1,46	1,18			1,94	1,82	
	b		27,74	14,42			6,52	12,63	
	n		19	6			7	14	
LFH-20	R ²		0,187(*)	0,692*			0,601*	0,392*	
	a		-1,13	0,61			1,23	1,35	
	b		28,11	14,86			6,60	12,51	
	n		19	6			7	14	
LFH-40	R ²						0,519(*)	0,340*	
	a						0,62	0,97	
	b						7,24	12,61	
	n						7	14	
0-20	R ²			0,672*			0,527(*)	0,371*	
	a			0,62			1,17	1,44	
	b			15,02			7,00	13,21	
	n			6			7	14	
0-40	R ²	0,358(*)					0,469(*)	0,326*	
	a	-0,59					0,59	1,03	
	b	29,57					7,48	13,08	
	n	9					7	14	
10-40	R ²	0,450*						0,224(*)	
	a	-0,97						1,54	
	b	29,73						13,58	
	n	9						14	
Calcium									
0-10	R ²		0,483**			0,809***		0,230(*)	0,682**
	a		0,97			0,17		0,36	0,09
	b		5,32			6,23		2,27	5,28
	n		19			20		14	11
10-20	R ²		0,240*			0,765***			0,781***
	a		1,39			0,16			0,11
	b		5,98			6,51			5,27
	n		19			20			11
20-40	R ²		0,208*			0,773***		0,410*	0,830***
	a		0,38			0,09		0,19	0,04
	b		6,23			6,38		2,38	5,35
	n		19			18		14	11

Tableau A 20 (suite):

Horizons		Essences						
		CHP	CHS	DOU	EPC	HET	PM	PS
Calcium (suite)								
0-20	R ²		0,419**		0,794***		0,222(*)	0,739***
	a		0,63		0,08		0,18	0,05
	b		5,47		6,35		2,34	5,25
	n		19		20		14	11
0-40	R ²		0,351**		0,777***		0,349*	0,812***
	a		0,29		0,04		0,10	0,02
	b		5,74		6,31		2,34	5,27
	n		19		18		14	11
10-40	R ²		0,236*		0,772***		0,359*	0,824***
	a		0,33		0,06		0,13	0,03
	b		6,11		6,38		2,38	5,31
	n		19		18		14	11
Magnésium								
0-10	R ²		0,158(*)		0,500***		0,620*	0,467**
	a		0,36		0,59		0,36	0,97
	b		1,51		0,91		1,20	0,73
	n		19		20		7	14
10-20	R ²		0,169(*)		0,361**		0,701*	0,744***
	a		0,39		0,64		0,52	1,87
	b		1,56		1,00		1,25	0,71
	n		19		20		7	14
20-40	R ²		0,211*		0,336*		0,738*	0,371*
	a		0,09		0,33		0,35	0,29
	b		1,57		1,02		1,28	0,81
	n		19		18		7	14
0-20	R ²		0,169(*)		0,447**		0,669*	0,624***
	a		0,19		0,32		0,22	0,71
	b		1,53		0,94		1,21	0,70
	n		19		20		7	14
0-40	R ²		0,213*		0,445**		0,722*	0,574**
	a		0,07		0,19		0,14	0,27
	b		1,55		0,95		1,23	0,75
	n		19		18		7	14
10-40	R ²		0,210*		0,375**		0,732*	0,480**
	a		0,08		0,24		0,21	0,29
	b		1,56		0,99		1,27	0,79
	n		19		18		7	14
Potassium								
0-10	R ²		0,453**					0,619**
	a		3,50					2,33
	b		6,57					4,61
	n		19					11
10-20	R ²		0,491***					0,352(*)
	a		5,15					2,49
	b		6,94					4,95
	n		19					11
20-40	R ²		0,472**					
	a		1,94					
	b		7,42					
	n		19					
0-20	R ²		0,482***					0,532*
	a		2,15					1,31
	b		6,66					4,69
	n		19					11
0-40	R ²		0,547***					0,363*
	a		1,17					0,61
	b		6,81					4,96
	n		19					11
10-40	R ²		0,519***					
	a		1,53					
	b		7,16					
	n		19					

Tableau A 21: Corrélations entre les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs ou les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol (résineux et feuillus). Les ajustements linéaires sont tous du type teneur foliaire = a × (conc. ou stocks dans le sol) + b. Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. L'absence de dosages du Ca, du Mg, et du K dans le sol est indiqué par un "/". Les pentes (a) sont × par 100 pour les stocks en Ca, Mg, et K dans le sol.

Table A 21: Correlations between mean foliar nutrient concentration (from 1993 to 1997)(N, Ca, Mg, and K) and soil concentrations or pools of the same elements in different soil layers (Coniferous and broad-leaved trees). Linear regressions are expressed as leaf nutrient concentration = a × (soil exchangeable ion conc. or pools) + b. Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. No Ca, Mg, and K analyse in the soil are indicated by a slash. The slopes (a) are multiplied by 100 for the pools of Ca, Mg, and K in the soil.

Horizons		Résineux				Feuillus			
		Ca	N	Mg	K	Ca	K	Mg	N
Teneurs foliaires (mg/g) / Teneurs dans le sol (cmol/kg) sauf pour N (g/kg)									
LFH	R ²	/	0,366 ***	/	/	/	/	/	NS
	a	/	0,53	/	/	/	/	/	
	b	/	7,84	/	/	/	/	/	
	n	/	52	/	/	/	/	/	
0-10	R ²	0,559 ***	0,081 *	0,408 ***	0,143 **	0,762 ***	0,146 **	0,078 *	NS
	a	0,23	0,45	0,37	4,74	0,22	7,01	0,21	
	b	2,90	13,3	0,99	5,34	6,59	7,25	1,35	
	n	51	51	51	51	50	50	50	
10-20	R ²	0,570 ***	NS	0,328 ***	0,151 **	0,739 ***	0,131 **	NS	0,085 *
	a	0,25		0,44	6,66	0,22	8,34		0,49
	b	3,04		1,04	5,44	6,75	7,70		25,0
	n	51		51	51	50	50		50
20-40	R ²	0,593 ***	NS	0,271 ***	0,129 **	0,697 ***	0,181 **	0,118 *	0,098 *
	a	0,23		0,47	7,05	0,24	7,37	0,19	0,73
	b	3,11		1,05	5,55	6,66	7,89	1,39	25,0
	n	51		51	51	49	49	49	49
Teneurs foliaires (mg/g) / Stocks dans le sol (t/ha pour N ou Kg/ha)									
LFH	R ²	/	0,137 **	/	/	/	/	/	NS
	a	/	3,25	/	/	/	/	/	
	b	/	13,1	/	/	/	/	/	
	n	/	52	/	/	/	/	/	
0-10	R ²	0,496 ***	0,116 *	0,333 ***	0,087 *	0,760 ***	NS	NS	NS
	a	0,13	1,30	0,35	1,49	0,16			
	b	2,987	12,1	1,01	5,44	6,43			
	n	51	51	51	51	50			
10-20	R ²	0,525 ***	NS	0,270 ***	0,080 *	0,711 ***	NS	NS	NS
	a	0,13		0,40	1,60	0,16			
	b	3,09		1,05	5,58	6,62			
	n	51		51	51	50			
20-40	R ²	0,565 ***	NS	0,228 ***	NS	0,577 ***	NS	NS	NS
	a	0,05		0,20		0,07			
	b	3,16		1,06		6,58			
	n	51		51		48			
LFH-10	R ²	/	0,228 ***	/	/	/	/	/	NS
	a	/	1,72	/	/	/	/	/	
	b	/	10,6	/	/	/	/	/	
	n	/	51	/	/	/	/	/	
LFH-20	R ²	/	0,155 **	/	/	/	/	/	NS
	a	/	0,77	/	/	/	/	/	
	b	/	11,8	/	/	/	/	/	
	n	/	51	/	/	/	/	/	
LFH-40	R ²	/	0,096 *	/	/	/	/	/	NS
	a	/	0,34	/	/	/	/	/	
	b	/	12,6	/	/	/	/	/	
	n	/	51	/	/	/	/	/	
0-20	R ²	0,522 ***	0,097 *	0,308 ***	0,088 *	0,740 ***	NS	NS	NS
	a	0,06	0,61	0,19	0,81	0,08			
	b	3,02	12,6	1,03	5,48	6,52			
	n	51	51	51	51	50			
0-40	R ²	0,559 ***	NS	0,280 ***	0,081 *	0,644 ***	NS	NS	NS
	a	0,03		0,10	0,39	0,04			
	b	3,08		1,04	5,59	6,52			
	n	51		51	51	48			
10-40	R ²	0,558 ***	NS	0,248 ***	NS	0,618 ***	NS	NS	NS
	a	0,04		0,14		0,05			
	b	3,13		1,05		6,57			
	n	51		51		48			

16. Accroissements annuels moyens en diamètre (1993-1996) avant et après correction des 52 arbres "objectif".

Tableau A 22: Valeurs moyennes des accroissements annuels en diamètre des 52 arbres "objectif" avant ($\Delta\varnothing_{\text{initial}}$) et après correction ($\Delta\varnothing_{\text{corrigé}}$) quand l'accroissement est (1) $<-2,2$ mm ou (2) $> 3 \times \Delta\varnothing$.

Table A 22: Mean annual diameter increment for the 52 "objective" trees before ($\Delta\varnothing_{\text{initial}}$) and after correction ($\Delta\varnothing_{\text{corrigé}}$) for increment (1) $<-2,2$ mm or (2) $> 3 \times \Delta\varnothing$.

Essences	Années	$\Delta\varnothing_{\text{initial}}$ (mm)	$3 \times \Delta\varnothing$ (mm)	$\Delta\varnothing_{\text{corrigé}}$ (mm)
CHP	93-94	3,8	11,3	3,8
CHS	93-94	4,4	13,1	4,7
CPS	93-94	6,5	19,5	6,5
DOU	93-94	10,0	30,0	9,9
EPC	93-94	5,8	17,3	5,8
HET	93-94	6,0	18,0	6,2
MEL	93-94	3,8	11,4	3,8
PL	93-94	3,1	9,3	3,1
PM	93-94	7,2	21,6	7,2
PS	93-94	4,8	14,3	4,8
SP	93-94	5,0	15,1	5,7

CHP	94-95	4,5	13,6	4,6
CHS	94-95	4,6	13,9	4,6
CPS	94-95	4,7	14,0	4,5
DOU	94-95	8,7	26,0	9,1
EPC	94-95	5,1	15,4	5,0
HET	94-95	4,0	12,0	3,8
MEL	94-95	2,8	8,4	2,8
PL	94-95	4,3	12,9	4,3
PM	94-95	5,1	15,3	5,3
PS	94-95	3,2	9,7	3,7
SP	94-95	5,2	15,5	5,3

CHP	95-96	4,1	12,4	4,1
CHS	95-96	4,7	14,2	4,7
CPS	95-96	0,6	1,7	3,9
DOU	95-96	7,9	23,8	9,5
EPC	95-96	5,8	17,3	5,4
HET	95-96	3,9	11,6	3,9
MEL	95-96	6,2	18,6	6,2
PL	95-96	4,7	14,0	4,7
PM	95-96	6,6	19,7	6,8
PS	95-96	4,0	12,0	4,3
SP	95-96	5,7	17,2	5,7

17. Corrélations entre les accroissements annuels moyens en diamètre et les teneurs foliaires en nutriments des 8 arbres "échantillon" (1993 - 1996).

Tableau A 23: Corrélations entre les accroissements annuels moyens en diamètre de 1993 à 1996 des 8 arbres "échantillon" déduits des mesures de circonférence, et les teneurs foliaires en nutriments foliaires (6 macro, et 7 micronutriments et 9 rapports entre éléments) des mêmes arbres. Les ajustements linéaires sont tous du type " accroissement = a + b × teneur ou rapport de nutriment foliaire". Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01.

*Table A 23: Correlations between mean annual diameter increment from 1993 to 1996 (from girth measurement) for the 8 "sample" trees, and foliar nutrients (6 macro and 7 micronutrients) and 9 ratios between nutrients. Linear regressions are expressed as "diameter increment = a + b × leaf nutrient concentrations or ratios". Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01.*

Eléments		Essences							
		CHP	CHS	HET	DOU	EPC	PM	PS	SP
N	a			1,50		-0,14	-0,35		-1,26
	b			-0,04		0,05	0,09		0,13
	R ²			0,126 **		0,144 *	0,516 *		0,289 **
	n			57		32	11		31
S	a			1,22				0,10	
	b			-0,49				0,33	
	R ²			0,068 *				0,102 *	
	n			57				41	
P	a				-0,21			-0,01	-0,11
	b				0,93			0,32	0,50
	R ²				0,270 *			0,107 *	0,215 **
	n				17			41	31
Ca	a								0,24
	b								0,05
	R ²								0,140 *
	n								31
Mg	a								0,95
	b								-0,31
	R ²								0,141 *
	n								31
K	a				0,07				
	b				0,12				
	R ²				0,318 *				
	n				17				
Na	a						0,86	0,37	
	b						-0,001	0,001	
	R ²						0,462 *	0,202 **	
	n						11	41	
Zn	a			0,17					
	b			0,01					
	R ²			0,100 *					
	n			57					
Mn	a						0,28		
	b						0,00		
	R ²						0,573 **		
	n						11		
Fe	a								
	b								

Tableau A 23 (suite):

Eléments	Essences							
	CHP	CHS	HET	DOU	EPC	PM	PS	SP
Cu								
	R ²							
	n							
Al								
	a							
	b							
Cl								
	a							
	b							
N/P								
	a							1,23
	b							-0,06
S/N								
	a							0,142 *
	b							31
N/K								
	a							
	b							
N/Mg								
	a							
	b							
N/Ca								
	a							
	b							
K/Ca								
	a							
	b							
K/Mg								
	a							
	b							
Ca/Mg								
	a							
	b							
Fe/Mn								
	a							
	b							

18. Liste des figures, des tableaux, et des cartes

18.1. Liste des figures

Figure 1:	Décalage entre les dates de deux prélèvements foliaires successifs dans les placettes de résineux à aiguilles persistantes (en noir, n = 51), et dans les placettes de feuillus et la placette de mélèze (en blanc, n = 51). ..10
Figure 2:	Schéma d'une placette type du réseau RENECOFOR. Seuls les arbres "observation" (à l'intérieur de la partie clôturée, n = 36) et "échantillon" (à l'extérieur de la clôture, n = 16) sont représentés sur ce schéma. Ils constituent les arbres "objectif" (n = 52) de la placette. 11
Figure 3:	Pourcentage annuel de placettes où les prélèvements foliaires ont été effectués dans toutes les directions (en noir) et où plus de la moitié des arbres ont été échantillonnés dans la même direction (en blanc) (n=102 placettes/an). 14
Figure 4:	Nombre annuel de placettes avec une ou plusieurs observations d'un type donné (cf. Tableau 5, p.17). 17
Figure 5:	Suivi de l'assurance qualité de 1993 à 1998 pour les macronutriments. En noir: échantillons de référence CRM 100 (hêtre), en blanc: échantillons de référence CRM 101(épicéa). Moyennes, écart types, coefficients de variation (CV) et effectifs (n) par année. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs certifiées des deux références (noter l'absence de valeur certifiée pour le potassium chez l'épicéa).32
Figure 6:	Suivi de l'assurance qualité de 1993 à 1998 pour les micronutriments. En noir: échantillons de référence CRM 100 (hêtre), en blanc: échantillons de référence CRM 101(épicéa). Moyennes, écarts-types, coefficients de variation (CV) et effectifs (n) par année. Les lignes horizontales correspondent aux valeurs certifiées des deux références (noter l'absence de valeurs certifiées pour Na, Fe, Mn, Cu, et Zn, cf. Tableau 9). 34
Figure 7:	Valeurs moyennes entre 1993 et 1997, et écart-types du poids sec de 100 feuilles ou 1000 aiguilles (masse foliaire ^{100f (1000a)}) pour chaque essence du réseau RENECOFOR. 40
Figure 8:	Valeurs moyennes (1993-1997) et écart-types des teneurs foliaires des macronutriments (a) et des micronutriments (b) analysés pour chaque essence du réseau RENECOFOR. 41
Figure 9:	Teneurs foliaires des placettes en sodium (à gauche) et en chlore (à droite) en fonction de leur longitude (n=102). En blanc sont représentées les placettes les plus méridionales (latitude < 44°51') et en noir les placettes plus septentrionales. 43
Figure 10:	Pourcentage de placettes par essence dont les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 sont inférieures à la teneur optimale (blanc), au seuil critique (gris), et au seuil de carence (noir) (Comparaisons avec les seuils indicatifs ^{Fr} indiqués dans le Tableau 15 , p.50) . Ce dernier cas concerne uniquement les microéléments (Fe, Mn, Cu et Zn). L'absence de barre signifie que la valeur seuil n'a pas été définie et "0 %" signifie qu'aucune teneur n'est inférieure au seuil donné. 59
Figure 11:	Teneur foliaire en azote (mg.g ⁻¹) et masse de 100 feuilles (g) dans les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. Moyennes des 5 années de suivi. "Ac" correspond aux placettes sur sols acides. 66
Figure 12:	Relation entre le poids sec de 100 feuilles et l'âge moyen (en 1994) des arbres dominants et codominants des 9 chênaies pédonculés du réseau RENECOFOR. 68
Figure 13:	Comparaison entre les coefficients de variation intraplacette (noir), interplacette (hachures horizontales), interannuel (blanc), et analytique pour les deux types d'échantillons de référence européens BCR 100 et BCR 101 (gris) des teneurs foliaires en nutriments pour chaque essence du réseau RENECOFOR et chaque élément foliaire. 88
Figure 14:	Meilleures régressions linéaires entre les teneurs en nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les teneurs en éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) chez les feuillus et les résineux. 96
Figure 15:	Ajustements logarithmiques entre la teneur en calcium foliaire (moyenne pour la période 1993-1997) et le calcium échangeable à trois niveaux dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. 98
Figure 16:	Meilleures régressions linéaires entre les teneurs en nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les stocks d'éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) chez les feuillus et les résineux. 99
Figure 17:	Ajustements logarithmiques entre la minéralomasse ^{100f} foliaire (pour 100 feuilles) en calcium (moyenne pour la période 1993-1997), et le calcium échangeable à trois niveaux dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour les 20 placettes de hêtre du réseau RENECOFOR. 101
Figure 18:	Meilleures régressions linéaires entre les nutriments foliaires (moyenne pour la période 1993-1997) et les stocks d'éléments échangeables dans le sol (campagne de mesures 1993-1995) pour l'azote, le potassium, le calcium, et le magnésium. Les seuils indicatifs de carence, critique et optimum sont également indiqués. 106
Figure 19:	Evolution du pourcentage de défoliation moyen par placette entre 1994 et 1997 sur le réseau RENECOFOR. 115

Figure 20: Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés la même année. Seuils de significativité: * P<5 %, ** P<1 %, et *** P< 0,1 %.	117
Figure 21: Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés l'année (n-1). Seuils de significativité: * P<5 %, ** P<1 %, et *** P< 0,1 %.	118
Figure 22: Corrélations significatives entre le pourcentage de défoliation l'année (n) et les nutriments foliaires dosés l'année (n-1) pour les éléments non significatifs l'année (n). Seuils de significativité: * P<5 %, ** P<1 %, et *** P< 0,1 %.	119
Figure 23: Meilleures régressions linéaires entre l'accroissement annuel moyen en diamètre entre 1993 et 1996 des 52 arbres "objectifs" et la moyenne des teneurs en nutriments foliaires (ou des rapports entre nutriments) des 8 arbres "échantillon" entre 1993 et 1995. *, **, régressions significatives respectivement à 5 % et 1 %. L'absence de régression indique des R ² non significatifs ou des effectifs trop réduits.	127
Figure 24: Relations entre l'accroissement annuel moyen en diamètre entre 1993 et 1996 des 52 arbres "objectifs", et la moyenne des teneurs foliaires en phosphore et en magnésium des 8 arbres "échantillon" entre 1993 et 1995 pour le pin sylvestre. Seuils de significativité: * 5 %, ** 1 %.	129
Figure 25: Meilleures régressions linéaires entre l'accroissement annuel moyen en diamètre (par mesure de circonférence, de 1993 à 1996) des 8 arbres "échantillons", et les nutriments foliaires (ou des rapports entre nutriments) de l'année précédente sur les mêmes arbres. *, **, significatif respectivement à 5 % et 1 %. L'absence de régression indique des R ² non significatifs ou des effectifs trop réduits.	131

18.2. Liste des tableaux

18.2.1. Dans le texte:

Tableau 1: Vocabulaire employé dans ce rapport relatif aux deux systèmes de référence des teneurs en nutriments foliaires: seuils ^{Eu} , et seuils indicatifs ^{Fr} .	4
Tableau 2: Nombre annuel de placettes échantillonnées à une période donnée. Cas des feuillus et du mélèze (51 placettes au total).	9
Tableau 3: Nombre annuel de placettes échantillonnées à une période donnée. Cas des résineux à feuilles persistantes (51 placettes au total).	9
Tableau 4: Changements d'arbres pour le prélèvement foliaire entre 1993 et 1997. Nombre d'arbres différents par rapport au prélèvement précédent et année du changement.	12
Tableau 5: Observations notées par les STIR lors des prélèvements foliaires.	17
Tableau 6: Résultats des tests de lavage des aiguilles de pin maritime par test "t" apparié sur les teneurs en nutriments foliaires. Les teneurs en macronutriments sont exprimées en mg/g, celles des micronutriments en µg/g. Les trois placettes de pin maritime (PM 17, PM 72, et PM 85) sont regroupées dans ces tests. Les tests unilatéraux montrant une différence significative à 5 % entre les échantillons lavés et non lavés sont indiqués en gras souligné. (Moy = moyennes, Var = variances, n = effectifs, t = "t" calculé de Student, et P(T ≤ t) = probabilité que la valeur théorique "T" soit ≤ à la valeur calculée "t").	20
Tableau 7: Résultats du test de lavage des aiguilles de pin maritime par test t apparié sur les teneurs foliaires en nutriments. Les tests portent séparément sur les trois placettes de pin maritime (PM 17, PM 72, et PM 85). Seules les différences significative au seuil de 5 % (tests unilatéraux) entre les échantillons lavés et non lavés sont indiqués par un S.	21
Tableau 8: Evolution des méthodes de minéralisation (extraction à l'eau pour le chlore) des échantillons foliaires du réseau RENECOFOR entre 1993 et 1998.	27
Tableau 9: Eléments foliaires certifiés (bonne cohérence interlaboratoire), non certifiés (simples valeurs indicatives), ou pour lesquels aucune valeur n'a été établie par le Bureau communautaire de référence dans le cas des échantillons de référence CRM 100 et CRM 101.	28
Tableau 10: Evolution des méthodes analytiques et des méthodes de transmission des données au serveur central entre 1993 et 1998 pour les échantillons foliaires du réseau RENECOFOR.	29
Tableau 11: Variabilité entre analyses des teneurs foliaires en nutriment des échantillons de référence du BCR (CRM 100: feuilles de hêtre, et CRM 101: aiguilles d'épicéa) : coefficients de variation moyens, minimum, maximum, et nombre (Nb) d'analyses pris en compte par année. ⁽¹⁾ éléments non certifiés par le BCR, ⁽²⁾ aucune valeur donnée par le BCR.	35
Tableau 12: Nombre d'analyses nécessaires pour les échantillons de référence CRM 100 et CRM 101 et pour chaque élément foliaire afin d'obtenir une précision (P = 1, 5, 10 ou 20 % sur la moyenne des teneurs au risque de première espèce (α) de 5, 10, ou 20 %. Le calcul des effectifs a été réalisé sur les analyses de 1998.	36
Tableau 13: Seuils de référence des teneurs foliaires en éléments nutritifs pour l'Europe (selon les résolutions prises lors du 3 ^e meeting du groupe d'experts sur les analyses foliaires, Stefan et al., 1997). La classe 1	

	correspond aux valeurs de teneur $\leq b_i$, la classe 2 aux valeurs comprises entre b_i et b_s et la classe 3 aux valeurs $> b_s$ (b_i = borne inférieure, b_s = borne supérieure).....	46
Tableau 14:	Pourcentage moyen, minimum et maximum de placettes RENECOFOR répartis entre les 3 classes de teneur foliaire en éléments nutritifs définies pour l'Europe (Seuils ^{Eu}). Les moyennes sont calculées sur 5 ans (1993 à 1997), les % minimums et maximums se rapportent à une seule année.....	47
Tableau 15:	Seuils indicatifs ^{Fr} des teneurs foliaires en éléments nutritifs utilisés pour le réseau RENECOFOR (adaptés d'après Bonneau, 1995 et van den Burg, 1985 et 1990). Le seuil de carence et le seuil critique sont des limites supérieures, la valeur de l'optimum une limite inférieure.....	50
Tableau 17:	Intervalle correspondant à des rapports équilibrés entre nutriments. Valeurs proposées pour l'Europe et par Stefan et Fürst (1998) pour l'Autriche (entre parenthèses).....	70
Tableau 18:	Exemple de calcul des coefficients de variation interannuelle (CVa) et interplacette (CVp) de la teneur en azote (en mg.g ⁻¹) des 6 peuplements de douglas du réseau et des coefficients moyens pour l'espèce.....	75
Tableau 19:	Résultats des analyses de variance à deux facteurs (effet "année": de 1993 à 1997 et effet "placette": de 6 à 20 placettes selon les essences) pour les essences du réseau RENECOFOR dont le nombre de placette est supérieur à 5. Les valeurs de F sont présentées ainsi que le pourcentage de variance expliqué r ² . Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.....	79
Tableau 20:	Pour chaque essence du réseau RENECOFOR, comparaison des effets "placette" et "année" pour les macronutriments, les micronutriments et certains rapports entre éléments à partir des valeurs "F" des analyses de variances présentées dans le Tableau 19	81
Tableau 21:	Classement des nutriments (rangs 1 à 13) par ordre d'effectif (n) croissant d'arbres nécessaire par placette pour atteindre une précision P = 5 % à un risque α = 5 % pour chaque essence du réseau RENECOFOR (cf. Tableau A 13, p.176).....	82
Tableau 22:	Ordre de grandeur de l'erreur relative sur la mesure de la masse foliaire ^{100f (1000a)} et des teneurs foliaires en nutriments à l'échelle de la placette obtenue avec un effectif de 8 arbres par placette, et un risque de première espèce α de 5 % (Voir également le Tableau A 13, p.176).....	84
Tableau 23:	Exemple de calcul des effectifs théoriques d'arbres pour chaque placette de chêne pour obtenir une précision donnée (P) sur les teneurs foliaires en nutriment à un risque de 1 ^{ère} espèce (α) fixé. Cet exemple concerne les teneurs foliaires en azote des 19 placettes de chêne sessile (8 arbres par placette) du réseau RENECOFOR.....	86
Tableau 24:	Récapitulatif des meilleures régressions par type de relation et par élément entre les éléments foliaires et les mêmes éléments dans le sol. Pour chacun des 4 types de relation, et pour chaque élément sont indiqués : le pourcentage de régressions significatives à au moins 10 % par rapport au nombre de régressions calculé, le meilleur R ² , l'essence correspondant au meilleur R ² , et la couche de sol correspondante.....	104
Tableau 25:	Récapitulatif par essence et par élément des régressions entre éléments foliaires et éléments dans le sol significatives à au moins 10 % pour au moins un niveau dans le sol.....	105
Tableau 26:	Placettes et arbres pour lesquels un accroissement négatif a été noté pour les périodes 93-94, 94-95, et 95-96 sur les arbres réellement échantillonnés pour les analyses foliaires.....	124
Tableau 27:	Placettes et arbres pour lesquels l'accroissement est supérieur à 3 * l'accroissement moyen des 52 arbres "objectifs" pour les périodes 93-94, 94-95, et 95-96 sur les arbres "échantillon" réellement échantillonnés pour les analyses foliaires.....	125
Tableau 28:	Relations significatives entre l'accroissement moyen en diamètre des 52 arbres "objectifs" entre 1993 et 1996, et les nutriments foliaires analysés dans les 8 arbres "échantillon" pour les essences du réseau RENECOFOR. Les ajustements linéaires sont tous du type accroissement = a + b * teneur ou rapport de nutriments foliaires. Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01.....	128

18.2.2. Dans les annexes

Tableau A 1 :	Synthèse des données d'analyse foliaire pour les 102 placettes du réseau RENECOFOR (1993-1997), (⊙: pas de carence, ? : pas de seuil indicatif, ⊗: carence).....	151
Tableau A 2:	Quantité de feuilles ou d'aiguilles à prélever par arbre selon les essences et le type d'analyse (individuelle ou moyenne).....	155
Tableau A 3:	Placettes où plus de la moitié des arbres a été échantillonnée dans la même direction. Exposition pour les placettes d'altitude seulement (> 500 m) et/ou avec une pente > 20 %.....	156
Tableau A 4:	Arbres échantillonnés plus de trois fois en cinq ans dans la même direction (54 arbres et 27 placettes).....	157
Tableau A 5:	Placettes où les écarts de date entre deux prélèvements foliaires annuels successifs sont supérieurs à 50 jours (soit un mois et demi).....	158
Tableau A 6:	Valeurs moyennes (Moy) et extrêmes (Min, Max) des masses foliaires ^{100f (1000a)} et des teneurs foliaires en macro et micronutriments des 102 peuplements RENECOFOR calculées par espèce et pour l'ensemble des 5 années de suivi (1993 à 1997). "Std" = écart type, "CV" = coefficient de variation, "Nb" = nombre de placettes x nombre d'années.....	159

Tableau A 7:	Teneurs foliaires en macronutriments et masse foliaire ^{100f (1000a)} pour les placettes du réseau RENECOFOR (le nombre de placettes par essence est indiqué dans la dernière colonne).....	161
Tableau A 8:	Teneurs foliaires en micronutriments des placettes du réseau RENECOFOR (le nombre de placettes par essence est indiqué dans la dernière colonne).....	164
Tableau A 9:	Répartition des placettes en fonction des seuils indicatifs ^{Fr} . Pourcentages moyens calculés sur 5 ans (1993 à 1997). Quant les seuils ne sont pas définis, les valeurs entre tirets sont déduites des autres pourcentages sur la même ligne.	167
Tableau A 10:	Coefficients de corrélation entre la masse foliaire ^{100f (1000a)} et les teneurs foliaires en nutriments. R_{th} correspond à la valeur critique du coefficient de corrélation pour un risque de 1 ^{ère} espèce de 5 % et n-2 degrés de liberté (ddl), n étant le nombre de placettes par espèce. Les corrélations significatives sont marquées d'un *.....	169
Tableau A 11:	Valeurs moyennes et extrêmes des rapports entre nutriments des 102 peuplements RENECOFOR calculées par espèce et pour l'ensemble des 5 années de suivi (1993 à 1997). "Nb" = nombre de placettes x nombre d'années.....	172
Tableau A 12:	Variabilité entre placettes et entre années des minéralomasses ^{100f (1000a)} : coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) de placettes et d'années pris en compte pour calculer chaque CV moyen.....	174
Tableau A 13:	Variabilité entre placettes et entre années des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)} : coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) de placettes et d'années prises en compte pour calculer chaque CV moyen.....	176
Tableau A 14:	Variabilité entre arbres de la minéralomasse ^{100f (1000a)} foliaire: coefficients de variation moyens de toutes les placettes, minimum et maximum et nombre (Nb) d'arbres par placette pris en compte pour calculer chaque CV moyen.	178
Tableau A 15:	Variabilité entre arbres des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)} : coefficients de variation moyens, minimum et maximum et nombre (Nb) d'arbres pris en compte par placette pour calculer chaque CV moyen.	180
Tableau A 16:	Nombre d'arbres nécessaire par placette pour chaque essence et chaque élément foliaire pour obtenir une précision (P) de la moyenne des teneurs sur la placette de 5, 10 ou 20 % au risque de première espèce (α) de 5, 10, ou 20 %	183
Tableau A 17:	Corrélations linéaires entre les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs des mêmes éléments dans les horizons LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, et 20-40 cm. Les ajustements linéaires sont tous du type [] foliaire = a x [] sol + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.	187
Tableau A 18:	Corrélations entre les minéralomasses ^{100f (1000a)} moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs des mêmes éléments dans les horizons LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, et 20-40 cm. Les ajustements linéaires sont tous du type minéralomasses ^{100f (1000a)} = a x [] sol + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.....	189
Tableau A 19:	Corrélations entre les minéralomasses ^{100f (1000a)} moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol. Les ajustements linéaires sont tous du type minéralomasses ^{100f (1000a)} = a x (stocks dans le sol) + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.	190
Tableau A 20:	Corrélations entre les teneurs moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol. Les ajustements linéaires sont tous du type teneurs foliaires = a x (stocks dans le sol) + b. Seules les corrélations significatives au moins au seuil de 10 % sont indiquées. Seuils de signification: (*) p < 0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. Dans le cas de Ca, Mg, et K les pentes (a) sont x par 100.	192
Tableau A 21:	Corrélations entre les teneurs foliaires moyennes de 1993 à 1997 en azote, calcium, magnésium, potassium, et les teneurs ou les stocks des mêmes éléments calculés dans différentes tranches de sol (résineux et feuillus). Les ajustements linéaires sont tous du type teneur foliaire = a x (conc. ou stocks dans le sol) + b. Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. L'absence de dosages du Ca, du Mg, et du K dans le sol est indiqué par un "/". Les pentes (a) sont x par 100 pour les stocks en Ca, Mg, et K dans le sol.....	194
Tableau A 22:	Valeurs moyennes des accroissements annuels en diamètre des 52 arbres "objectifs" avant ($\Delta\emptyset_{initial}$) et après correction ($\Delta\emptyset_{corrigé}$) quand l'accroissement est (1) <-2,2 mm ou (2) > 3 x $\Delta\emptyset$	195
Tableau A 23:	Corrélations entre les accroissements annuels moyens en diamètre de 1993 à 1996 des 8 arbres "échantillon" déduits des mesures de circonférence, et les teneurs foliaires en nutriments foliaires (6 macro, et 7 micronutriments et 9 rapports entre éléments) des mêmes arbres. Les ajustements linéaires	

sont tous du type " accroissement = a + b × teneur ou rapport de nutriment foliaire". Seuils de signification: * p < 0,05; ** p < 0,01. 196

Tableau A 24: Valeurs repères pour l'appréciation de la fertilité du sol en K, Ca, Mg échangeables (d'après Bonneau, 1995).....	209
--	-----

18.3. Liste des cartes

Carte 1: Localisation et type des 102 placettes permanentes du réseau RENECOFOR.....	7
Carte 2: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en azote des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	53
Carte 3: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en phosphore des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	54
Carte 4: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en magnésium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	55
Carte 5: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en potassium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	56
Carte 6: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en calcium des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	57
Carte 7: Situation des teneurs foliaires moyennes (1993-1997) en soufre des 102 placettes RENECOFOR par rapport aux seuils indicatifs ^{Fr} (cf. Tableau 15 , p.50).....	58
Carte 8: Variabilité intraplacette en 1997 des teneurs foliaires de 3 nutriments (N, Al, Na) représentatifs de l'ensemble des éléments dosés: l'azote (comparable au P, S, K, Mg, Zn, Ca), l'aluminium (comparable au Fe, Cl, Mn), et le sodium (comparable au Cu) pour l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR.	73

19. List of figures, tables and maps

19.1. List of figures

Figure 1: Differences expressed in days between two successive dates of foliar sampling for the coniferous plots, larch excepted (in black, n = 51) and the broad-leaved plots and the larch plot (in white, n = 51).	10
Figure 2: Diagram of a typical RENECOFOR plot. Only the "observation" trees (inside enclosure, for sanitary observations, n = 36) and "sample" trees (outside enclosure, for foliar sampling, n = 16) are represented in this diagram. They make up the "objective" trees (n = 52) of the plots.	11
Figure 3: Annual percentage of plots on which the foliar sampling was done in every cardinal direction (in black) and where more than half of the trees were sampled in the same direction (in white) (n=102 plots/year).	14
Figure 4: Number of plots per year for which the Regional Technical Centers (STIR) transmitted observations made during foliar sampling (black bar : observation on tree vigour ; white bar : on crown condition ; horizontally striped bar : on leaf condition; dotted bar : on leaf/needle age). See also Table 5.....	17
Figure 5: Quality assurance control between 1993 and 1998 for macronutrients. In black: reference sample CRM 100 (beech leaves), in white: reference sample CRM 101 (spruce needles). Averages, standard deviation, coefficient of variation (CV), and number (n) for each year. Horizontal lines are certified values for the two references (there are no certified values for K in spruce needles).	32
Figure 6: Quality assurance control between 1993 and 1998 for micronutrients. In black: reference sample CRM 100 (beech leaves), in white: reference sample CRM 101 (spruce needles). Averages, standard deviation, coefficient of variation (CV), and number (n) for each year. Horizontal lines are certified values for the two references (there are no certified values for Na, Fe, Mn, Cu, and Zn, cf. Table 9).....	34
Figure 7: Average values and standard deviations in the dry weight of 100 leaves or 1000 needles for each species in the RENECOFOR network.....	40
Figure 8: Average values (1993-1997) and standard deviations in the macro-nutrient (a) and micro-nutrient (b) foliar concentrations for each species in the RENECOFOR network.	41
Figure 9: Average foliar concentrations for sodium (on left) and chlorine (on right) per plot according to their longitude (n=102). The white symbols are for the southern plots (latitude < 44°51') and the black symbols for the more northern ones.....	43
Figure 10: For each species, percentage of plots where the average foliar concentrations are below the optimum concentration (white), the critical threshold (grey), and the deficiency threshold (black) for Fe, Mn, Cu and Zn only (For comparison with French thresholds see Table 15, p.50). No bars means that no threshold value was defined, "0 %" means that none of the concentrations are below the given threshold value.	59

Figure 11: Foliar nitrogen concentration (mg.g ⁻¹) and dry weight of 100 leaves (g) for the 20 beech plots in the RENECOFOR network. Averages for 5 years of monitoring. ("Ac" = plots are located on acidic soils Montagne = Mountain ; Plaine = Plain).....	66
Figure 12: Dry weight of 100 leaves as a function of the average age (in 1994) of dominant and co-dominant trees for the 9 pedunculate oak plots in the RENECOFOR network.	68
Figure 13: Comparison of the intra-plot (black), inter-plot (striped), inter-annual (white) and analytical (grey) coefficient of variation (the later for the two European reference samples BCR 100 and BCR 101) of the foliar nutrient concentration for each tree species and element.	88
Figure 14: Best linear regressions between the foliar nutrient concentrations (averages for 1993-1997) and soil element concentration (1993-1995 analysis) for conifers and broad-leaved trees.	96
Figure 15: Logarithmic regressions between the Ca concentration in the leaves (averages for 1993-1997), and the exchangeable Ca concentration in 3 soil depths (1993-1995 analysis) for the 20 plots of beech in the RENECOFOR network.	98
Figure 16: Best linear regressions between the foliar nutrient concentrations (averages 1993-1997) and soil pools of exchangeable ions (1993-1995 analysis) for coniferous and broad-leaved trees.	99
Figure 17: Logarithmic regressions between the Ca contained in 100 leaves (averages 1993-1997) , and the exchangeable Ca in 3 soil depths (1993-1995 analysis) for the 20 beech plots in the RENECOFOR network.	101
Figure 18: Best linear regressions between the foliar nutrients (means 1993-1997) and exchangeable ion in the soil pools (1993-1995 analysis) for N, K, Ca and Mg. French thresholds for foliar nutrients are also reported. (Deficiency, critical and optimum thresholds).	106
Figure 19: Changes in the percentage of mean defoliation between 1994 and 1997 in the RENECOFOR plots.....	115
Figure 20: Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients the same year. Significance: * P<5 %, ** P<1 %, and *** P< 0,1 %.....	117
Figure 21: Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients analysed the previous year (n-1). Significance: * P<5 %, ** P<1 %, and *** P< 0,1 %.....	118
Figure 22: Significant correlations between the percentage of defoliation (year n), and the foliar nutrients analysed the previous year (n-1) for nutrients not significant the given year (n). Significance: * P<5 %, ** P<1 %, and *** P< 0,1 %.....	119
Figure 23: Best linear regressions between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 52 "objective" trees, and the mean foliar nutrient concentrations (or ratios) for the 8 "sample" trees between 1993 and 1995. Significance: * 5 %, ** 1 % (no regression indicates that R ² was not significant or the number of plots are too low).....	127
Figure 24: Relation between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 52 "objective" trees, and the mean foliar P and Mg concentration for the 8 "sample" trees between 1993 and 1995 for Scots pine. Significance: * 5 %, ** 1 %.....	129
Figure 25: Best linear regressions between mean annual diameter increment (1993-1996) for the 8 "sample" trees, and the foliar nutrients (or ratios) for the previous year on the same trees. Significance: * 5 %, ** 1 % (no regression indicates that R ² was not significant or the number of plots was too low).....	131

19.2. List of tables

19.2.1. In the texte:

Table 1: Vocabulary used in this report related to the two reference classifications for threshold values for foliar nutrition:European thresholds, and French thresholds.....	4
Table 2: Total number of plots sampled per year showing plots sample during (col.1) before (col 2) and after (col 3) normal sampling periods. Broad-leaved and larch plots only (total number of plots = 51).....	9
Table 3: Total number of plots sampled per year showing plots sample during (col.1) before (col 2) and after (col 3 and 4) normal sampling periods. Coniferous plots only, larch excepted (total number of plots = 51).	9
Table 4 : Plots where "sample" trees were changed between 1993 and 1997. Number of "sample" trees which were replaced The year the change took place (Total number of "sample" trees = 8).....	12
Table 5 : Observations made by the Regional Technical Sections (STIR) during foliar sampling.....	17
Table 6 : Results of washing tests on nutrient concentrations in needles for three plots of <i>Pinus pinaster</i> in 1996 and 1997 (paired unilateral "t" tests). For Macronutrients, concentrations are in mg/g and for micronutrients, in µg/g. Only significant differences between washed and un-washed samples are marked (<u>Bold underscored</u>). (Moy = average, Var = Std dev, t = calculated "t" Student).	20

Table 7: Results of washing tests nutrient concentrations in needles for three plots of <i>Pinus pinaster</i> (PM 17, PM 72, and PM 85) in 1996 and 1997 (paired unilateral "t" test). Only significant differences between washed and un-washed samples are marked (S).	21
Table 8 : Change in mineralization methods from 1993 to 1998 for foliar sampling in the RENECOFOR network.	27
Table 9 : Foliar nutrients which are certified (satisfactory inter-laboratory consistency), un-certified (only indicative values), or with no value given by the Community Bureau of Reference (CBR) for reference samples CRM 100 and CRM 101	28
Table 10: Change in analytical methods and data transmission to the central computer between 1993 and 1998 for the foliar samples from the RENECOFOR network.....	29
Table 11: Inter-analysis variation coefficients of foliar nutrient concentrations in CBR reference samples (CRM 100: beech leaves, and CRM 101: spruce needles): average, minimum and maximum variation coefficients and number (Nb) of analyse which were made each year. ⁽¹⁾ elements not certified by the CBR, ⁽²⁾ no value given by the CBR.	35
Table 12: Number of analyse required for each nutrient in the reference samples (CRM 100 and CRM 101) to achieve a given accuracy (P = 1, 5, 10 or 20 %) on concentration averages with a risk α of 5, 10 or 20 %. Calculations were done using 1998 data.	36
Table 13: European classification of the threshold values for foliar nutrition (=European thresholds) according to the 3 rd meeting of the foliar experts' panel (Stefan et al., 1997). Class 1 values are concentrations at $\leq b_i$, class 2 lies between b_i and b_f and class 3 values are $> b_s$ (b_i = lower limit, b_s = upper limit).	46
Table 14: Average, minimum and maximum percentage of RENECOFOR plots situated within the 3 foliar nutrient concentration classes established for European stands (European thresholds). The average is based on five years of foliar analysis (1993 to 1997), minimum and maximum % refer to only one year.	47
Table 15: French thresholds for foliar nutrients used in order to assess RENECOFOR data (adapted from Bonneau, 1995, and van den Burg, 1985 and 1990). The values shown for deficiency ("carence") and critical thresholds are at upper limits of range, whereas the optimum level value is at lower limit of range of concentration.	50
Table 16: Plots showing nutrient concentrations under the critical threshold (normal type face) or the deficiency threshold (bold) at least three times in five years (The numbers indicate the Departments in which the plot is situated). A hyphen means that no threshold levels were defined for that nutrient (see also Table 15, p.50). .	61
Table 17: Ranges for balanced nutrient ratios proposed by the European Commission and by Stefan and Fürst (1998) for Austria (in brackets).....	70
Table 18: Estimation of the inter-annual (C _{va}) and inter-plot (C _{Vp}) coefficients of variation of the foliar nitrogen concentration for the 6 Douglas-fir plots in the RENECOFOR network and estimation of the average coefficients of variation.	75
Table 19: Results of two-way analysis of variance (year: 1993 to 1997 and plot: n=6 to 20) for the species of the RENECOFOR network (at least 5 plots for each specie). Significativity: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.....	79
Table 20: For each species in the RENECOFOR network, comparison of the plot and the year- effects for the macro-, the micronutrients and some ratios between nutrients, (see also Table 19).	81
Table 21: Ascending order of the nutriments (rankes 1 to 13) by number of trees per plot (n) required to achieve an accuracy of 5 % at a risk α = 5 % for each species in the RENECOFOR network	82
Table 22: Relative error (at a risk α = 5 %) induced by sampling 8 trees per plot. Indications are given by species and nutrient concentration or dry weight per 100 leaves or 1000 needles (See also Table A13, p.175).	84
Table 23: Example of calculation for the theoretical number of trees per plot to achieve a given accuracy (P) at a risk (α). This example is given for foliar nitrogen concentrations in the 19 sessile oak plots (8 trees per plot) in the RENECOFOR network.	86
Table 24 : Global results of the regression analysis between foliar nutrient concentrations or mineral mass for 100 leaves or 1000 needles and exchangeable ion concentrations or soil pools. Are indicated: the % of significant linear regressions at 10 % by element and type; the best R ² , the corresponding tree species to the best R ² , and the corresponding soil depth.	104
Table 25: Summary of the regressions between foliar nutrients and corresponding elements in the soil for each species and each element. A cross indicates that for at least one depth in the soil, a regression significant to at least at 10 %.	105
Table 26: Plots and trees with a negative annual diameter increment in 93-94, 94-95 and 95-96 (for the same 8 "sample" trees used for foliar nutrient analysis)	124
Table 27: Plots and trees with an annual diameter increment > 3 times the mean increment of the 52 "objective" trees in 93-94, 94-95 and 95-96 (for the same 8 "sample" trees used for foliar nutrient analysis)	125
Table 28: Significant correlations between mean annual diameter increment from 1993 to 1996 (from girth measurement) of the 52 "objective" trees, foliar nutrients (6 macro and 7 micronutrients) and 9 ratios between nutrients for the 8 "sample" trees. Linear regressions are expressed as diameter increment = a + b \times leaf nutrient concentration or ratio. Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01.	128

19.2.2. *In the annexes:*

Table A 1:	Summary of the foliar analysis data in the 102 plots of the RENECOFOR network (1993 -1997) (©: no deficiency, ? : no indicative threshold, ⊗: deficiency).....	150
Table A 2:	Number of leaves or needles to be sampled per tree by species and depending on the intensity to the level of analysis (plot analysis or individual analysis every five years).....	155
Table A 3:	Plots where more than half of the trees were sampled in the same direction. The exposure is only given for the plots situated above >500 m altitude or for plots located on slopes of > 20 %.....	156
Table A 4:	Trees which were sampled more than three times in five years in the same cardinal direction (54 trees and 27 plots).....	157
Table A 5:	Plots with a difference in date of more than 50 days between two successive annual foliar samplings....	158
Table A 6:	Average (Moy) and extreme values (Min, Max) of the dry weight per 100 leaves or 1000 needles and the macro and micronutrient foliar concentrations for the 102 RENECOFOR plots, given per species and for the five years of monitoring (1993 to 1997)."Std" = standard deviation, "CV" = coefficient of variation, "Nb" = number of plots x number of years.....	159
Table A 7:	Foliar macronutrient concentrations and dry weight (per 100 leaves or 1000 needles) per species and per year for the RENECOFOR plots (the number of plots per species is given in the last column).	161
Table A 8:	Foliar micronutrient concentrations per species and per year for the RENECOFOR plots (the number of plots per species is given in the last column).	164
Table A 9:	Percentage of plots in the RENECOFOR network classified according to the French thresholds for foliar nutrients based on five years of foliar analysis (1993 to 1997). If thresholds are not defined, values between dotted lines are deduced from the other percentages on the same line.	167
Table A 10:	Correlation coefficients for the relationships between the dry weight per 100 leaves or 1000 needles and the foliar concentration of the 13 analysed nutrients. R_{th} is the critical value of the correlation coefficient at a first level risk of 5 % and a $n-2$ degree of freedom (ddl), with n being the number of plots by species. The significant correlations are indicated by *.	169
Table A 11:	Average and extreme values of foliar nutrient ratios for the 102 RENECOFOR plots, given per species and for the five years of monitoring (1993 to 1997). "Nb" = number of plots x number of years.	172
Table A 12:	Inter-plot and inter-annual variation in the dry weight of nutrients per 100 leaves or 1000 needles : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of plots and years which have been taken into account to calculate each average CV.	174
Table A 13:	Inter-plot and inter-annual variation of foliar nutrient concentrations and dry weight per 100 leaves or 1000 needles per species : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of plots and years which have been taken into account to calculate each average CV.....	176
Table A 14:	Intra-plot variation in the foliar mineral mass per 100 leaves or 1000 needles : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of trees per plot taken into account to calculate each average CV.	178
Table A 15:	Intra-plot variation of foliar nutrient concentrations and dry weight per 100 leaves or 1000 needles per species : average, minimum and maximum coefficients of variation and number (Nb) of trees per plot taken into account to calculate each average CV.....	180
Table A 16:	Number of trees required per plot, for each species and nutrient to achieve a given accuracy ($P = 5, 10$ or 20%) for concentration averages with a risk α of $5, 10$ or 20%	183
Table A 17:	Correlations between mean foliar nutrient concentrations from 1993 to 1997 (N, Ca, Mg, and K) and soil concentrations of the same elements in the LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-40 cm layers. Linear regressions are expressed as $leaf [] = a \times soil [] + b$. Only correlations significant at least 10% are presented. Significance: (*) $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$	187
Table A 18:	Correlations between mean (1993-1997) foliar mineral mass per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil concentrations of the same elements in the LFH, 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-40 cm layers. Linear regressions are expressed as $foliar\ mineral\ mass = a \times soil [] + b$. Only correlations significant to at least 10% are presented. Significance: (*) $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$	189
Table A 19:	Correlations between mean foliar mineral mass (from 1993 to 1997) per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil pools of the same elements in different soil layers. Linear regressions are expressed as $foliar\ mineral\ mass = a \times (soil\ nutrient\ pools) + b$. Only correlations significant to at least 10% are presented. Significance: (*) $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$	190
Table A 20:	Correlations between mean foliar nutrient mass (from 1993 to 1997) per 100 leaves or 1000 needles for N, Ca, Mg, and K and soil pools of the same elements in different soil layers. Linear regressions are expressed as $foliar\ nutrient\ concentration = a \times (soil\ nutrient\ pools) + b$. Only correlations significant to at least 10% are presented. Significance: (*) $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. For Ca, Mg, and K, slopes (a) are multiplied by 100.	192

Table A 21:	Correlations between mean foliar nutrient concentration (from 1993 to 1997)(N, Ca, Mg, and K) and soil concentrations or pools of the same elements in different soil layers (Coniferous and broad-leaved trees). Linear regressions are expressed as leaf nutrient concentration = a × (soil exchangeable ion conc. or pools) + b. Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001. No Ca, Mg, and K analyse in the soil are indicated by a slash. The slopes (a) are multiplied by 100 for the pools of Ca, Mg, and K in the soil.	194
Table A 22:	Mean annual diameter increment for the 52 "objective" trees before ($\Delta\varnothing_{\text{initial}}$) and after correction ($\Delta\varnothing_{\text{corrigé}}$) for increment (1) <-2,2 mm or (2) > 3 × $\Delta\varnothing$	195
Table A 23:	Correlations between mean annual diameter increment from 1993 to 1996 (from girth measurement) for the 8 "sample" trees, and foliar nutrients (6 macro and 7 micronutrients) and 9 ratios between nutrients. Linear regressions are expressed as "diameter increment = a + b × leaf nutrient concentrations or ratios". Significance: * p < 0,05; ** p < 0,01.....	196
Table A 24 :	Indicative values to evaluate soil fertility for exchangeable K, Ca, Mg (from Bonneau, 1995)	209

19.3. List of maps

Map 1:	Localisation and level of investigation for the 102 plots in the RENECOFOR network.....	7
Map 2:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for N for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	53
Map 3:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for P for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	54
Map 4:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for Mg for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	55
Map 5:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for K for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	56
Map 6:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for Ca for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	57
Map 7:	Comparison of foliar concentrations and French thresholds (cf. table 15, p.50) for S for the 102 stands in the RENECOFOR network. Nutrient averages are calculated for the period 1993-1997.	58
Map 8:	Intra-stand variability in 1997 for 3 nutrients (N, Al, Na) representative of all analysed elements. N is similar to P, S, K, Mg, Zn, Ca, Al is similar to Fe, Cl, Mn, and Na is similar to Cu.....	73

20. Fiches synthétiques par placette

20.1. Guide de lecture des fiches

Chaque fiche, représentée par une double page correspond à une placette. Elles sont présentées par ordre alphabétique en fonction du code des essences, et pour chaque essence par ordre croissant du numéro de département. Ces fiches représentent une première synthèse des données d'analyse foliaire résultant des prélèvements réalisés sur la moitié des arbres "échantillon" (n = 8 par placette) pour l'ensemble des 102 placettes du réseau RENECOFOR entre 1993 et 1997.

Elles sont organisées en 4 parties:

- la première regroupe les **informations générales** sur la placette: localisation, données dendrométriques, nature du sol, écologie et état sanitaire.
- la deuxième présente l'**évolution interannuelle** des teneurs et des minéralomasses^{100f} ^(1000a) foliaires pour les 6 macroéléments et les 7 microéléments analysés ainsi que les 9 rapports principaux entre éléments.
- la troisième donne la **comparaison des teneurs foliaires en nutriments** avec les **seuils^{Eu}** et les **seuils indicatifs^{Fr}**, quand ils existent.
- la quatrième est une zone de **commentaires** qui donne les caractères marquants de chaque placette (teneurs extrêmes en éléments, conditions stationnelles particulières pouvant avoir un impact sur les analyses foliaires, problèmes méthodologiques ou sanitaires).

20.1.1. Informations générales

Le nom de la forêt, la parcelle (P. ..), la commune, le département et les coordonnées (latitude et longitude en ° ' ") de chaque placette sont indiqués en début de fiche. Le département dans lequel se trouve la placette est représenté en noir sur une carte de France. Le niveau d'étude est également indiqué: niveau 1 (suivi de base sur les 102 placettes), niveau 2 (en plus du suivi de base, mesure des dépôts atmosphériques sur 27 des 102 placettes) et niveau 3 (en plus des mesures de niveau 2, analyse des solutions du sol sur 17 des 27 placettes de niveau 2).

Les informations concernant la topographie sont indiquées dans trois graphiques pour l'altitude, la pente, et l'exposition de la placette.

Des informations sur les peuplements forestiers sont mentionnées: structure du peuplement (taillis sous futaie, régulière), origine (régénération naturelle, plants, semis ...), âge à 1,30 m en 1994, Ho en 1995 en m (moyenne des hauteurs des 36 arbres "observation" pour la deuxième campagne de mesure, considéré comme équivalente à la hauteur dominante du peuplement en 1995), dG/dt en m²/ha/an sur la période 1991-1995 (productivité de l'essence principale, correspond à l'accroissement annuel de surface terrière).

La végétation correspond en fait au rattachement phytosociologique tel qu'il est indiqué dans Dobremez et al. (1997). Le type d'humus et le type de sol (la nomenclature utilisée est celles de Duchaufour, pour connaître les équivalents selon la classification du référentiel pédologique et de la FAO, voir Brêthes et Ulrich, 1997).

L'histogramme intitulé "Etat sanitaire" montre finalement le pourcentage de défoliation évalué pour l'essence principale de la placette. Il concerne les 8 arbres "échantillon" réellement utilisés pour les analyses foliaires, et les 36 arbres "observation".

20.1.2. Evolutions interannuelles

Le suivi entre 1993 et 1997 des teneurs foliaires, des minéralomasses^{100f (1000a)} des 6 macronutriments (N, P, S, K, Ca, Mg) et des 7 micronutriments (Na, Cl, Al, Fe, Mn, Cu, Zn) et de la masse^{100f (1000a)} sont indiqués dans les 8 graphiques suivants. Noter les changements d'échelle pour certains nutriments. Ces valeurs correspondent aux analyses réalisées sur un échantillon composé par placette sauf en 1997, année pour laquelle une analyse individuelle par arbre a été réalisée avant de calculer la moyenne par élément pour la placette. Un tableau regroupe les coefficients de variation intraplacette et interannuel pour les 13 nutriments analysés. L'évolution au cours du temps de 9 rapports entre nutriments (N/P, N/Mg, N/K, N/Ca, Ca/Mg, K/Mg, K/Ca, S/N, Fe/Mn) est ensuite présentée dans les trois graphiques suivants.

20.1.3. Comparaison aux seuils

Une première partie permet de situer les teneurs foliaires moyennes entre 1993 et 1997 par rapport à deux systèmes de comparaison: les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr} (cf. Tableau 1, p.4). Les seuils^{Eu} définissent trois niveaux de teneurs (faible: classe I, moyenne: classe II, élevée: classe III) par rapport à deux seuils: une borne inférieure et une borne supérieure. Ces valeurs ont été proposées à partir d'analyses réalisées dans 16 pays européens et permettent uniquement de situer de nouvelles analyses par rapport à ces valeurs sans en déduire de renseignement sur l'état sanitaire de l'arbre ni sur sa vigueur. Les comparaisons avec les seuils indicatifs^{Fr} permettent de positionner les teneurs en nutriments par rapport à trois seuils (carence, critique et optimal) dans quatre zones (< carence, entre carence et critique, entre critique et optimal et > optimal). Pour certains éléments et certaines essences, les seuils n'ont pas été proposés. Dans ce cas, les éléments concernés (par exemple S et Ca pour CHP 10) sont placés sur une deuxième ligne sous le seuil non défini (le seuil optimal dans cet exemple).

Une deuxième partie indique les valeurs des seuils retenus dans ce rapport pour situer les teneurs analysées dans chaque placette. L'attention du lecteur est encore une fois attirée sur le caractère indicatif de ces seuils qui représentent une base de travail, mais ne doivent en aucun cas être considérés comme des valeurs arrêtées, valables pour une essence donnée quel que soit l'âge des arbres, les caractéristiques stationnelles (altitude, exposition).

20.1.4. Commentaires

Cette zone de commentaire est conçue à la fois comme une sorte de synthèse de l'état nutritionnel actuel de chaque placette (carence ou excès de certains éléments, ou déséquilibre entre éléments) suivie d'une confrontation avec l'alimentation minérale dans le sol, l'accroissement en surface terrière de l'essence principale, le pourcentage de défoliation et comme une rubrique permettant de souligner les caractères particuliers de ces 102 placettes.

L'appréciation de l'alimentation minérale dans le sol se fonde d'une part sur les teneurs dans les couches minérales de sol jusqu'à 40 cm mesurées pour chaque placette du réseau (Ponette et al., 1997) et d'autre part sur les "valeurs repères pour l'appréciation de la fertilité du sol" d'après Bonneau, 1995 (Tableau A 24, p.209). Seules les valeurs se rapportant aux horizons minéraux du sol ont été utilisées pour l'appréciation de la fertilité des placettes et la confrontation avec des carences (ou des excès) de nutriments dans les feuilles. Deux raisons principales à ce choix: (1) les analyses dans les couches minérales sont disponibles pour la quasi totalité des placettes alors que les analyses dans l'humus correspondent parfois aux horizons LFH et parfois à l'horizon H seul et (2)

les éléments analysés dans l'humus correspondent le plus souvent aux éléments totaux et pas aux éléments échangeables. Pour le phosphore et l'azote les distributions des effectifs de placettes suivant les classes de teneur dans les couches minérales de sol ont permis d'apprécier la fertilité du sol. Ces confrontations entre une appréciation de la fertilité des couches minérales du sol et les teneurs foliaires en nutriments est purement exploratoire et nécessitera en particulier un important travail de recherche pour mieux définir des seuils de fertilité des sols (cf. Ponette et al., 1997). D'autre part, "il faut rappeler que la fertilité chimique n'est qu'une composante de la fertilité globale qui dépend aussi de la réserve potentielle du sol en eau, de sa texture et de sa structure, de sa capacité à être prospecté par les racines des plantes, de la présence d'animaux et de microorganismes" (Bonneau, 1995).

Tableau A 24: Valeurs repères pour l'appréciation de la fertilité du sol en K, Ca, Mg échangeables (d'après Bonneau, 1995).

Table A 24 : Indicative values to evaluate soil fertility for exchangeable K, Ca, Mg (from Bonneau, 1995)

Horizons minéraux	Cations échangeables ⁽¹⁾ (cmolc/kg)		
	Potassium	Magnésium	Calcium
pauvres	< 0,12	< 0,15	< 0,3
moyens	0,12 à 0,20	0,15 à 0,25	0,3 à 1
bien pourvus	> 0,20	> 0,25	> 1

⁽¹⁾ Extraction à l'acétate d'ammonium tamponné à pH 7.

Les tendances au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments sont également mentionnées quand elles sont continues (dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution) pour la période considérée. Les accroissements en surface terrière de l'essence principale de la placette sont mentionnés en regard des manques en nutriments dans les feuilles ou les aiguilles.

Ces caractères particuliers des placettes peuvent être liés à des conditions stationnelles (type de sol, proximité du littoral, proximité d'industries polluantes...), à des problèmes méthodologiques (accessibilité des houppiers, prélèvements en dehors des périodes préconisées, remplacements des arbres prélevés...), ou à des problèmes sanitaires (défoliation et jaunissement).

20.2. Fiches individuelles (par placette)

Les 102 fiches individuelles sont présentées dans les pages suivantes.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Larivour (P. 5)

Commune de Rouilly-Sacey (Aube)

Latitude: 48°20'51" N

Longitude: 4°18'17" E

Structure du peuplement : Taillis sous futaie vieilli

Origine : Régénération naturelle

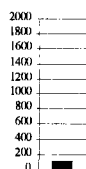
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 134 ± 19

Ho en 1995 (m) : 25,5 ± 1,7

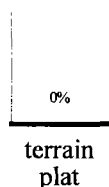
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0,57



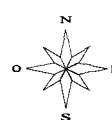
Altitude



Pente

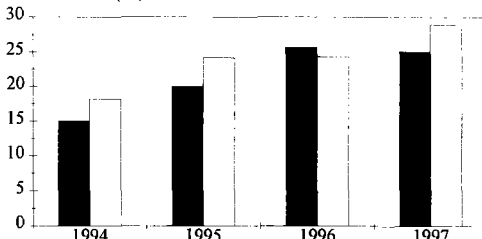


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

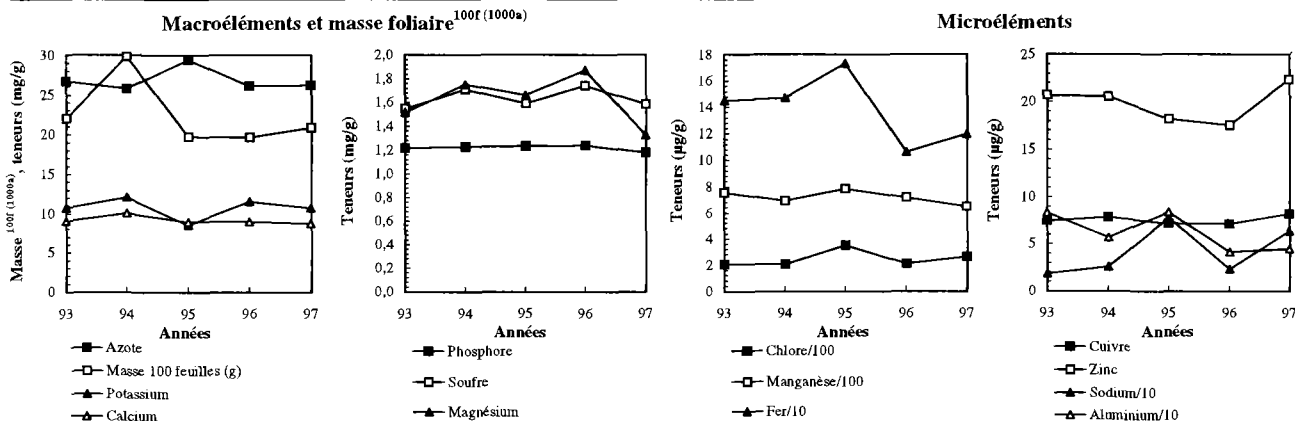


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinienion betuli*

Humus : Oligomull - Mésomull

Type de sol : Sol brun calcaïque hydromorphe

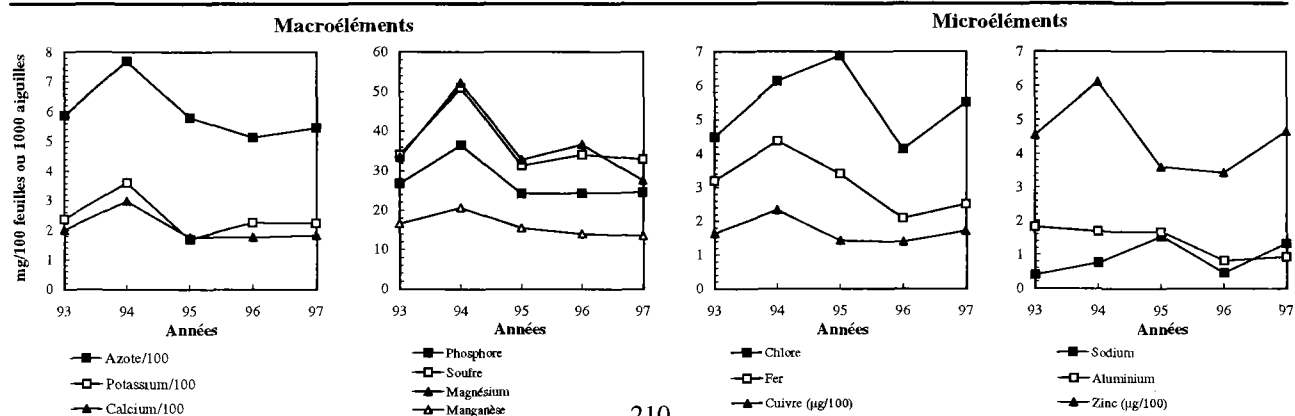
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



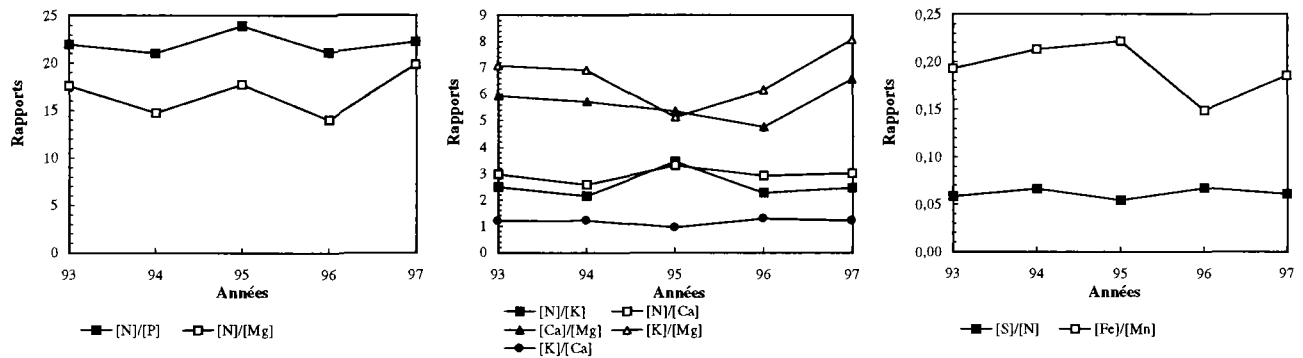
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments					Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	11	8	13	20	37	24	35	31	51	37	38	20
Interannuel 93-97 (n=5)	5	2	5	11	5	12	17	7	5	9	58	23	30

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg		N, Ca, K		P	N, K, Mg S, Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant. La seule particularité à signaler est un rapport N/P un peu élevé (> 20) résultant de teneurs foliaires en P faibles par rapport à des teneurs en N optimales. L'alimentation minérale dans le sol est globalement satisfaisante ainsi que l'accroissement en surface terrière des chênes entre 1991 et 1995 (0,57 m²/ha/an). Le pourcentage de défoliation atteint 27 % en 1997, après une progression régulière depuis 1994. Cela pourrait résulter des notations plus sévères des défoliations à partir de 1996.

A noter que cette placette est la plus âgée des placettes de chêne pédonculé du réseau (environ 134 ans à 1,30 m en 1994) ce qui pourrait justifier une adaptation des seuils indicatifs.

L'évolution des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 ne montre pas de tendance continue avec des coefficients de variation compris entre 2 et 12 % pour les macroéléments, et entre 5 et 58 % pour les micronutriments.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Verneuil (P. 7)

Commune de Verneuil (Cher)

Latitude: 46°49'33" N

Longitude: 2°34'27" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

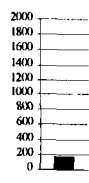
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 58 ± 10

Ho en 1995 (m) : 17,7 ± 1,4

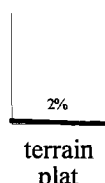
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.62



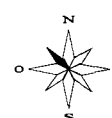
Altitude



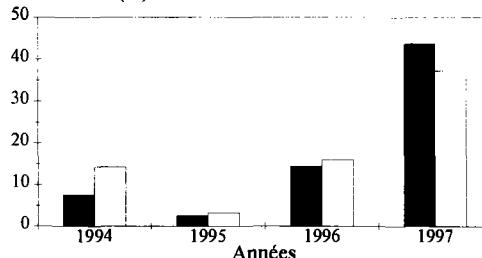
Pente



Exposition



Défoliation (%)



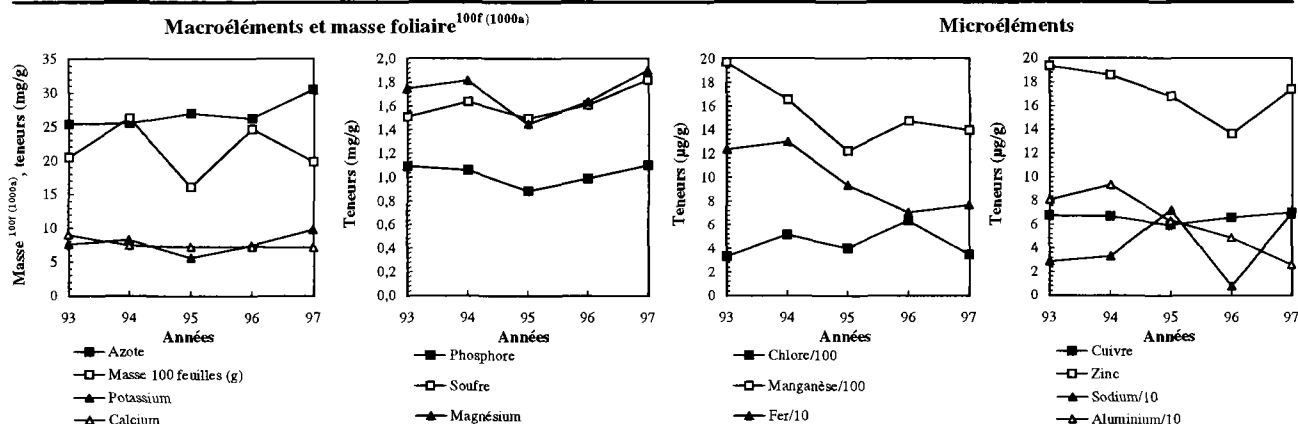
Etat sanitaire

Végétation : *Alno-Padion*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Pélosol-Pseudogley

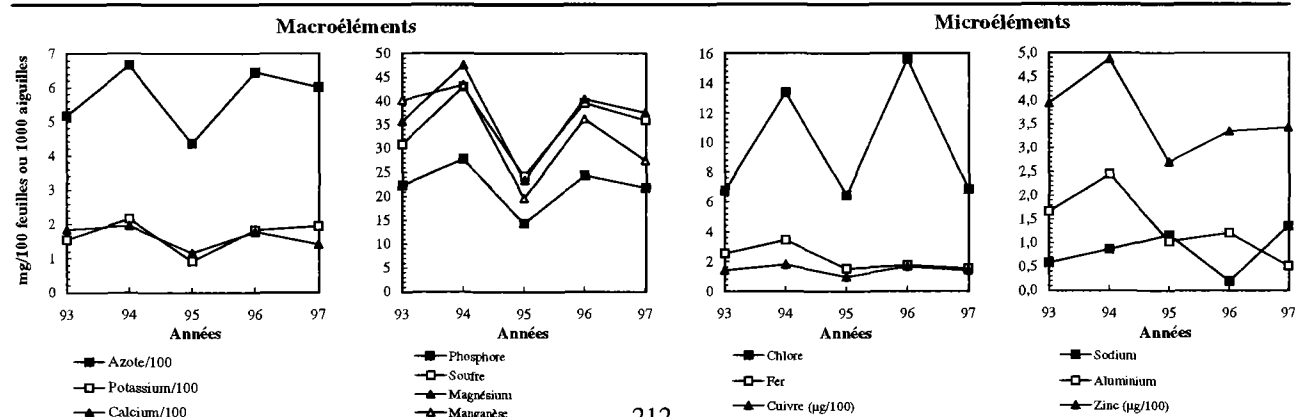
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



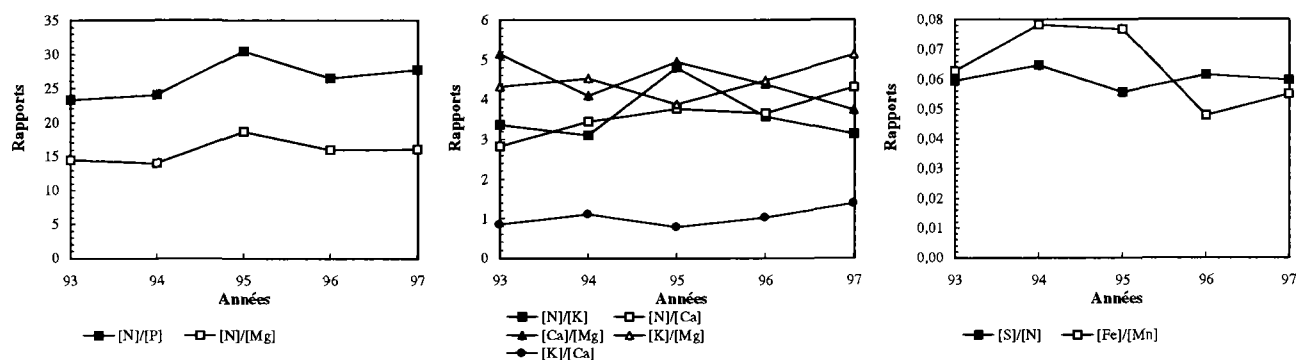
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	13	8	12	23	20	24	33	24	30	41	25	19
Interannuel 93-97 (n=5)	7	8	7	17	9	9	24	16	6	12	59	26	38

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires (100f (1000a))



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P	K	N, Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					S, Ca

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires en phosphore sont faibles. Les teneurs en azote étant optimales, le rapport N/P est élevé (entre 23 et 30). L'alimentation minérale dans le sol est globalement satisfaisante. Après trois années de défoliation faible (< 20 %), une forte augmentation est observée en 1997 indépendamment des teneurs foliaires en nutriments, mais en même temps qu'un développement généralisé d'oïdium. L'accroissement annuel moyen en surface terrière entre 1991 et 1995 est un des plus fort pour le chêne pédonculé dans le réseau (0,62 m²/ha/an), probablement en relation avec l'éclaircie de 1991.

Les teneurs d'azote foliaire augmentent légèrement entre 1993 et 1997. On remarque cependant que l'ordre de grandeur des variabilités intraplacette et interannuelle est comparable (respectivement 9 et 7 %) ce qui ne permettent pas de conclure à une augmentation significative de cet élément dans les feuilles. La même remarque est valable pour les diminutions du manganèse et du fer.

Placette de niveau 2

Forêt Communale de Gamarde (P. 4)

Commune de Gamarde-les-Bains (Landes)

Latitude: 43°44'19" N

Longitude: 0°50'32" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

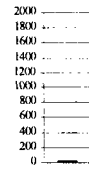
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 46 ± 2

Ho en 1995 (m) : 25,0 ± 1,5

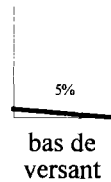
dG/dt (m²/ha/au) sur la période 1992-1995 : 0.19



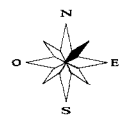
Altitude



Pente

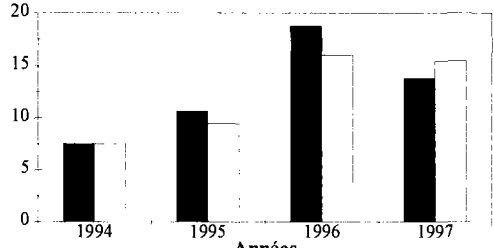


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



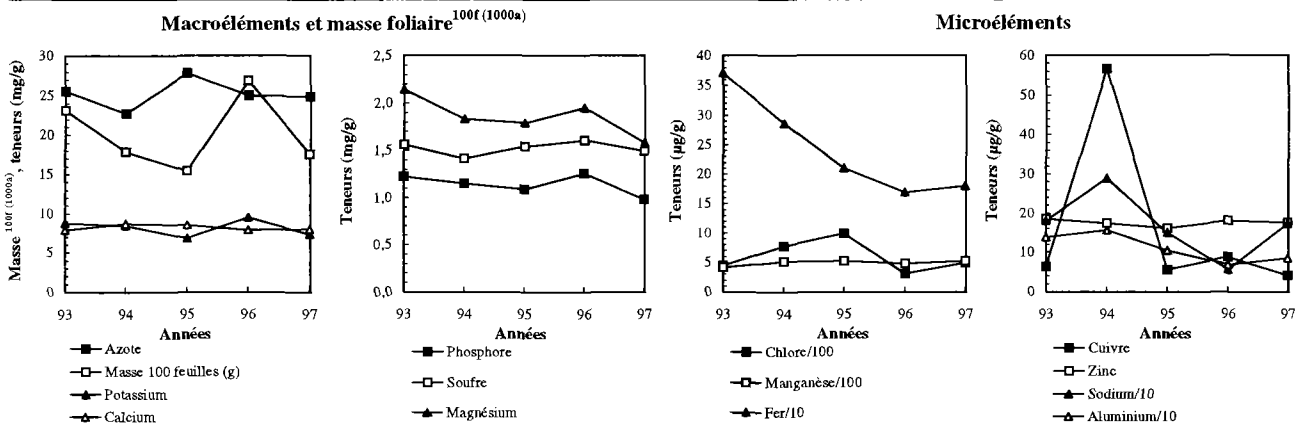
■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Hyperico androsaemi-Carpinion betuli*

Humus : Eumull - Mésomull

Type de sol : Sol brun alluvial hydromorphe à gley profond

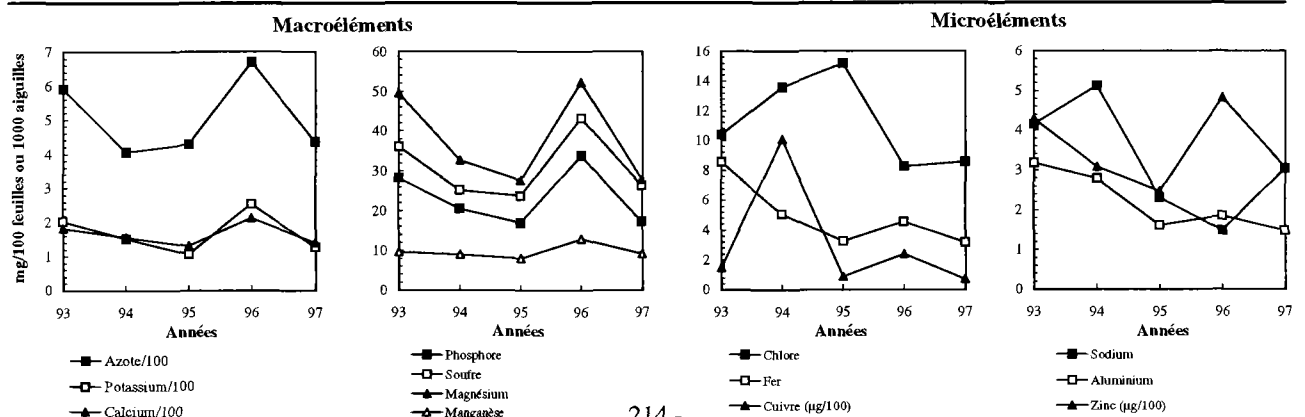
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



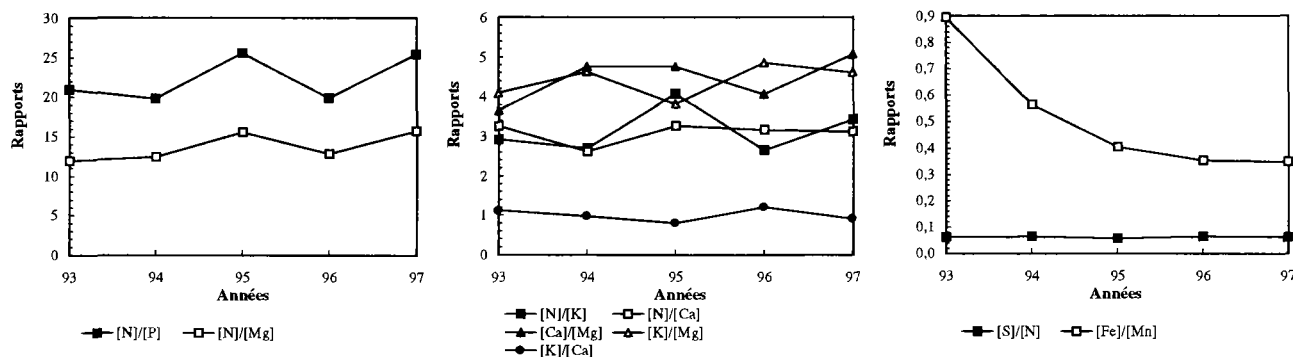
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	14	22	14	26	20	12	21	43	30	25	41	41	13
Interannuel 93-97 (n=5)	6	9	4	12	4	10	31	8	124	5	44	41	30

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg, K		N, Ca		P, K	N, Mg S, Ca
Microéléments :	Mn, Zn		Fe, Cu			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant; les teneurs foliaires en phosphore et en potassium sont cependant faibles. Les teneurs en azote étant optimales, le rapport N/P est élevé (entre 20 et 26). L'alimentation minérale dans le sol est globalement satisfaisante. Les pourcentages de défoliation de 1994 à 1997 sont les plus faibles pour les placettes de chêne pédonculés (12 %). L'accroissement annuel moyen en surface terrière entre 1991 et 1995 est un des plus faibles pour le chêne pédonculé dans le réseau (0,19 m²/ha/an).

La teneur en fer foliaire diminue de moitié entre 1993 et 1997. Comparé à la variabilité intraplacette, cette diminution est importante. On remarquera également que les teneurs élevées obtenues en 1993 sont les plus fortes enregistrées pour cette essence dans le réseau. En 1994, la teneur foliaire très élevée en cuivre (6 fois les valeurs courantes) fait penser à un problème de dosage ou à un manque de représentativité des analyses cette année là (plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1994). Une diminution régulière des teneurs foliaires en aluminium est également à noter.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Monnaie (P. 5)

Commune de Jumelles (Maine et Loire)

Latitude: 47°27'22" N

Longitude: 0°01'52" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

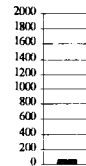
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 70 ± 7

Ho en 1995 (m) : 28,1 ± 2,0

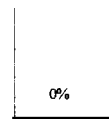
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.33



Altitude

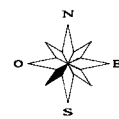


Pente



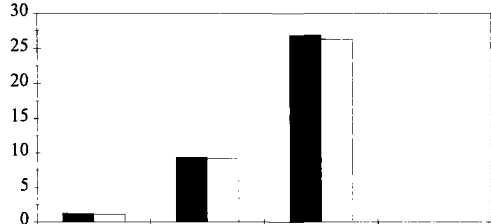
terrain plat

Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



■ Arbres "échantillon" (n=8)

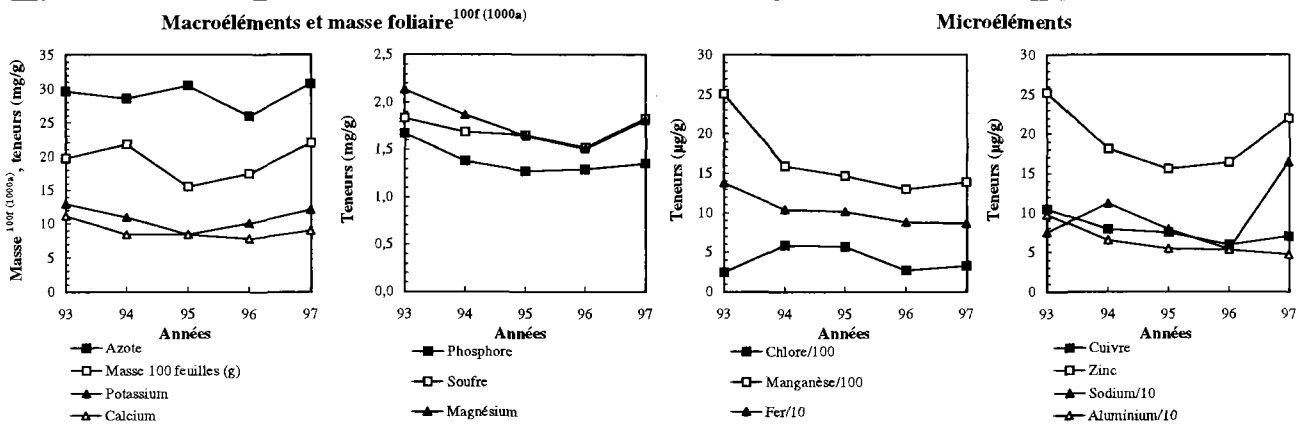
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Carpinion betuli*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun lessivé à pseudogley

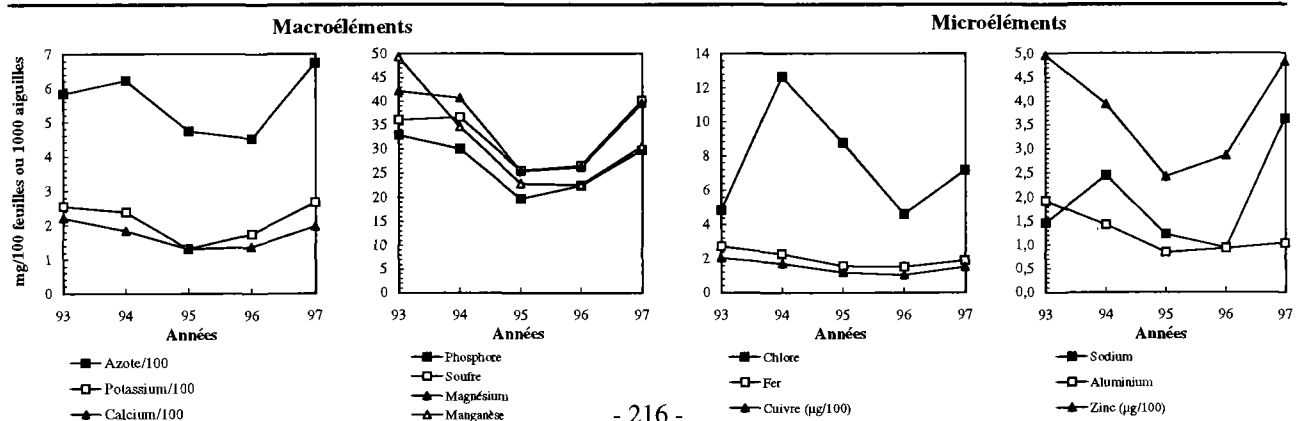
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



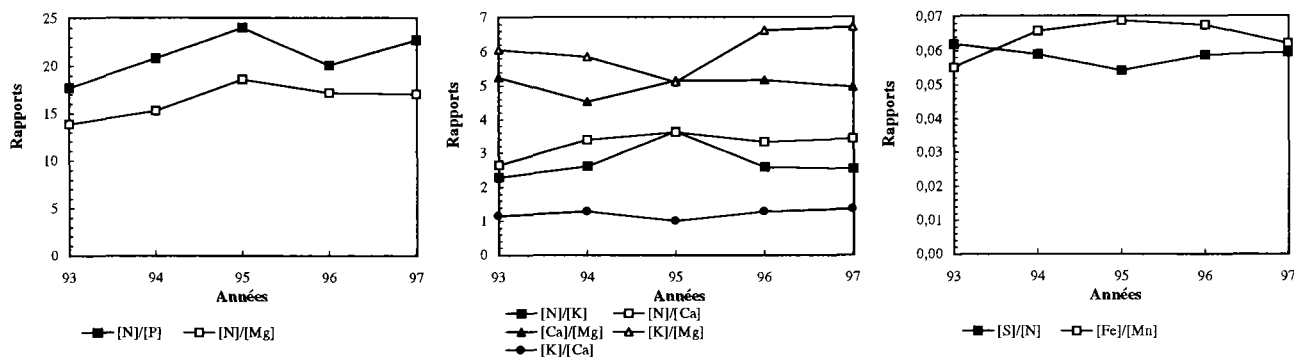
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	13	9	22	16	21	18	40	22	36	96	14	33
Interannuel 93-97 (n=5)	6	10	7	15	13	12	18	27	19	19	40	37	28

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg		N, Ca, K	P, N, K, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires en phosphore sont faibles. Les teneurs en azote étant optimales, le rapport N/P est élevé (entre 17 et 23). L'alimentation minérale dans le sol est globalement satisfaisante. Les niveaux de défoliation, pratiquement nuls en 1995, atteignent 25 % en 1997. L'accroissement annuel moyen en surface terrière entre 1991 et 1995 est moyen à faible (0,33 m²/ha/an) mais les inventaires 1991 et 1995 n'ayant pas été réalisés sur les mêmes surfaces, cette valeur est à prendre avec précaution (l'accroissement en diamètre est l'un des plus forts des placettes de chêne pédonculé du réseau). L'évolution des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 ne montre pas de tendance particulière étant donné la variabilité intraplacette.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Haudronville (P. 27)

Commune de Lachaussée (Meuse)

Latitude: 49°01'21" N

Longitude: 5°46'01" E

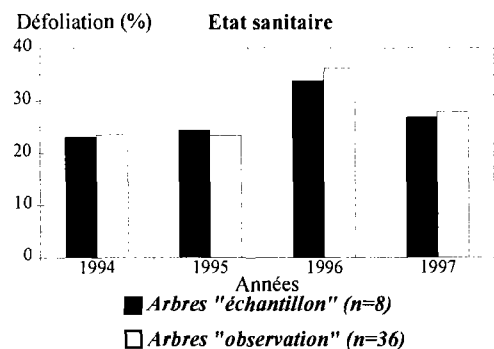
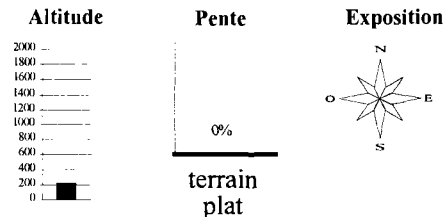
Structure du peuplement : Taillis sous futaie vieilli

Origine : Rejet sur souche progressif

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 100 ± 45

Ho en 1995 (m) : 20,2 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.04

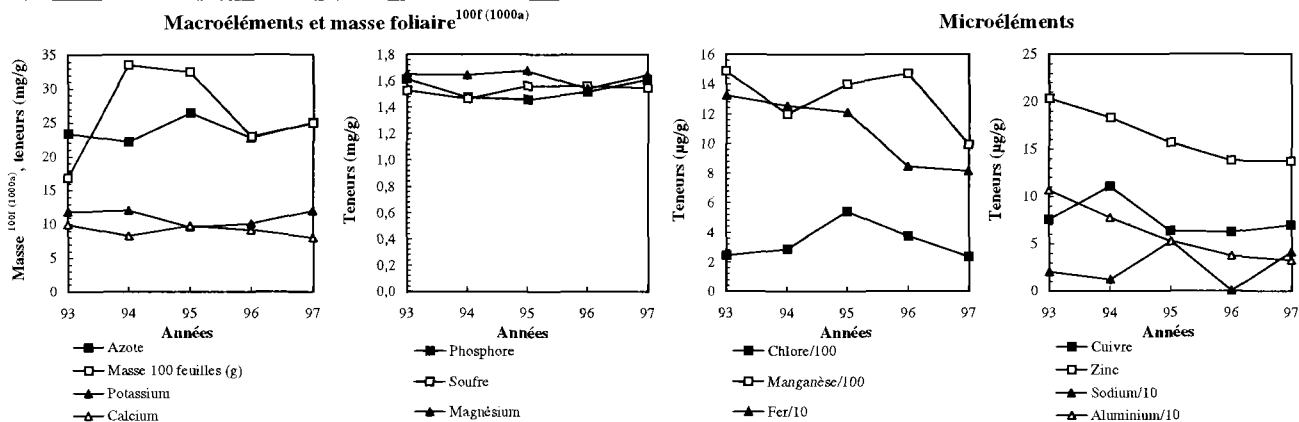


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinionion betuli*

Humus : Eumull

Type de sol : Pélosol pseudogley à deux couches

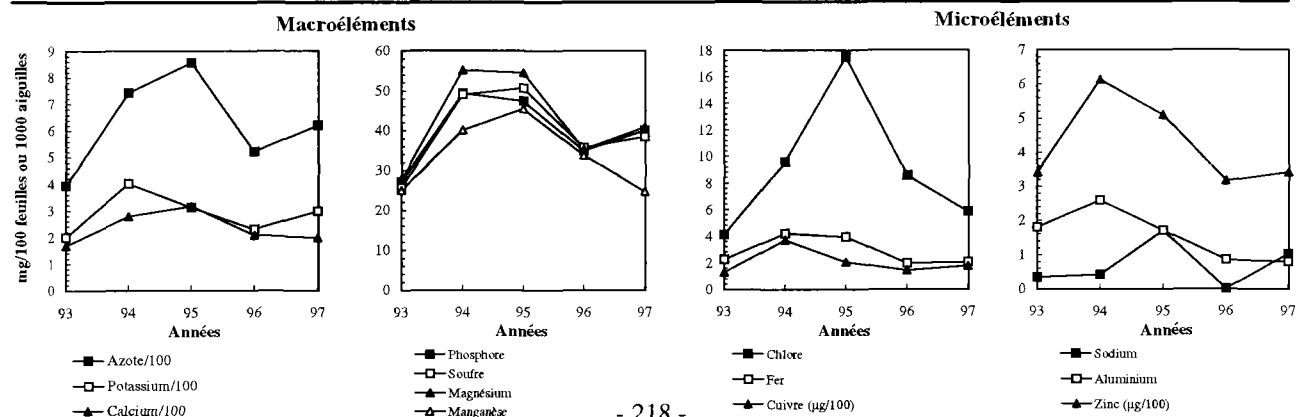
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



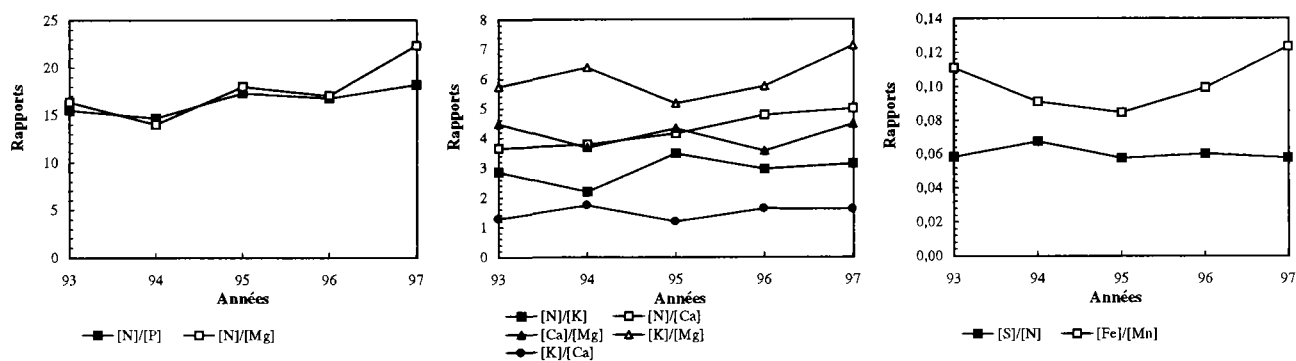
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	10	5	10	29	12	25	22	17	12	40	35	45	
Interannuel 93-97 (n=5)	6	4	2	9	9	3	20	14	24	16	76	34	45	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Mg		Ca, K	N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant est en accord avec une bonne alimentation minérale dans le sol. Des pourcentages de défoliation non négligeables (entre 25 et 35 %) et constants sur la période 1994 - 1997 coïncident avec des dégâts de défoliateurs et d'oïdium. L'accroissement annuel moyen en surface terrière entre 1991 et 1995 est très faible (0,04 m²/ha/an) mais la fiabilité de cette estimation est fortement mise en question (cf. Cluzeau et al., 1998).

La masse de 100 feuilles a nettement augmenté entre 1993 et les années suivantes (17 à 33 g). Par contre, les teneurs en éléments foliaires n'ont présenté aucune tendance claire durant cette période.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Mormal (P. 1036)

Commune de Locquignol (Nord)

Latitude: 50°10'16" N

Longitude: 3°45'16" E

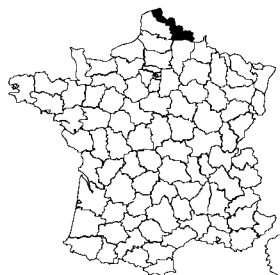
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

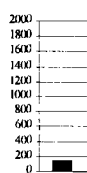
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 70 ± 2

Ho en 1995 (m) : 22,8 ± 1,0

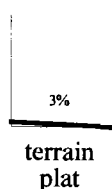
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.79



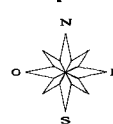
Altitude



Pente

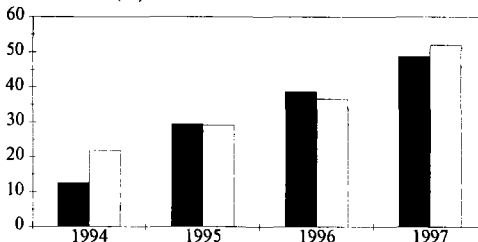


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



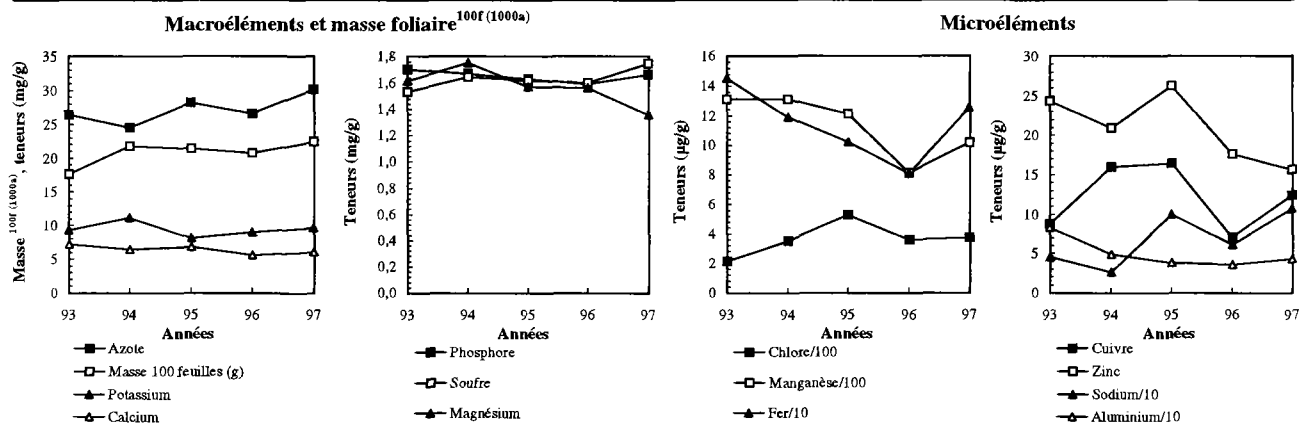
Végétation : *Carpinion betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Pseudogley glossique

Sol lessivé à pseudogley

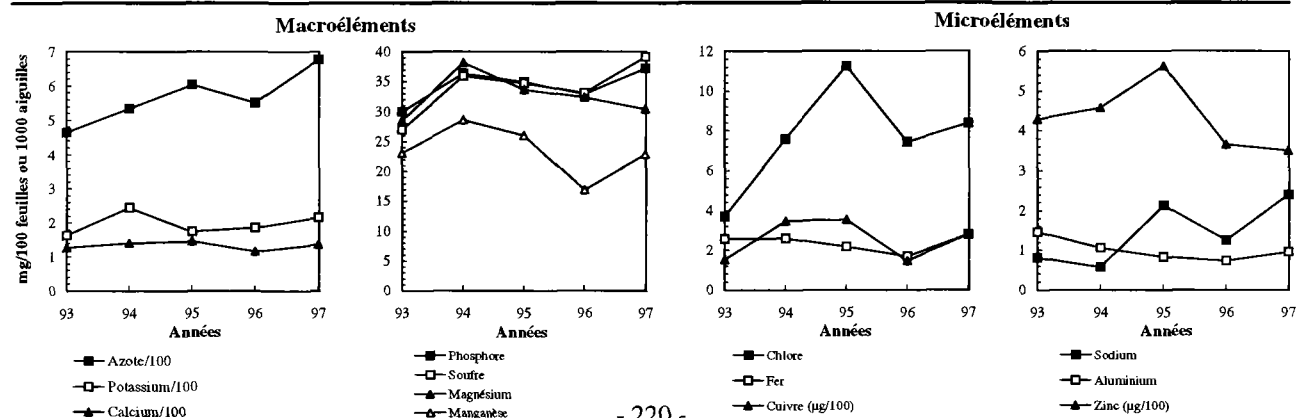
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



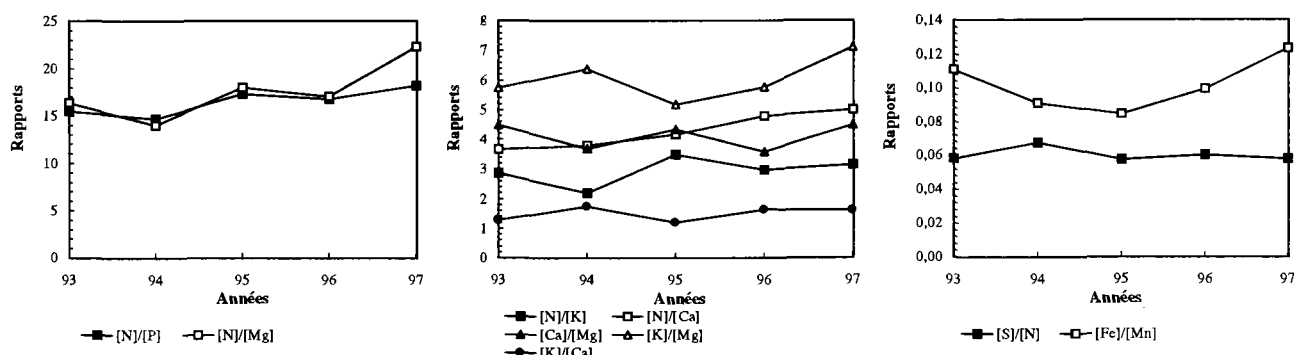
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	15	15	24	20	16	13	30	98	28	40	14	21	
Interannuel 93-97 (n=5)	7	2	4	11	9	8	19	17	31	19	46	28	35	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Zn			Cu		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant est en accord avec une bonne alimentation minérale dans le sol et un niveau de productivité élevé. Les pourcentages de défoliation sont en progression régulière depuis 1994; ils passent d'environ 15 % en 1994 à pratiquement 50 % en 1997. Sur l'ensemble de cette période c'est la placette de chêne pédonculé qui présente le plus fort pourcentage de défoliation (35 %). La présence de défoliateurs (1995, 1996, et 1997) et des épisodes de gel tardif en 1997 permettent de comprendre cette progression.

L'évolution des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 ne montre pas de tendance.

Placette de niveau 1

Forêt Communale d'Azereix (P. 24)

Commune de Azereix (Hautes Pyrénées)

Latitude: 43°12'13" N

Longitude: 0°02'17" W

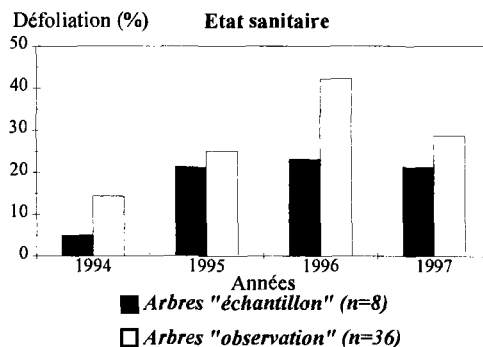
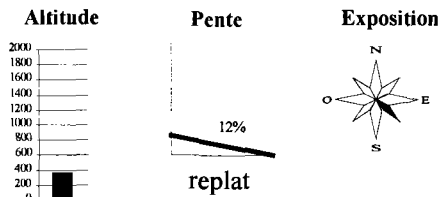
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 54 ± 4

Ho en 1995 (m) : 23,9 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.75



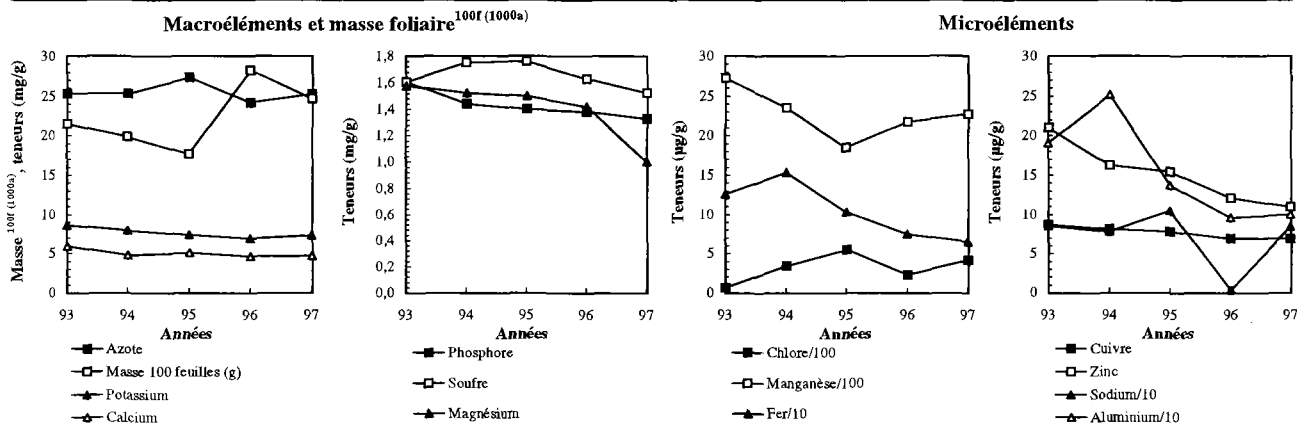
Végétation : *Hyperico androsaemi-Carpinion betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol brun colluvial

Sol brun colluvial à pseudogley profond

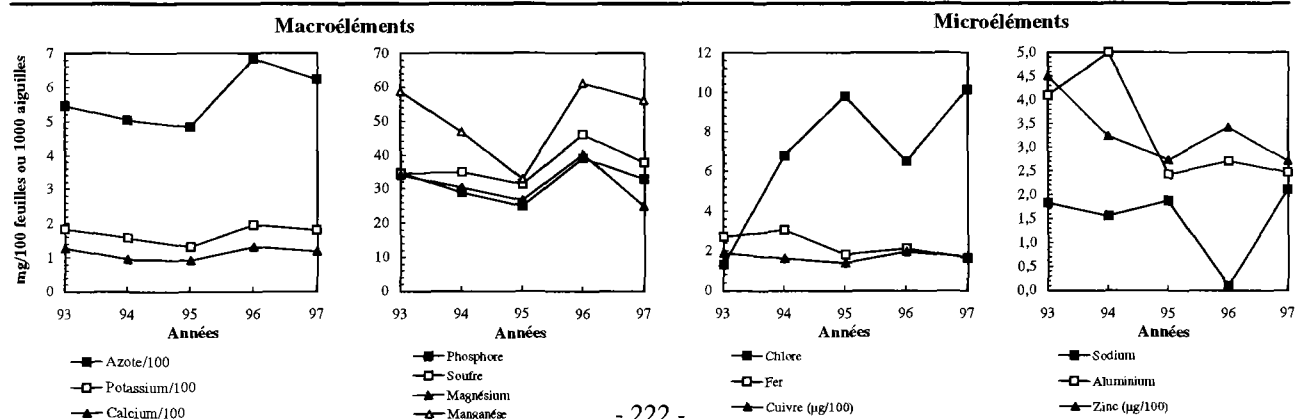
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



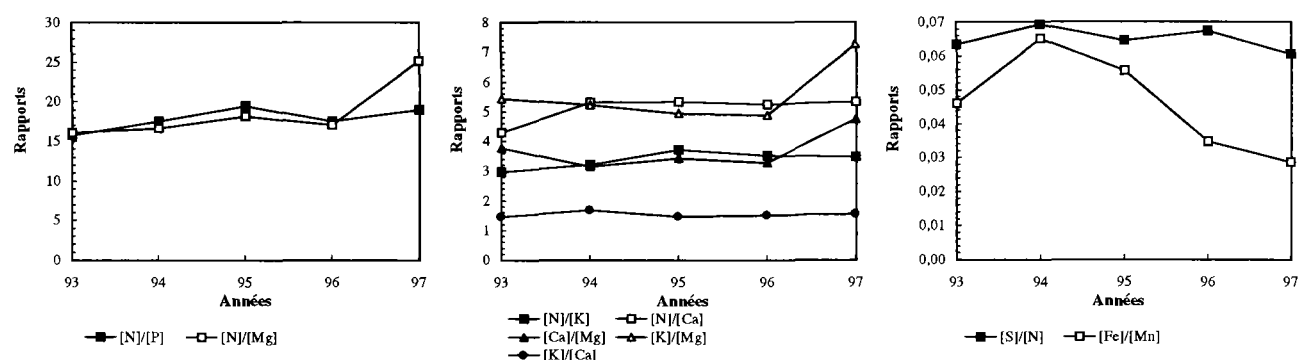
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	8	6	13	9	28	8	13	50	30	40	28	6
Interannuel 93-97 (n=5)	4	7	5	8	9	15	31	12	9	23	49	52	38

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P, K, N, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant est en accord avec une bonne alimentation minérale dans le sol et un niveau de productivité élevé. Les pourcentages de défoliation restent à des niveaux inférieurs à 25 %. En 1996, le pourcentage de défoliation estimé sur les 8 arbres échantillons (environ 25 %) est sous estimé par rapport à celui obtenu sur les 36 arbres observation (environ 40 %).

Seules les teneurs en fer et en aluminium diminuent entre 1993 et 1997, les autres éléments ne présentent aucune tendance.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là et une légère sous-évaluation de la variabilité intraplacette estimée la même année.

Placette de niveau 1

Forêt Communale d'Anjeux (P. 24)

Commune de Anjeux (Haute Saône)

Latitude: 47°52'14" N

Longitude: 6°12'41" E

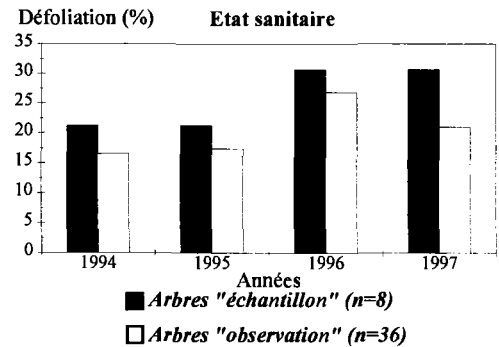
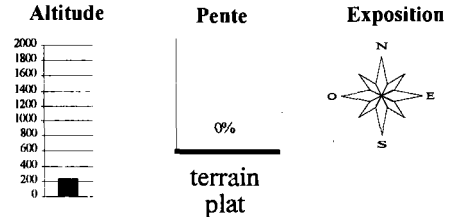
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 35 ± 6

Ho en 1995 (m) : 19,3 ± 1,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.46

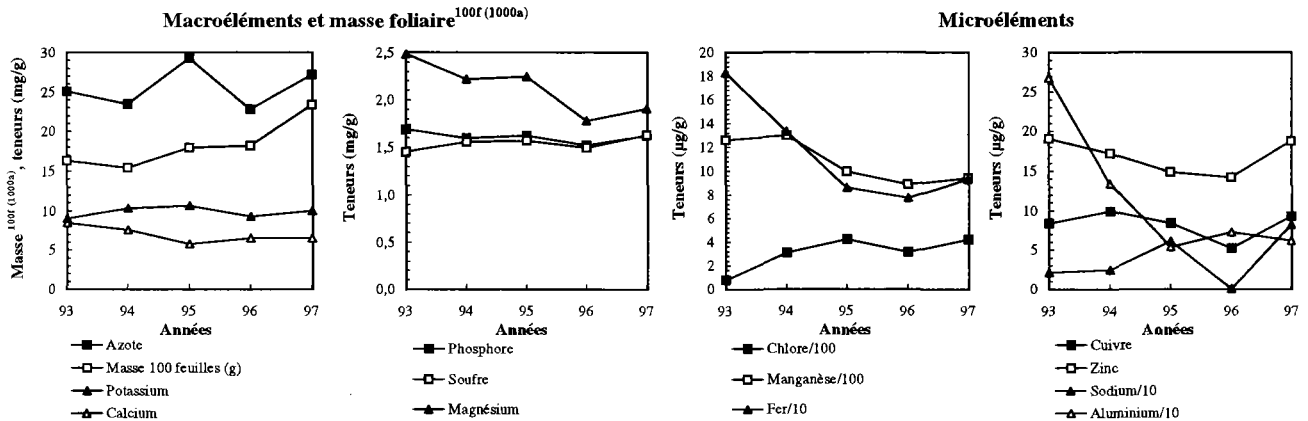


Végétation : *Daphno laureolae-Carpinionen betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol lessivé à pseudogley

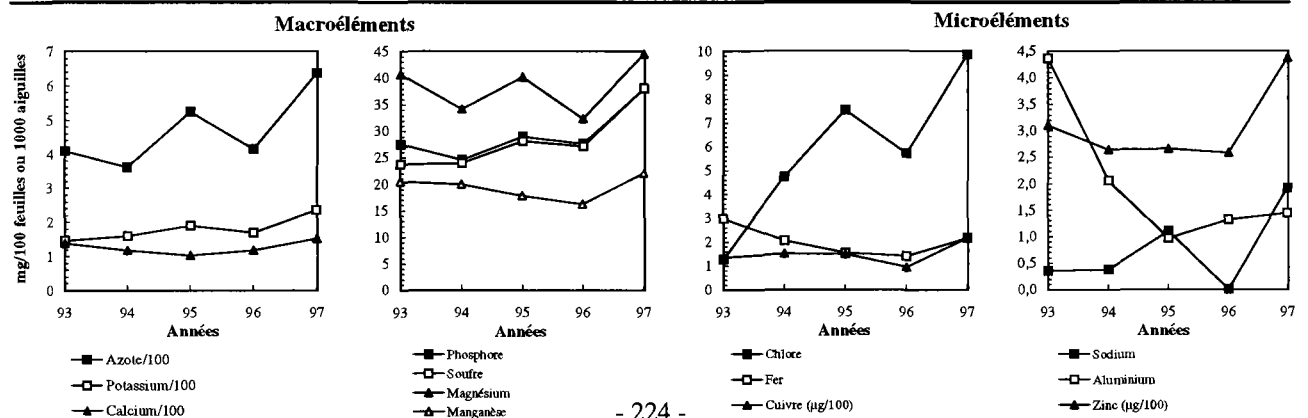
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



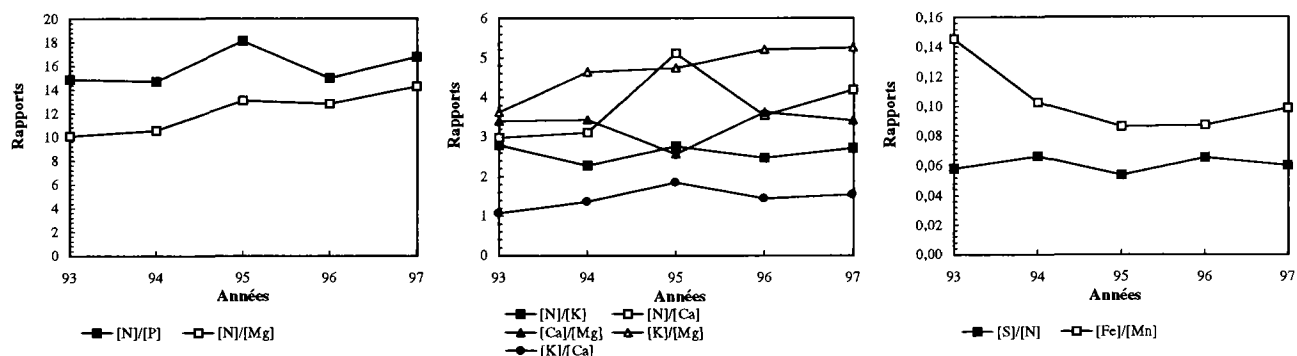
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	17	13	12	9	14	13	31	21	106	26	100	32	18	
Interannuel 93-97 (n=5)	9	3	4	6	14	12	34	16	20	12	78	41	68	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant est en accord avec une bonne alimentation minérale dans le sol, par contre son accroissement en surface terrière, en volume et en diamètre est faible par rapport aux autres peuplements. Ce peuplement est le plus jeune des peuplements de chêne pédonculé du réseau. Les pourcentages de défoliation sont modérés, entre 20 et 30 % de 1994 à 1997.

Les teneurs en aluminium et en fer diminuent respectivement de 28 à 7 µg/g et de 18 à 8 µg/g entre 1993 et 1997; parmi les macroéléments les teneurs foliaires en magnésium diminuent de 2,5 à 1,7 mg/g tandis que les autres éléments ne présentent aucune tendance.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Poulans (P. 34)

Commune de Poulans (Saône et Loire)

Latitude: 46°58'13" N

Longitude: 5°14'36" E

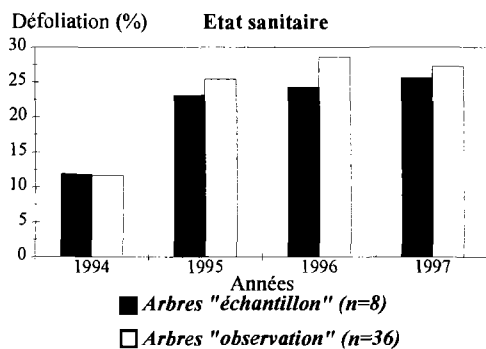
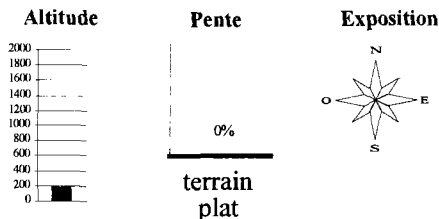
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 67 ± 7

Ho en 1995 (m) : 25,6 ± 2,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.50



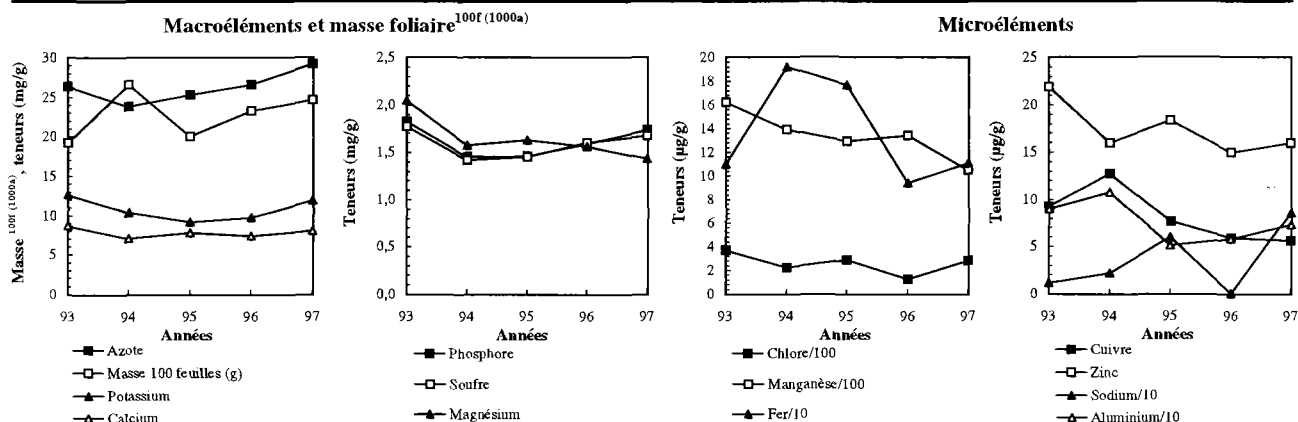
Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinenion betuli*

Humus : Eumull

Type de sol : Sol brun lessivé à pseudogley

Pseudogley

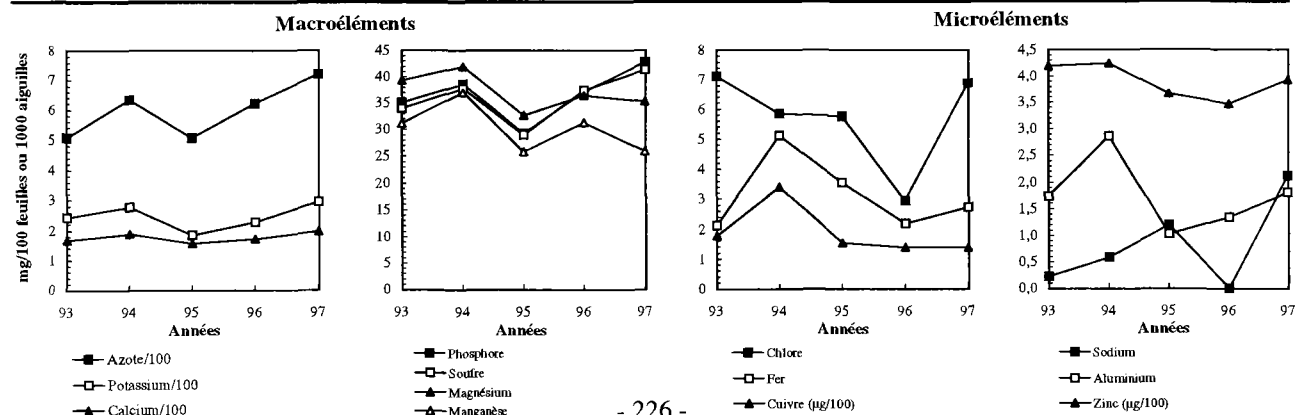
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



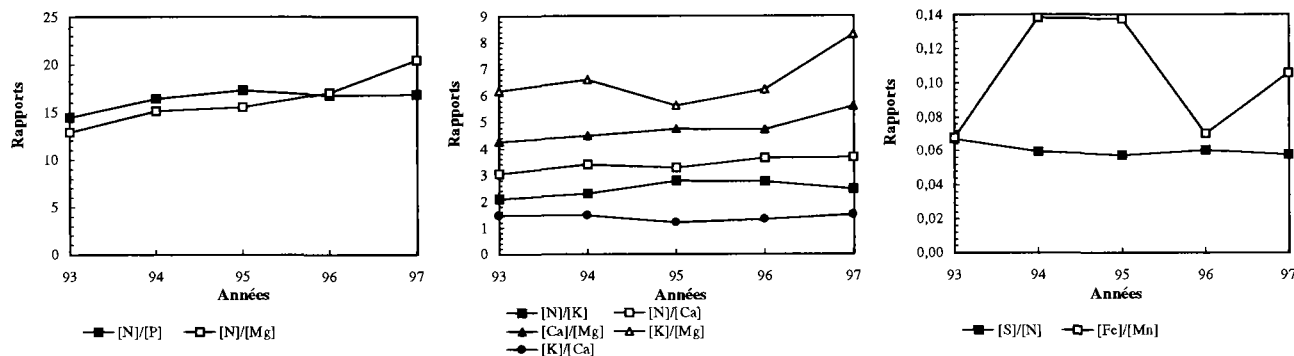
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	39	32	43	35	42	29	47	27	70	25	55	32	22
Interannuel 93-97 (n=5)	7	9	8	12	7	13	29	14	32	14	90	32	28

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg			N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant est en accord avec une bonne alimentation minérale dans le sol et un accroissement en surface terrière moyen sur la période 1991-1995. Les pourcentages de défoliation sont modérés (environ 25 %) et stables depuis 1995.

Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Seillon (P. C3)

Commune de Péronnas (Ain)

Latitude: 46°10'17" N

Longitude: 5°14'22" E

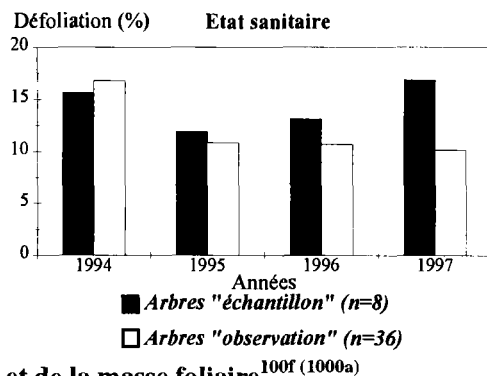
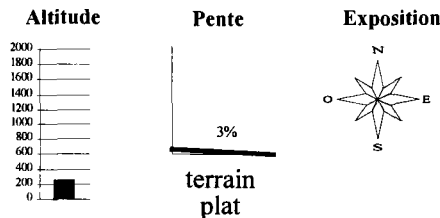
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 88 ± 7

Ho en 1995 (m) : 25,8 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.47



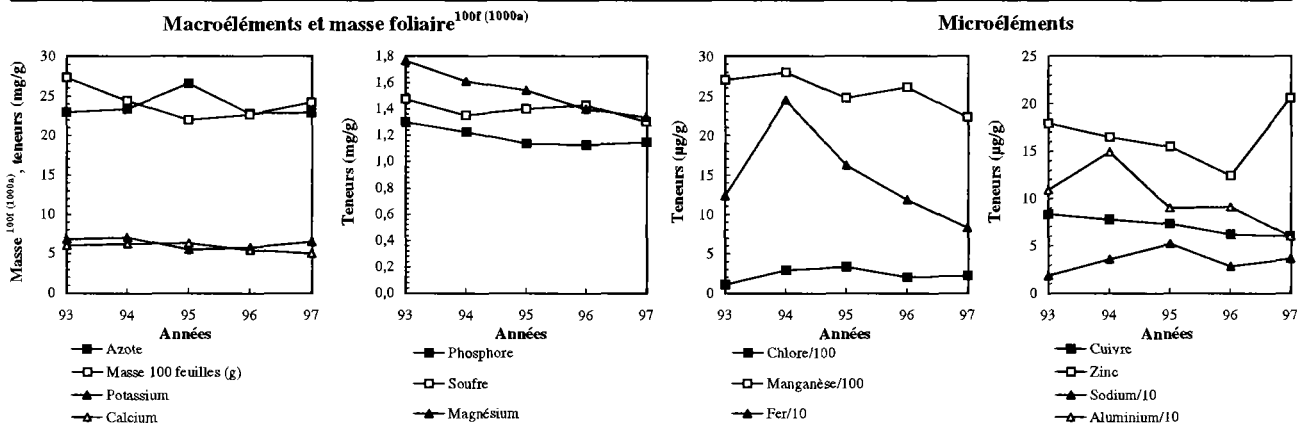
Végétation : *Lonicera periclymeni-Carpinienion betuli*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé à pseudogley

Sol brun à pseudogley

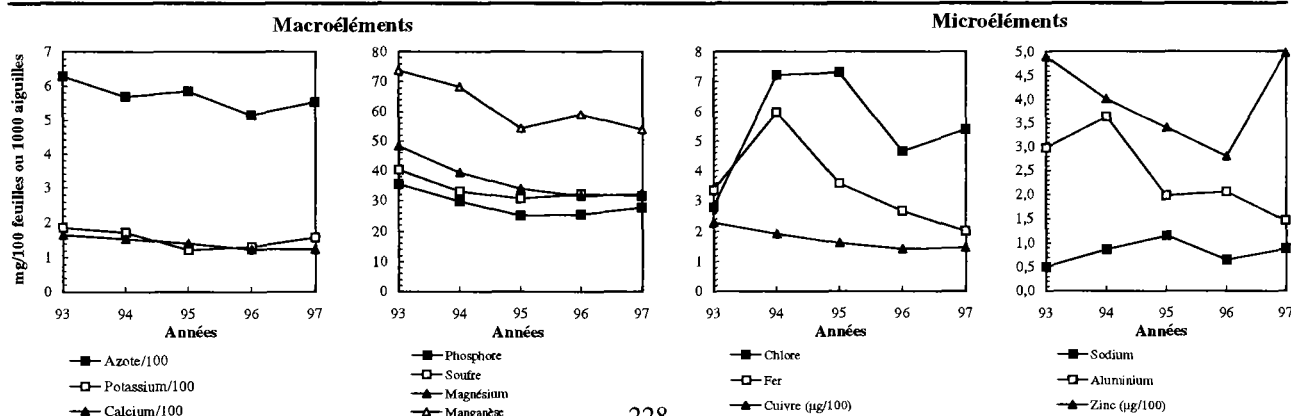
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



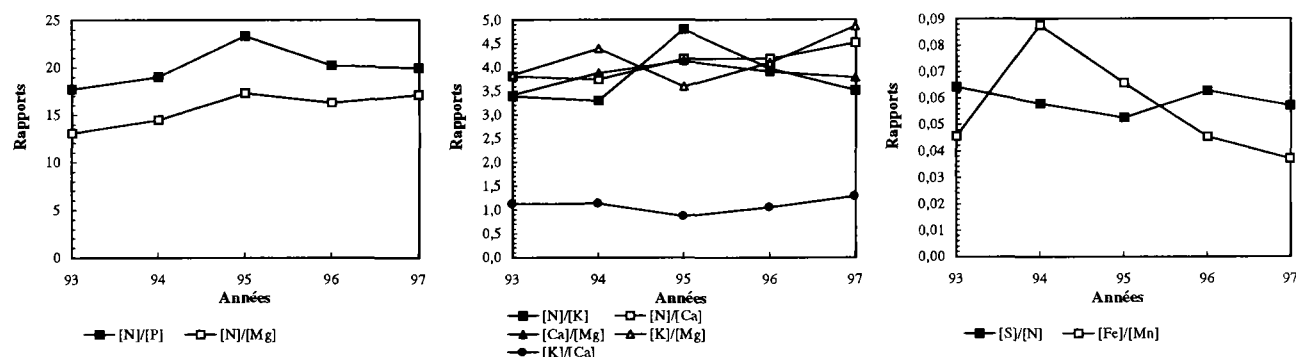
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	13	9	12	12	19	13	19	31	28	34	72	18	13
Interannuel 93-97 (n=5)	6	5	4	9	8	10	38	8	13	16	32	34	29

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			P, K, N, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant. Les teneurs foliaires en phosphore et en potassium sont cependant entre les seuils critiques et optimums. Les pourcentages de défoliation sont modérés (environ 15 %) et stables depuis 1994.

Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette (la variabilité intraplacette pour les teneurs en Mg et P est plus importante, ou du même ordre de grandeur que la variabilité interannuelle).

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Tronçais (P. 131)

Commune de Isle et Bardais (Allier)

Latitude: 46°40'05" N

Longitude: 2°43'37" E

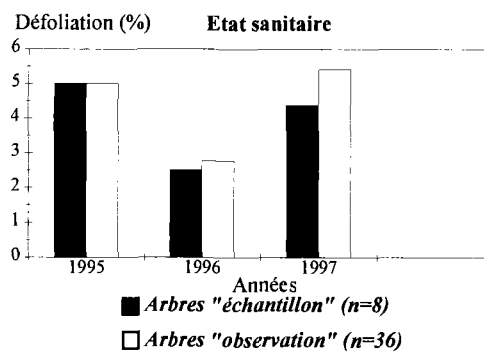
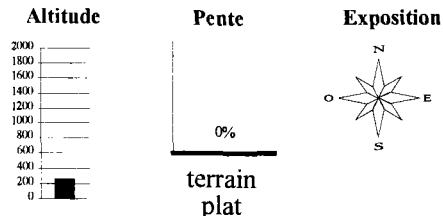
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 115 ± 5

Ho en 1995 (m) : 30,4 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.31



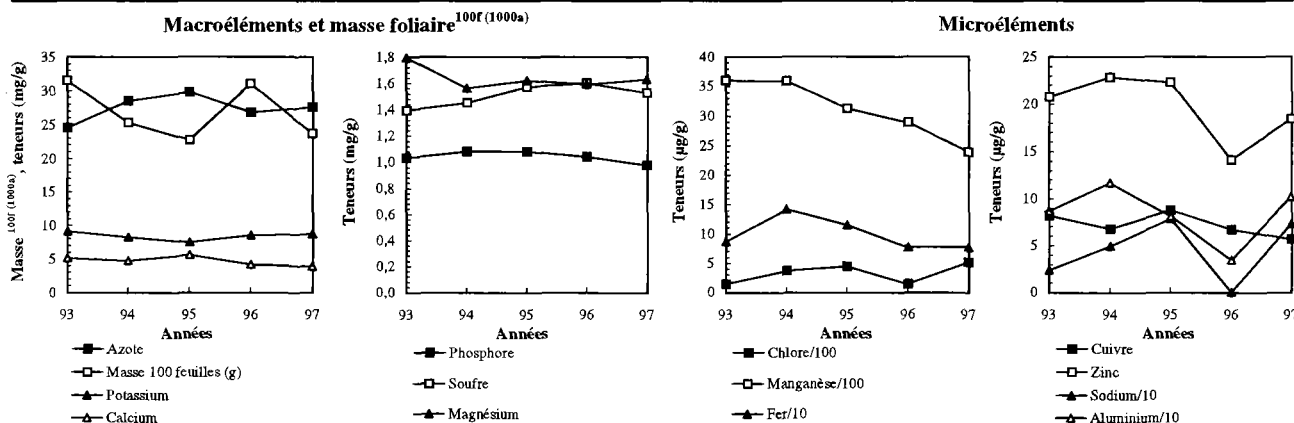
Végétation : *Carpinion betuli*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol brun superficiel

Sol brun à pseudogley

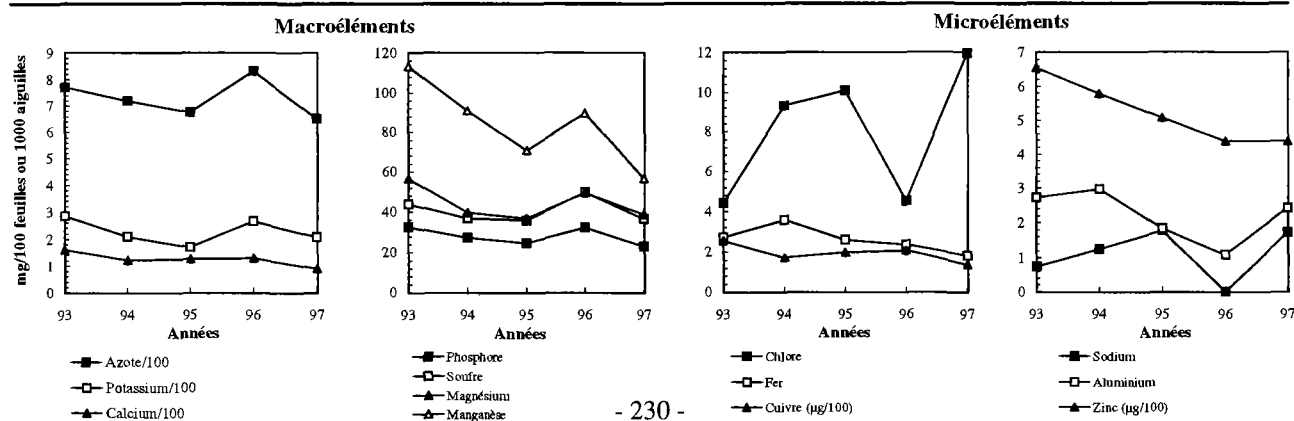
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



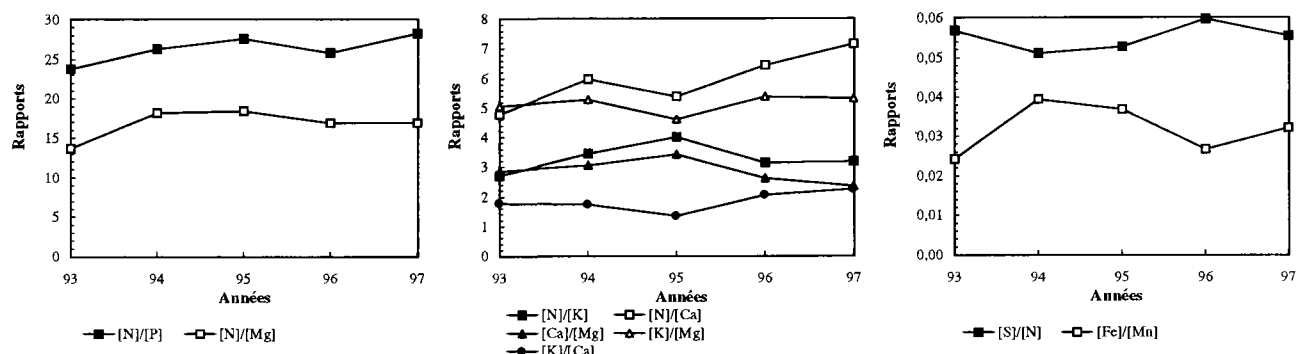
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	7	6	13	7	10	18	18	26	35	42	35	92	
Interannuel 93-97 (n=5)	6	4	5	6	13	5	26	15	15	16	66	47	33	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K N			P	Ca	K, N, Mg
Microéléments :	Fe, Cu, Zn Mn					S

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Les teneurs foliaires en phosphore et en calcium sont faibles (entre le seuil de carence et le seuil critique) sur cette placette et élevées pour l'azote et le magnésium. Il en résulte un rapport N/P élevé (> 25) qui tend à augmenter au cours du temps comme le rapport N/Ca. L'alimentation minérale dans le sol est globalement satisfaisante et l'accroissement en surface terrière 1991 et 1995 est assez faible (0,31 m²/ha/an). Le pourcentage de défoliation est très faible (< 5 %) depuis 1995.

Une diminution du manganèse est observée entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale du Temple (P. 87)

Commune de Amance (Aube)

Latitude: 48°17'54" N

Longitude: 4°27'36" E

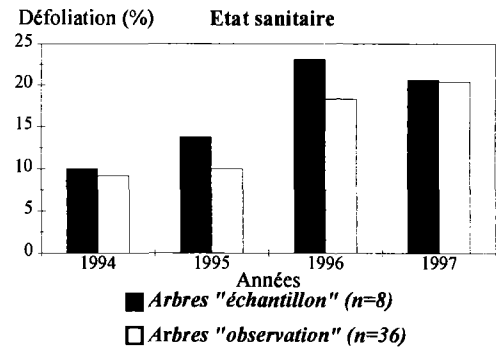
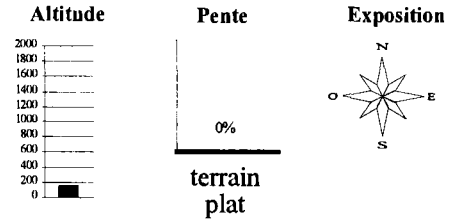
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 83 ± 10

Ho en 1995 (m) : 24,9 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.50

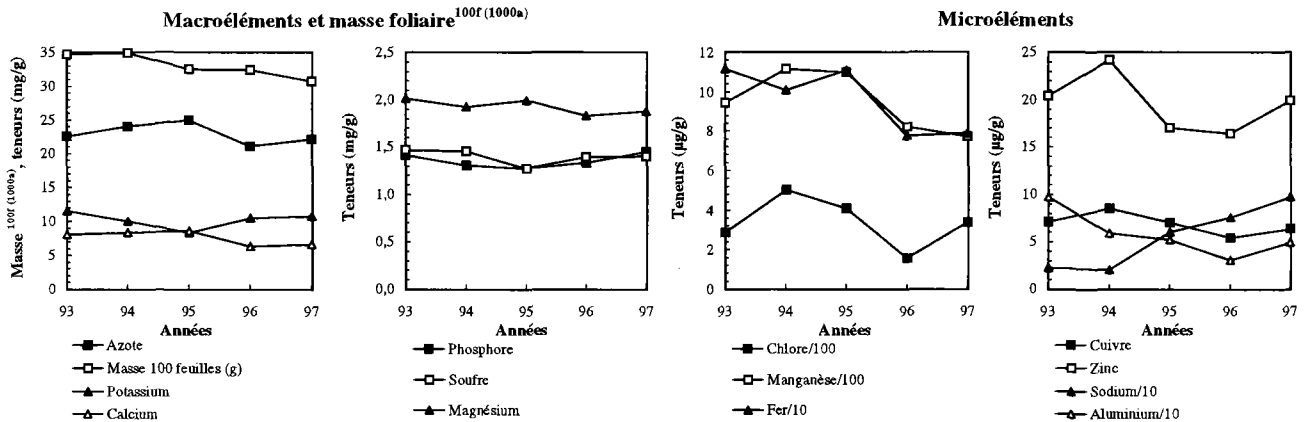


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder - Moder

Type de sol : Pseudogley glossique

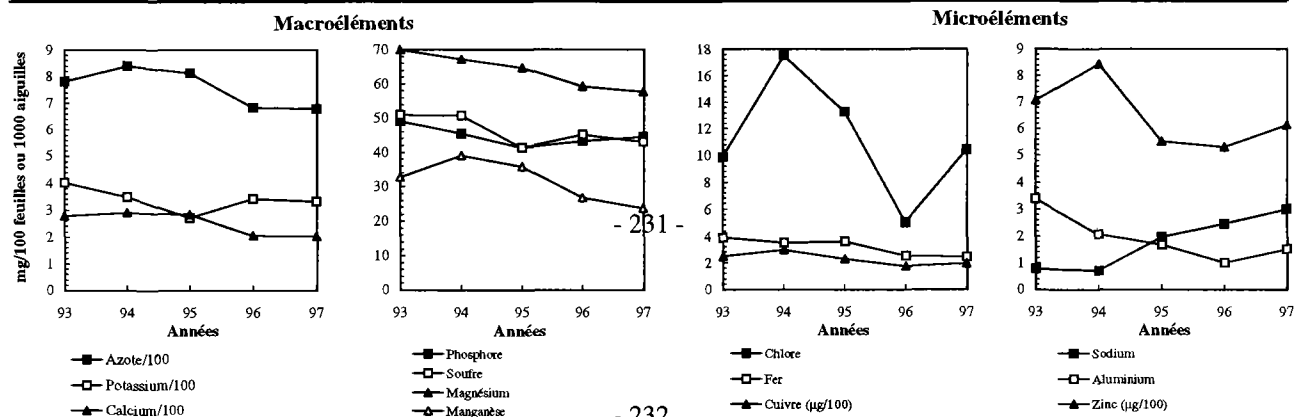
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



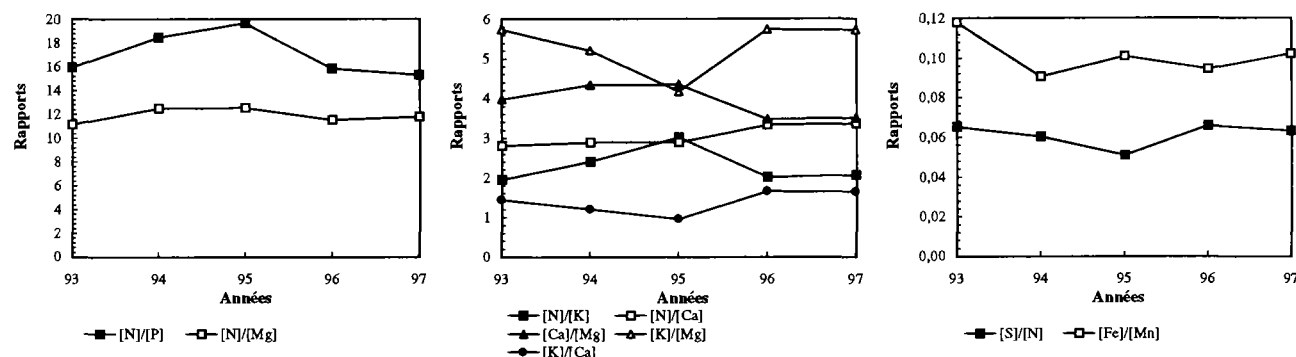
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	16	18	17	19	14	18	21	31	40	22	43	36	28
Interannuel 93-97 (n=5)	6	5	5	11	12	4	16	15	15	14	55	35	38

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg			P, N, K, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette globalement satisfaisant. Les teneurs foliaires en phosphore sont cependant entre les seuils critiques et optimaux tandis que les teneurs en azote, potassium et magnésium sont élevées (supérieures aux seuils indicatifs optimaux). Les pourcentages de défoliation faibles en 94-95 atteignent 20-25 % en 96-97; cette augmentation pourrait être due en partie à une plus grande sévérité des notations depuis 1996. Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Vierzon (P. 168)

Commune de Saint Laurent (Cher)

Latitude: 47°15'17" N

Longitude: 2°07'29" E

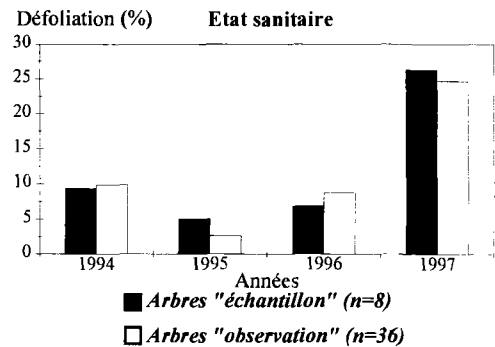
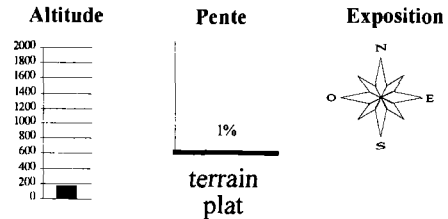
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 78 ± 8

Ho en 1995 (m) : 27,4 ± 1,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 3.23



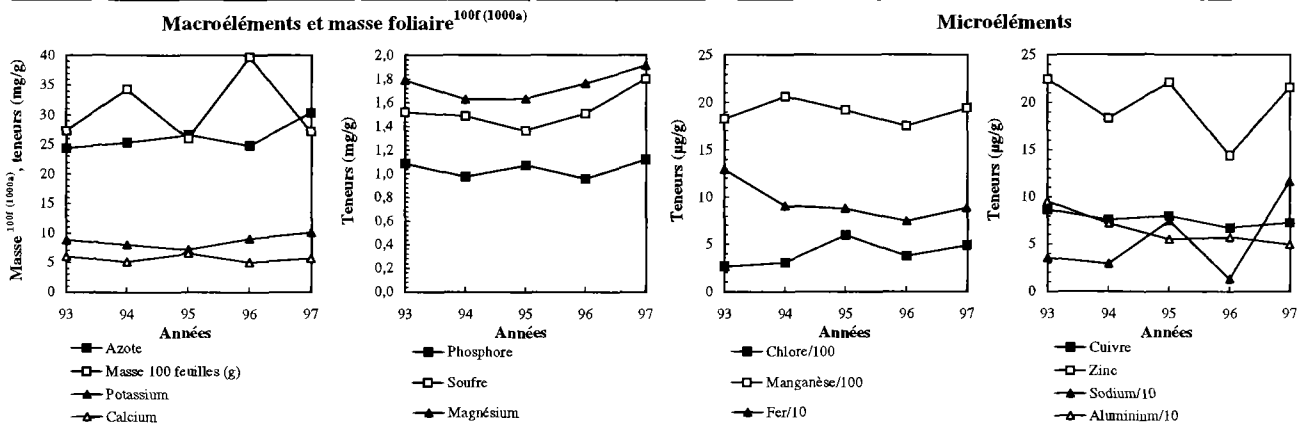
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol lessivé à pseudogley

Pseudogley

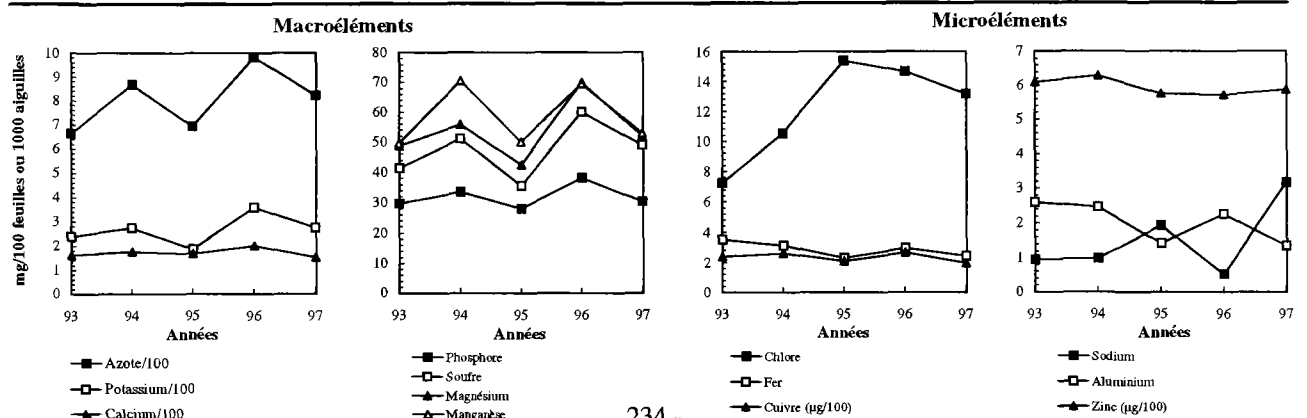
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



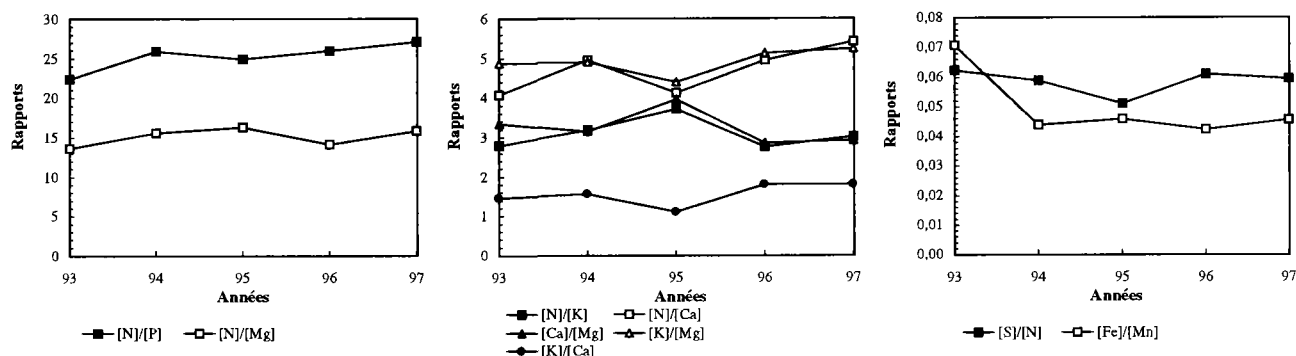
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	21	11	18	39	25	28	19	24	24	33	32	20	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	6	9	11	10	6	20	6	9	15	70	30	25	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P		N, K, Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					S, Ca

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est satisfaisant à l'exception des teneurs foliaires faibles en phosphore (entre les seuils indicatifs de carence et critique) et des teneurs élevées pour l'azote, ce qui entraîne un rapport N/P élevé pour l'ensemble de la période considérée. Les teneurs en phosphore (Dyer) sont faibles à moyennes dans la couche minérale de surface (6,0 mg/Kg pour 0-10 cm), elles sont très faibles en dessous (0,6 et 0,0 mg/Kg dans les couches 10-20 et 20-40 cm) (cf. Ponette et al., 1997). L'accroissement en surface terrière est le plus élevé de tous les peuplements de chêne sessile et l'accroissement en diamètre est parmi les plus forts. Les valeurs de surface terrière de 1991 sont à considérer avec précaution car l'inventaire en plein n'a pas été réalisé sur la même surface que celui de 1995 (inventaire réalisé jusqu'au grillage en 1991). Les pourcentages de défoliation, faibles jusqu'en 1996 (< 10 %) sont plus importants en 1997 (entre 25 et 30 %) mais cette augmentation pourrait être due en partie à des notations plus sévères.

Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Citeaux (P. 197)

Commune de Argilly (Côte d'Or)

Latitude: 47°04'58" N

Longitude: 5°04'30" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

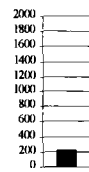
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 87 ± 4

Ho en 1995 (m) : 28,4 ± 1,8

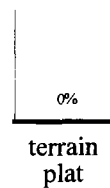
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.52



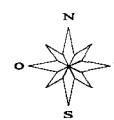
Altitude



Pente

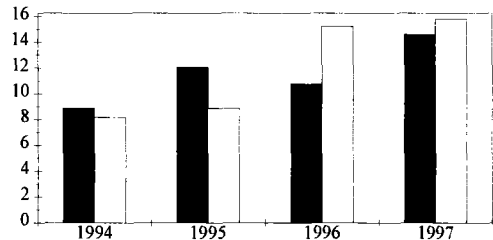


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

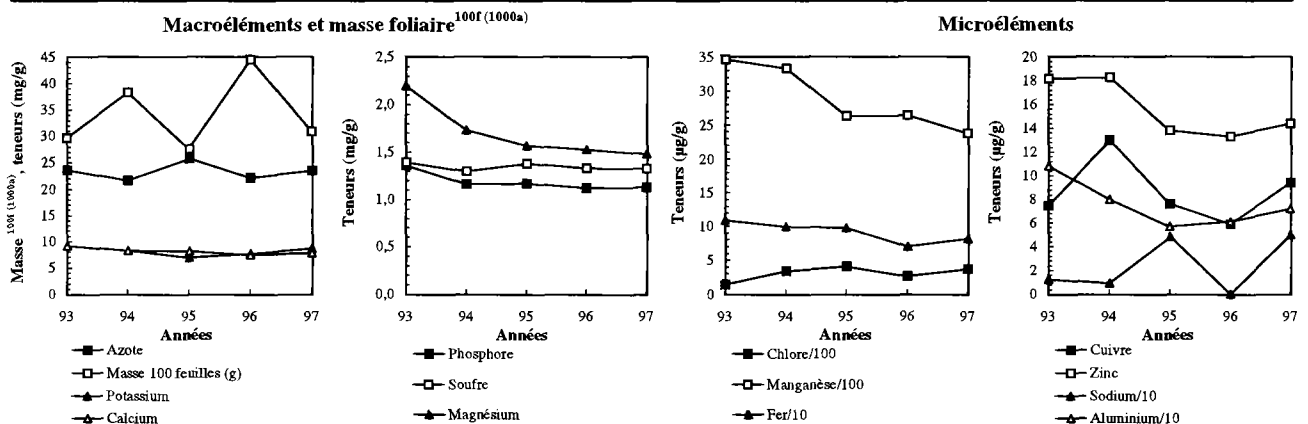


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinenion betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol lessivé glossique

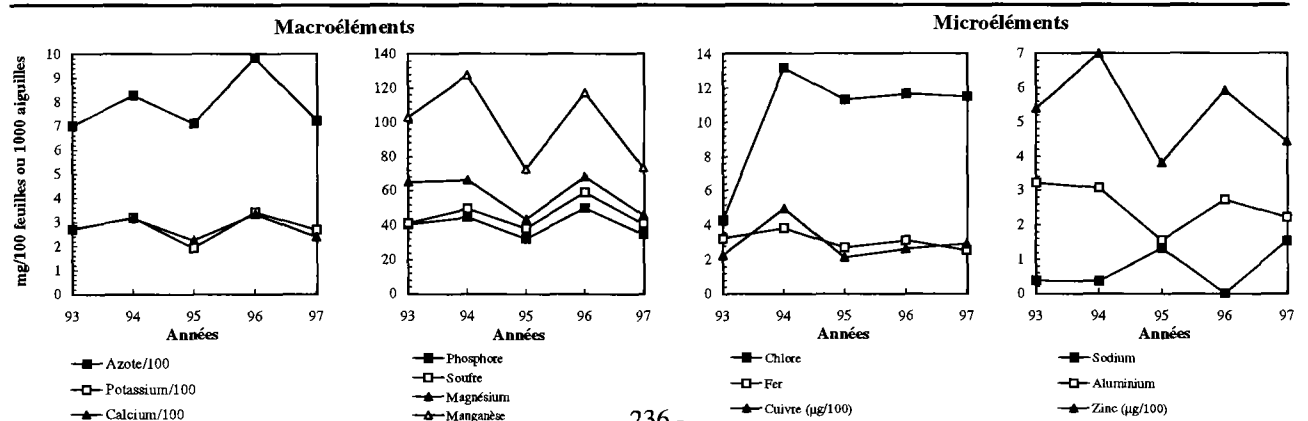
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



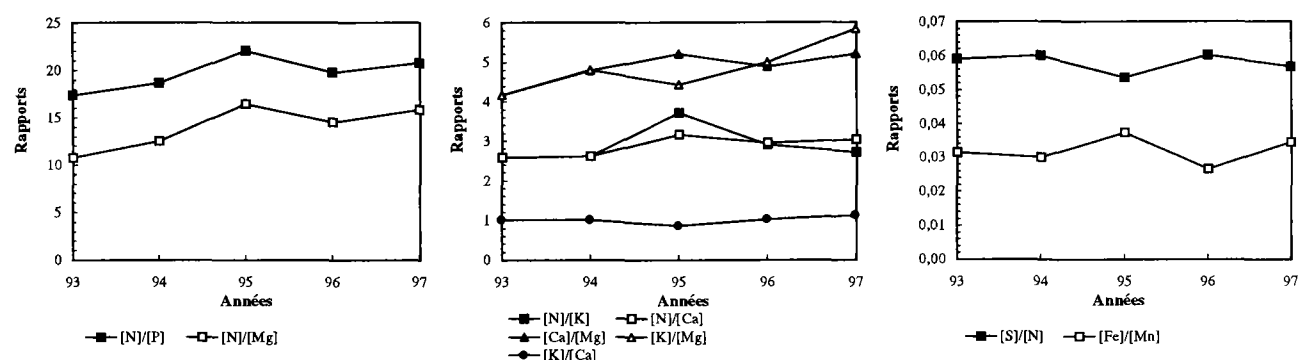
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	12	7	24	28	24	16	21	70	53	52	29	17
Interannuel 93-97 (n=5)	6	7	3	9	7	15	15	15	28	14	87	31	24

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Mg, K		Ca	P, K S, Ca N, Mg		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn		Mn			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant. Les teneurs foliaires sont légèrement faibles pour le phosphore et le potassium. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Les teneurs en magnésium et en manganèse diminuent entre 1993 et 1997, mais on note pour ces éléments une variabilité intraplacette supérieure à la variabilité interannuelle (CV respectivement de 24 %, 15 % et 21 %, 15 %). Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1993, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là, notamment pour le magnésium.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lyons (P. 934)

Commune de Puchay (Eure)

Latitude: 49°21'58" N

Longitude: 1°30'15" E

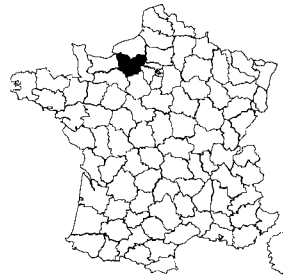
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

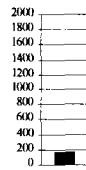
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 55 ± 2

Ho en 1995 (m) : 22,9 ± 1,1

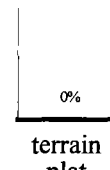
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.26



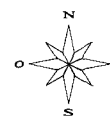
Altitude



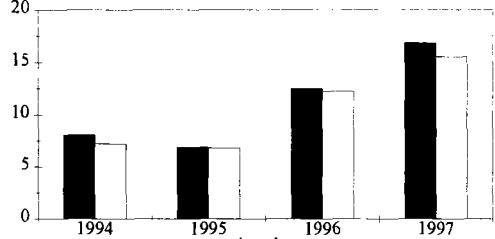
Pente



Exposition



Défoliation (%)



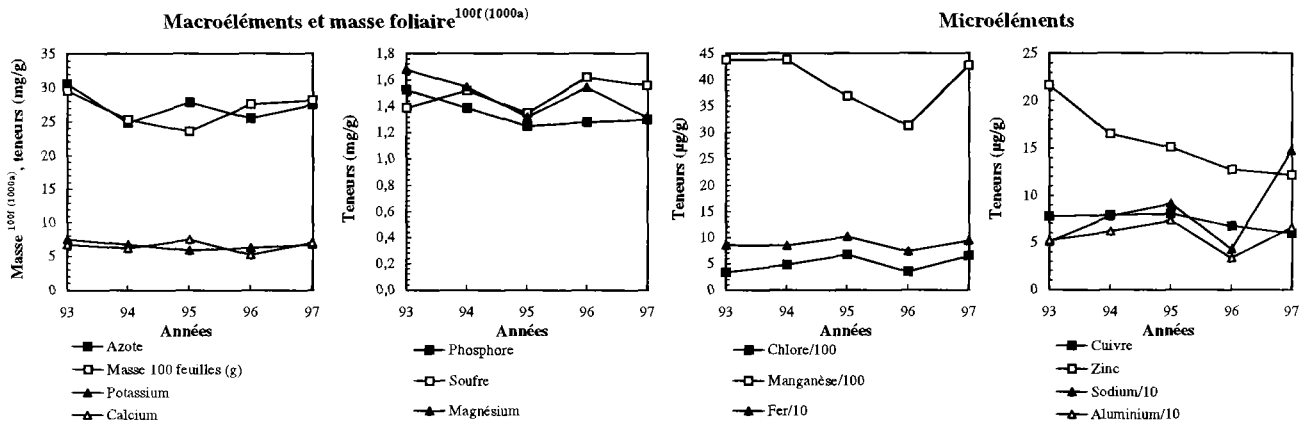
■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Carpinion betuli*

Humus : Moder - Hémimoder

Type de sol : Sol lessivé à pseudogley

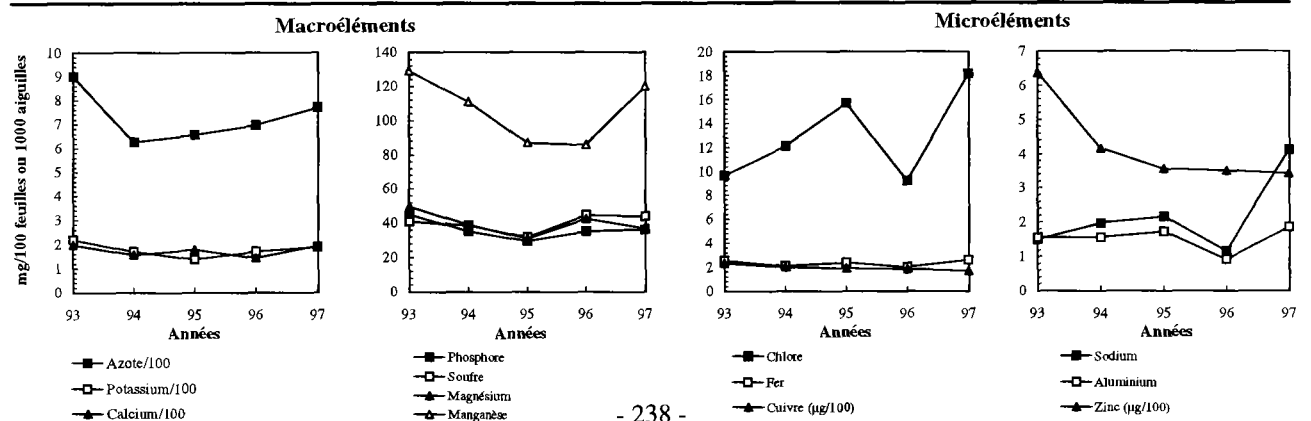
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



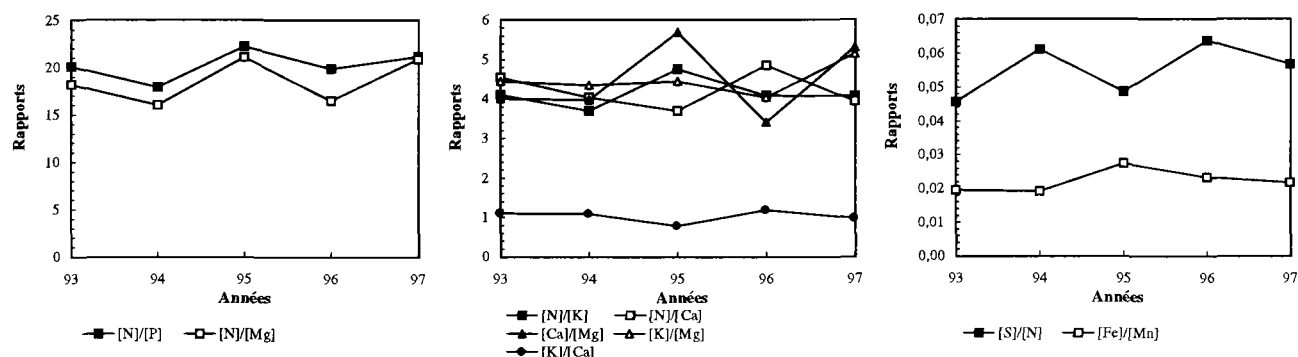
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	9	11	7	14	28	13	26	22	27	46	15	12
Interannuel 93-97 (n=5)	7	7	7	8	12	10	11	12	11	22	45	30	24

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P, K S, Ca		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires sont légèrement faibles pour le phosphore et le potassium. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales 20-40 cm sont faibles (0,5 mg/Kg) et moyennes plus en surface. Les teneurs foliaires en azote, en magnésium et en manganèse sont au contraire élevées. Ce peuplement de chêne sessile est le plus jeune du réseau (55 ans à 1,30 m en 1994) et les accroissements en diamètre sont parmi les plus forts pour cette essence. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 18 %). Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette, à l'exception du zinc pour lequel les coefficients de variation intraplacette et interannuel sont cependant proches.

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale de Rennes (P. 186)

Commune de Liffré (Ile et Vilaine)

Latitude: 48°10'41" N

Longitude: 1°32'01" W

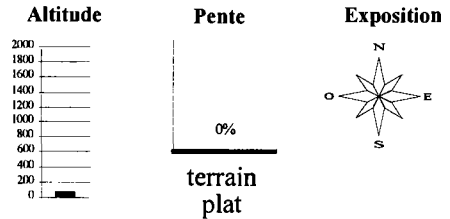
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 101 ± 6

Ho en 1995 (m) : 29,5 ± 1,9

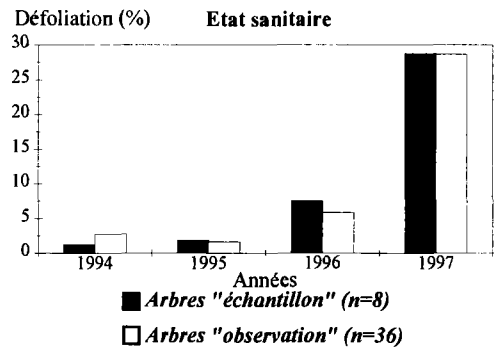
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.41



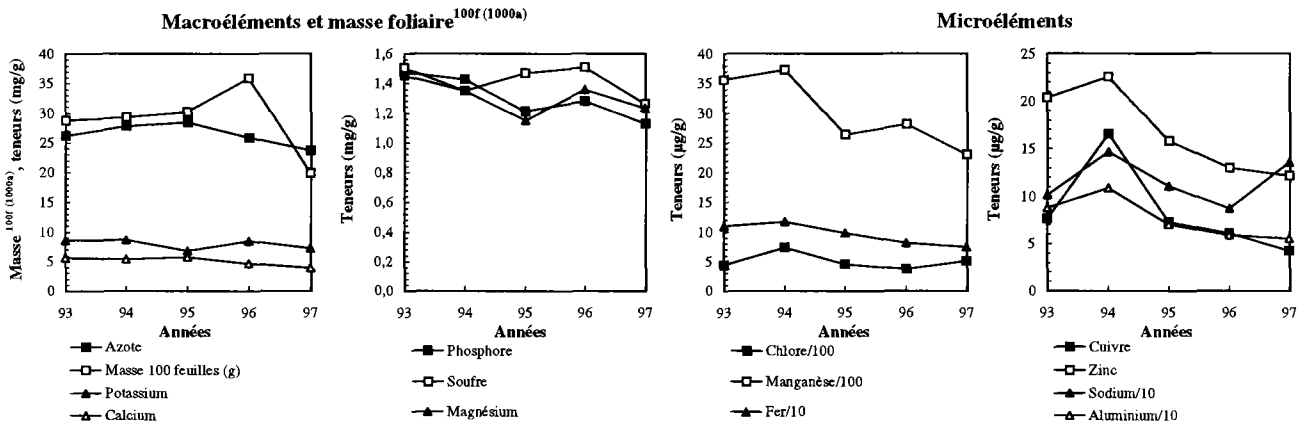
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Sol lessivé acide à pseudogley



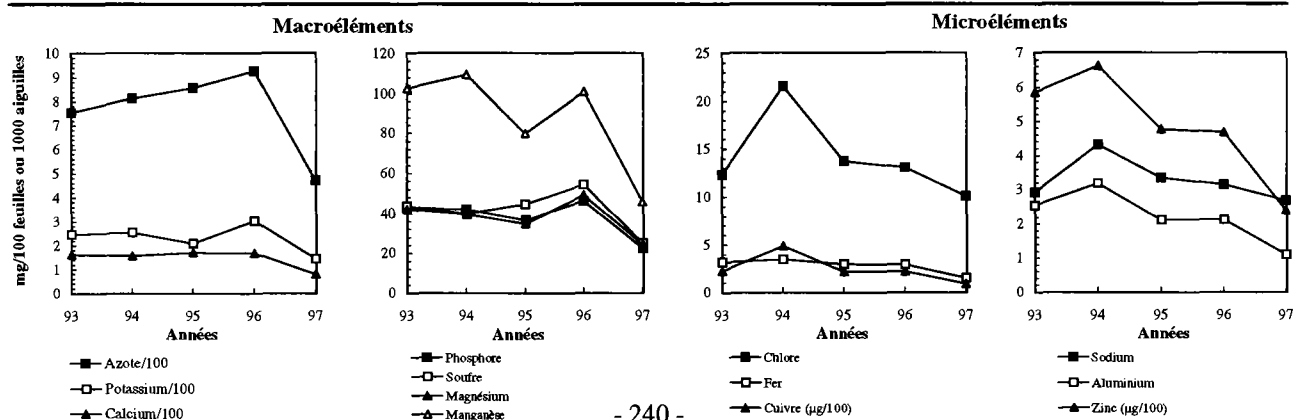
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



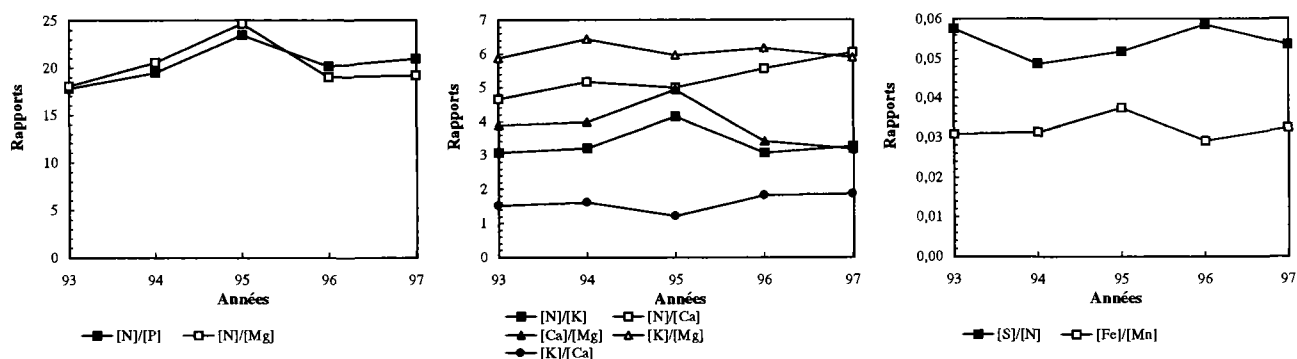
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	16	7	9	16	22	17	24	20	24	36	19	16
Interannuel 93-97 (n=5)	6	10	7	9	13	8	17	18	51	24	19	26	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K		N	P, K, Mg N S, Ca		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn		Mn			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires sont légèrement faibles pour le phosphore, le potassium et le magnésium. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont moyennes et les teneurs en magnésium et en potassium sont faibles (respectivement 0,19 et 0,09 cmol/kg dans les couches 0-10 cm). Les teneurs foliaires en azote et en manganèse sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation, faibles jusqu'en 1996 (< 10 %) sont plus importants en 1997 (entre 25 et 30 %) mais cette augmentation pourrait résulter en partie d'une plus grande sévérité des notations.

Une légère diminution des teneurs foliaires en manganèse (37 à 25 µg/g) est observée entre 1993 et 1997 mais la variabilité intraplacette des valeurs pour cet élément est légèrement supérieure à la variabilité interannuelle (24 % contre 18 %).

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Blois (P. 131)

Commune de Chambon sur Cisse (Loir et Cher)

Latitude: 47°34'09" N

Longitude: 1°15'36" E

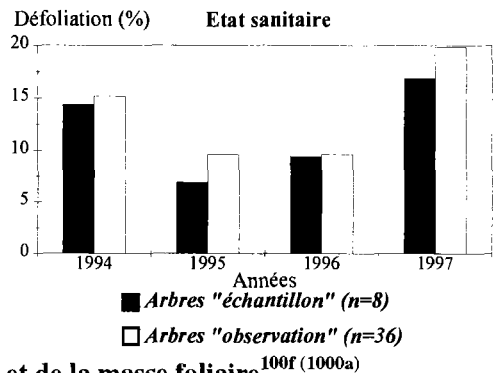
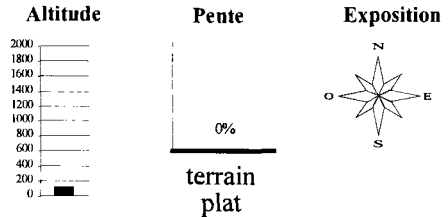
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 92 ± 7

Ho en 1995 (m) : 28,2 ± 1,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.57



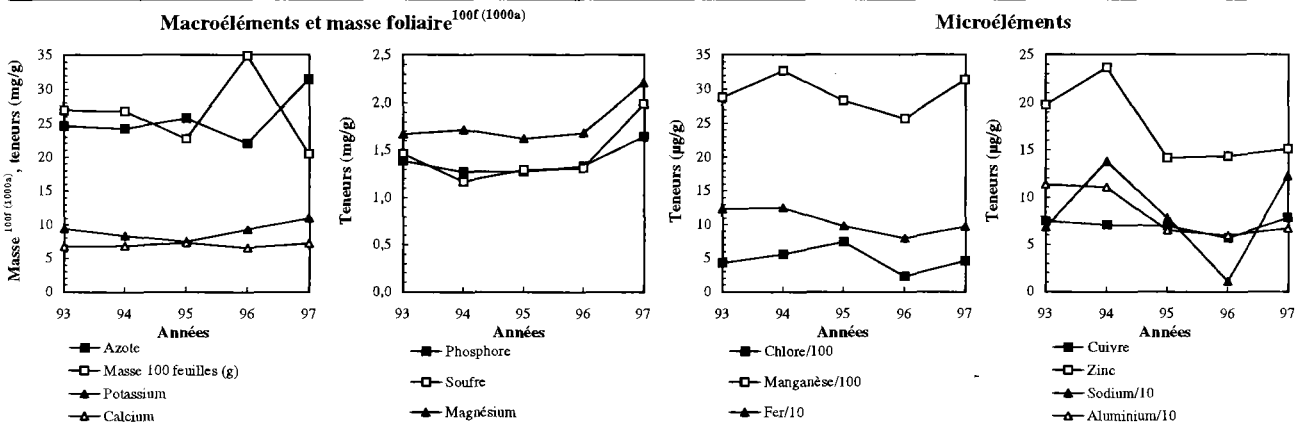
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol lessivé à pseudogley

Pseudogley

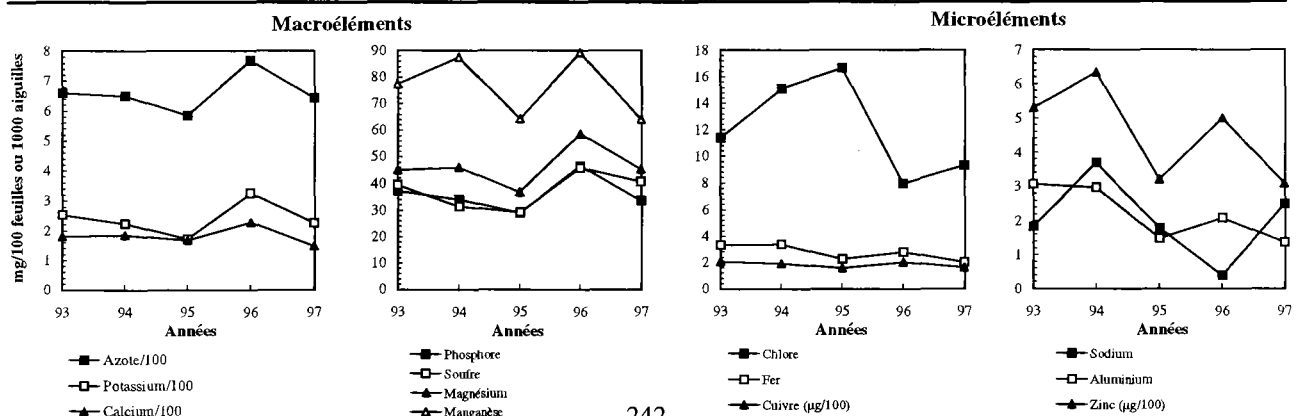
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



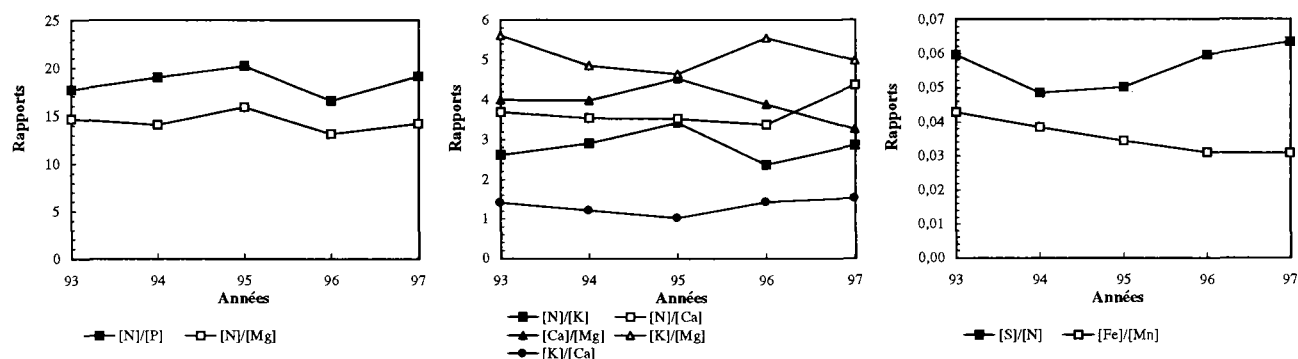
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	16	11	14	12	16	21	28	16	20	47	19	15
Interannuel 93-97 (n=5)	12	10	20	13	4	12	17	8	11	22	53	35	29

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires (100f (1000a))



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P, N, K, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires sont légèrement faibles pour le phosphore (entre les seuils indicatifs de carence et critique). Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont moyennes en surface et très faibles dans les couches 10-20 cm et 20-40 cm (1,7 et 0,0 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en manganèse, en magnésium et en potassium sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %) de 1994 à 1997.

Aucune tendance particulière des teneurs foliaires entre 1993 et 1997 n'est observée sur cette placette.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Chatrices (P. 75)

Commune de Chatrices (Marne)

Latitude: 49°02'00" N

Longitude: 4°57'38" E

Structure du peuplement : Taillis sous futaie strict

Origine : Régénération naturelle progressive

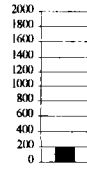
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 139 ± 22

Ho en 1995 (m) : 25,0 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.31



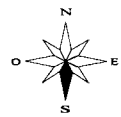
Altitude



Pente

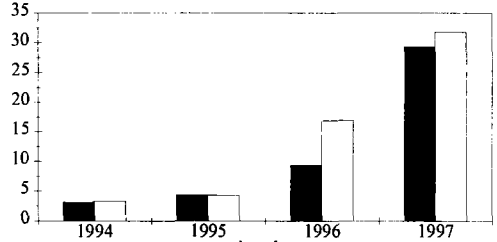


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

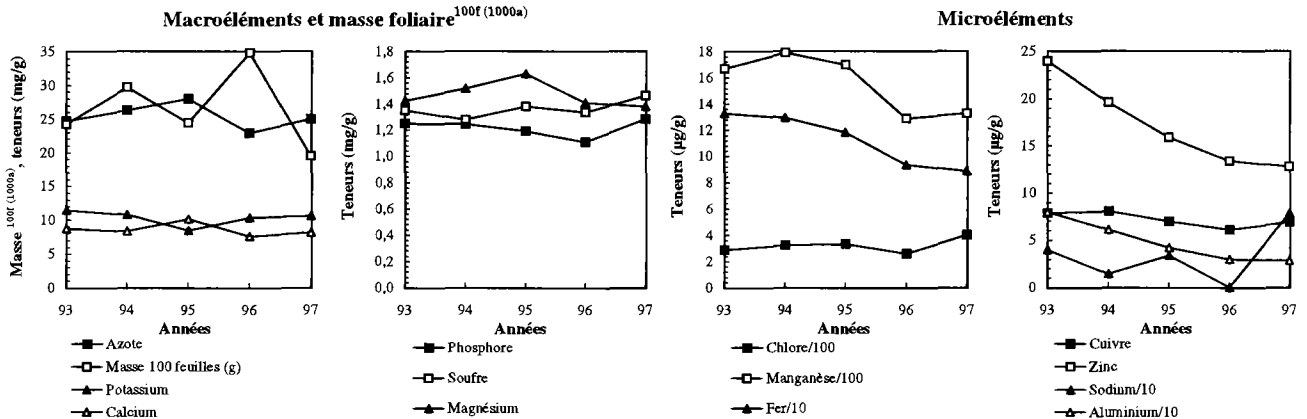


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

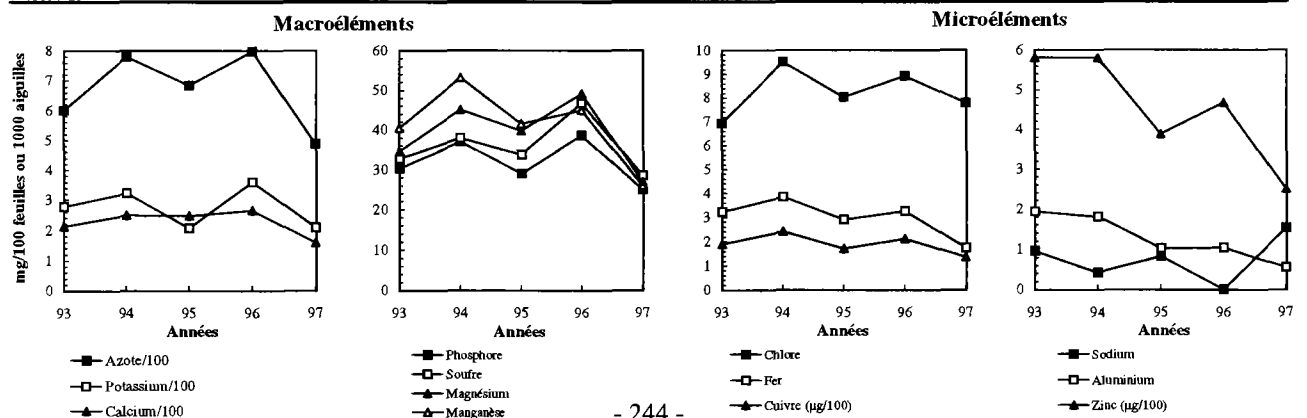
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



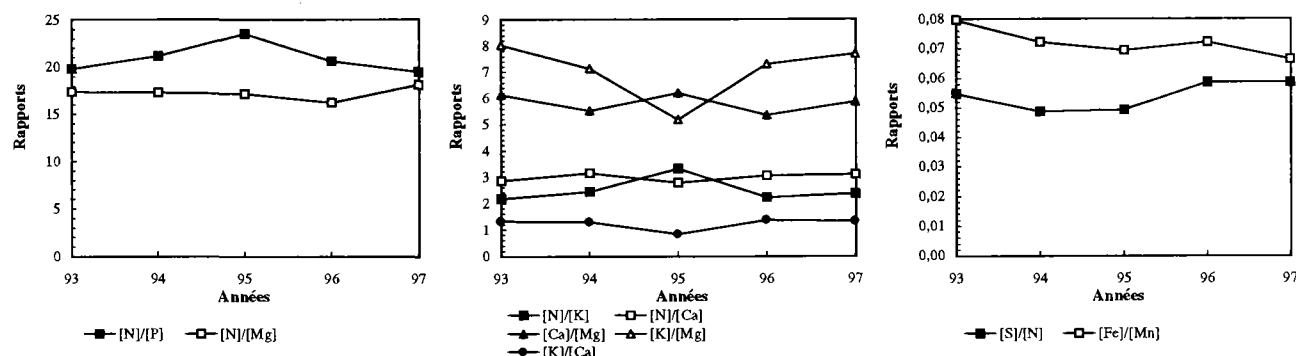
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	18	8	17	26	18	35	38	18	20	36	39	36
Interannuel 93-97 (n=5)	7	5	4	10	10	6	16	13	10	24	80	15	40

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg		N, Ca, K	P, N, K, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs foliaires en phosphore sont faibles (entre les seuils critique et optimum) et les teneurs foliaires en azote, potassium et magnésium sont élevées. Les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes dans les couches minérales jusqu'à 40 cm. L'accroissement annuel en diamètre de ces cinq dernières années (1991 à 1996) a augmenté de 31% par rapport à celui de ces dix dernières années (1985-1994) mais la variabilité interannuelle de la croissance radiale est forte dans ce peuplement (cf. Lebourgeois, 1997). Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1996 (< 15 %); ils atteignent 30 % en 1997 mais cette augmentation pourrait résulter en partie d'une plus grande sévérité des notations.

Les teneurs en zinc diminuent entre 25 et 15 µg/g entre 1993 et 1997.

Cette placette est la plus âgée des placettes de chêne sessile du réseau avec CHS 68 (139 ans à 1,30 m en 1994) ce qui pourrait conduire à utiliser des valeurs de seuils indicatifs plus faibles.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Amelecourt (P. 35 A)

Commune de Fonteny (Moselle)

Latitude: 48°52'18" N

Longitude: 6°29'02" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

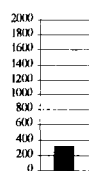
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 85 ± 2

Ho en 1995 (m) : 27,7 ± 1,2

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.62



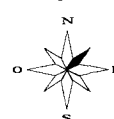
Altitude



Pente

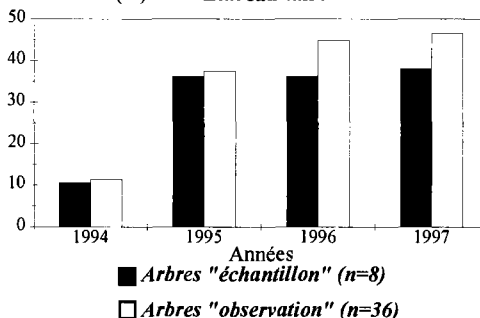


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

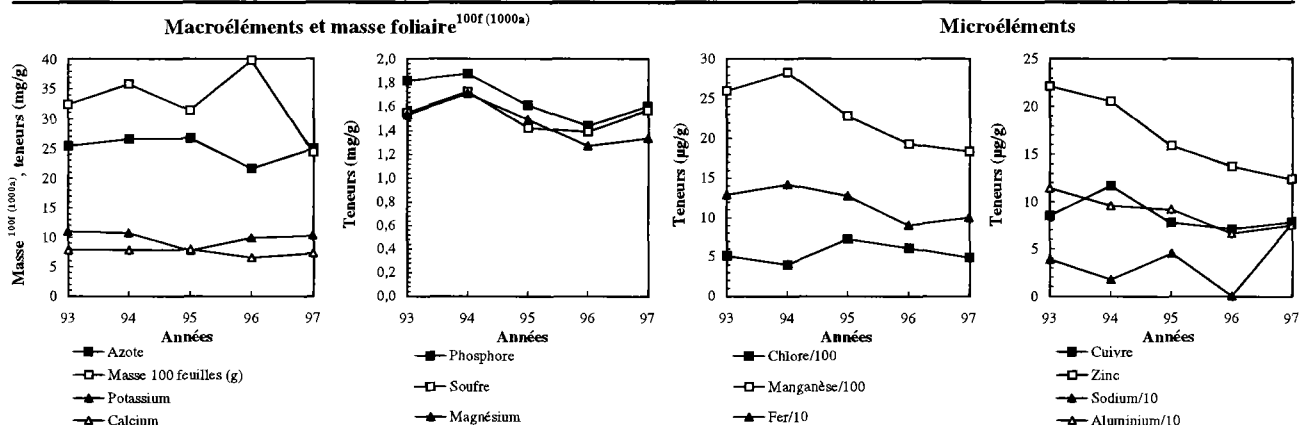


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinionion betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé à pseudogley

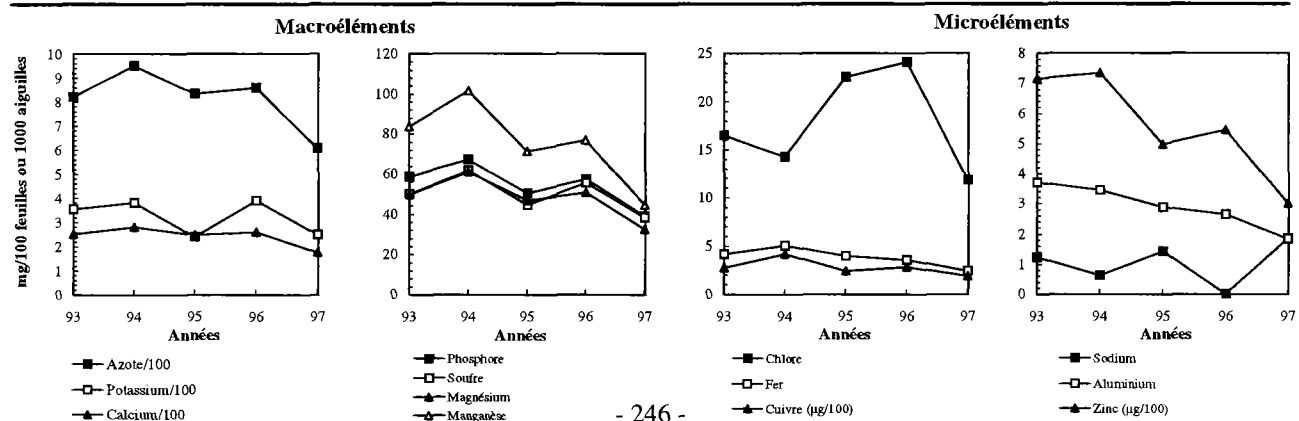
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



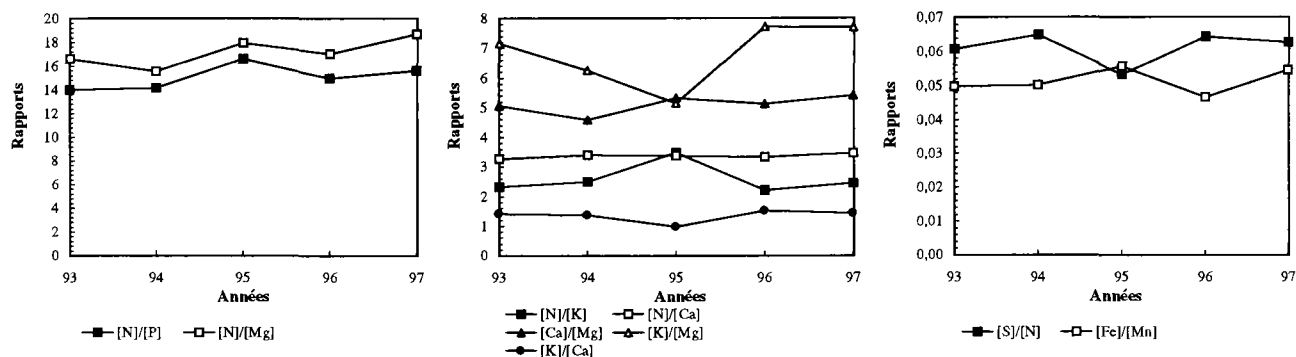
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	13	6	20	33	27	87	28	50	27	63	31	126	
Interannuel 93-97 (n=5)	7	10	8	12	7	10	17	17	19	22	73	20	19	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant avec cependant des teneurs foliaires élevées en azote, phosphore, potassium et magnésium. La croissance en diamètre de ces 3 dernières années est plus forte que celle des 10 dernières années (cf. Lebourgeois, 1997). Cette augmentation de la croissance radiale est probablement liée à l'éclaircie de 1990. Lebourgeois (1997) remarque que depuis les années 1980, la croissance augmente. Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1994 (environ 10 %) et importants depuis 1995 (entre 40 et 50 %) des notations plus sévères pourraient expliquer une partie de cette augmentation.

Les teneurs en manganèse et en zinc diminuent légèrement entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Mouterhouse (P. 49)

Commune de Mouterhouse (Moselle)

Latitude: 49°00'59" N

Longitude: 7°27'45" E

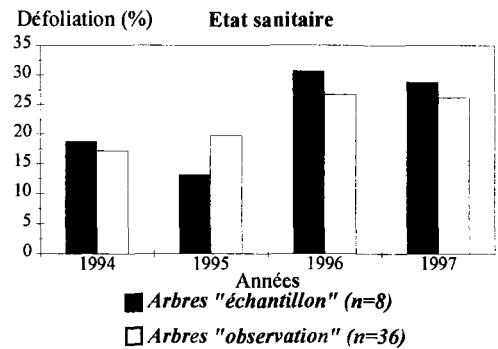
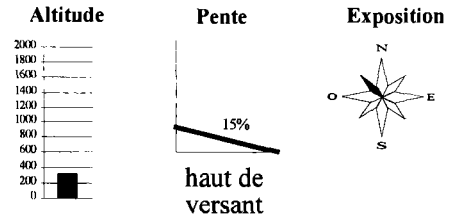
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 128 ± 5

Ho en 1995 (m) : 28,6 ± 1,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.14

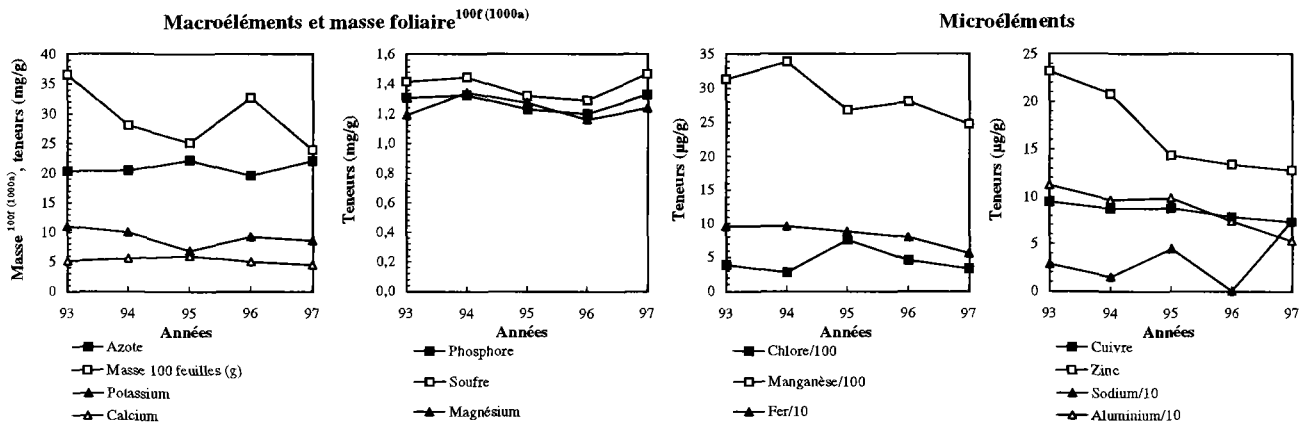


Végétation : *Luzulo luzuloidis-Fagenion sylvaticae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Podzol à horizon E peu épais

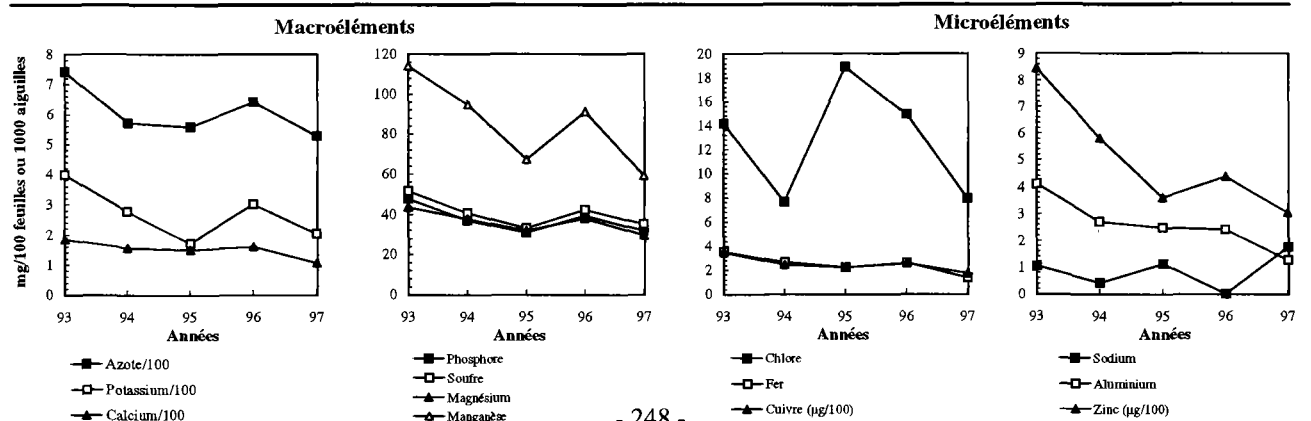
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



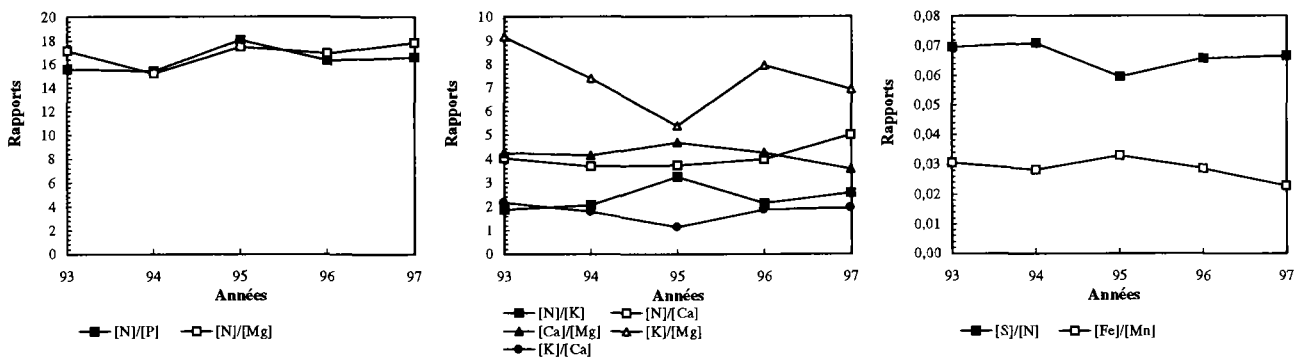
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	13	12	18	16	21	16	10	25	13	42	27	24	
Interannuel 93-97 (n=5)	5	4	5	15	10	5	18	11	9	25	78	38	24	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			N, P, Mg, S, Ca, K		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en azote, en phosphore et en magnésium sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en azote dans les couches minérales sont faibles, notamment dans les couches 10-20 cm et 20-40 cm (respectivement 0,6 et 0,4 g/Kg) mais les teneurs en azote total dans les couches holorganiques sont moyennes à élevées (17,4 g/Kg). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont très faibles uniquement dans les couches 20-40 cm. Les teneurs foliaires en potassium et en manganèse sont au contraire élevées. Cette placette présente un des plus faibles accroissements en surface terrière (avec CHS 68) parmi les peuplements de chêne sessile (0,14 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1994 et 1995 (entre 15 et 20 %); ils sont d'environ 30 % en 1996 et 1997 mais des notations plus sévères pourraient expliquer une partie de cette augmentation.

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure.

Ce peuplement est un des plus vieux peuplements du réseau (128 ans à 1,30 en 1994), ce qui pourrait expliquer le faible accroissement observé. Les seuils indicatifs pour les teneurs foliaires devraient également être adaptés pour ces arbres.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Vincence (P. 64)

Commune de Biches (Nièvre)

Latitude: 46°58'13" N

Longitude: 3°39'39" E

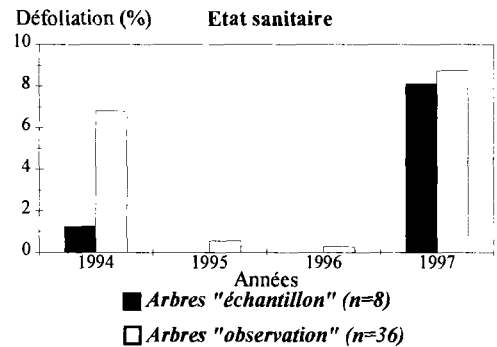
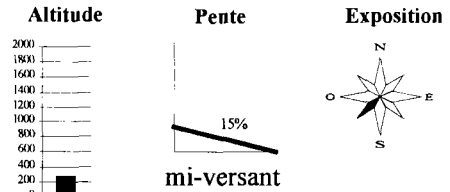
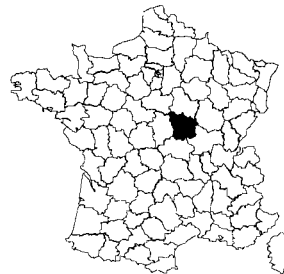
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 61 ± 2

Ho en 1995 (m) : 23,5 ± 1,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.59



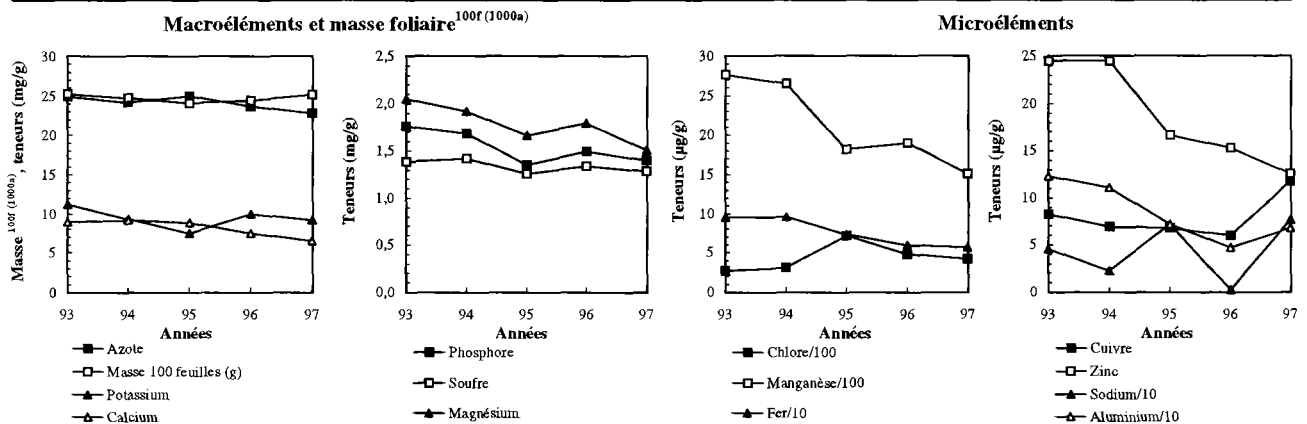
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun lessivé à pseudogley

Sol brun lessivé glossique

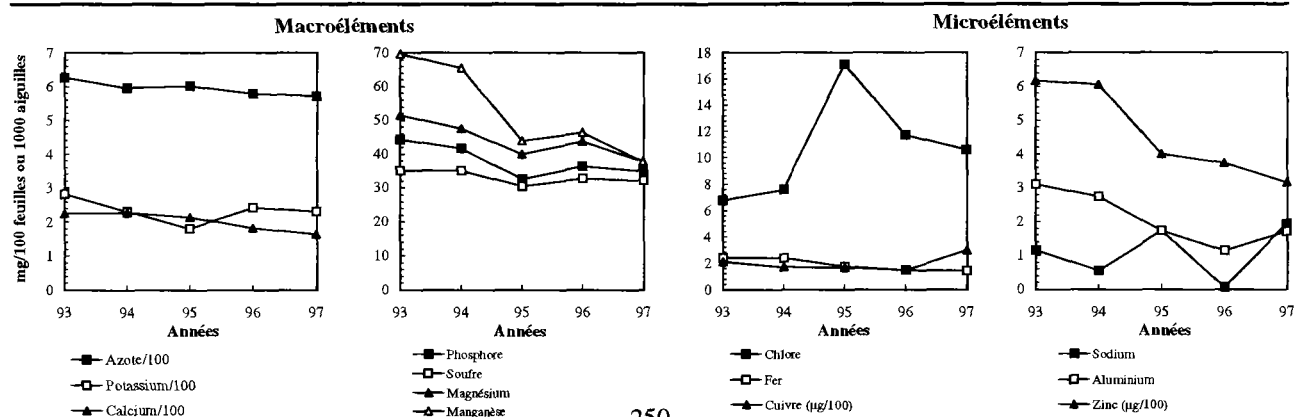
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



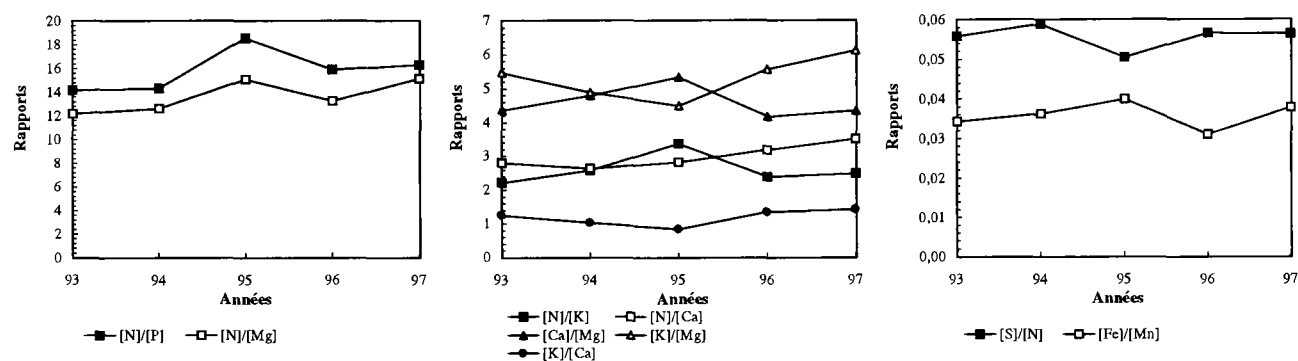
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	11	12	12	18	18	15	25	126	26	58	35	8
Interannuel 93-97 (n=5)	3	10	4	13	13	11	22	23	26	26	65	36	34

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Mg, K			N, P, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, avec des teneurs fortes en azote, en phosphore, en potassium et en magnésium. Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 10 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure à l'exception d'une légère diminution du magnésium et du manganèse.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Hez-Froidmont (P. 36)

Commune de La Neuville en Hez (Oise)

Latitude: 49°23'51" N

Longitude: 2°18'00" E

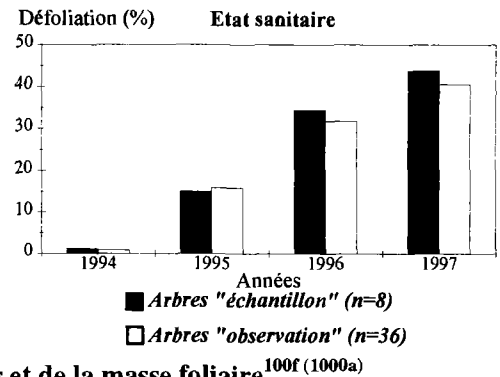
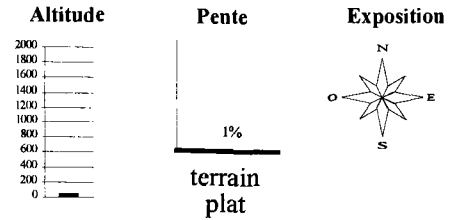
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 60 ± 4

Ho en 1995 (m) : 25,2 ± 1,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.59



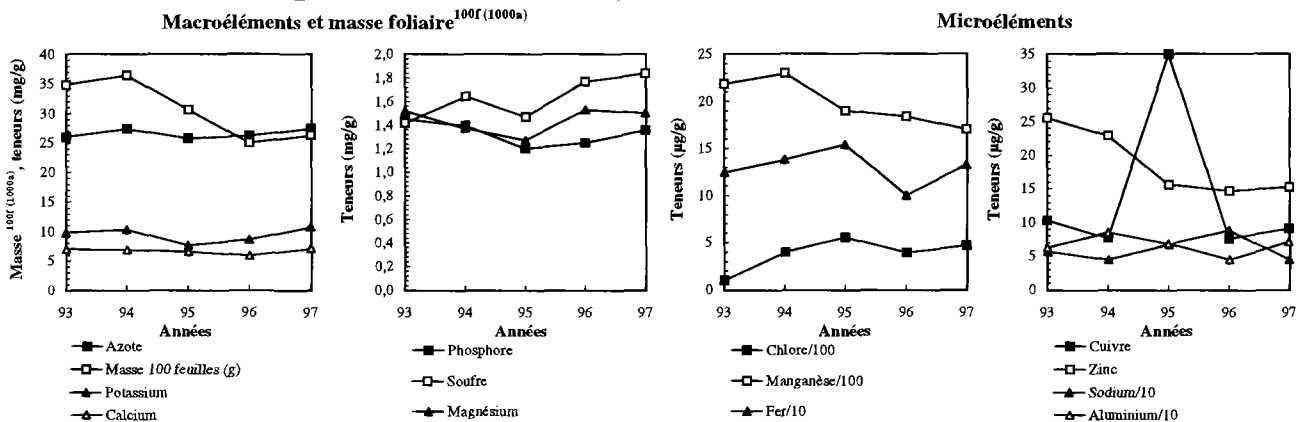
Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinionion betuli*

Humus : Moder - Oligomull

Type de sol : Sol ocre podzolique à pseudogley

Pseudogley primaire

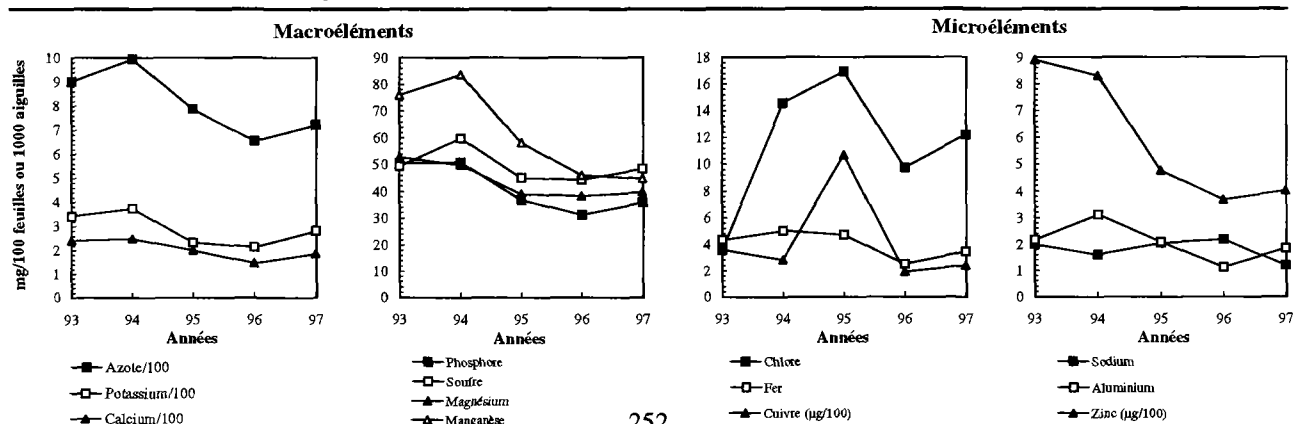
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



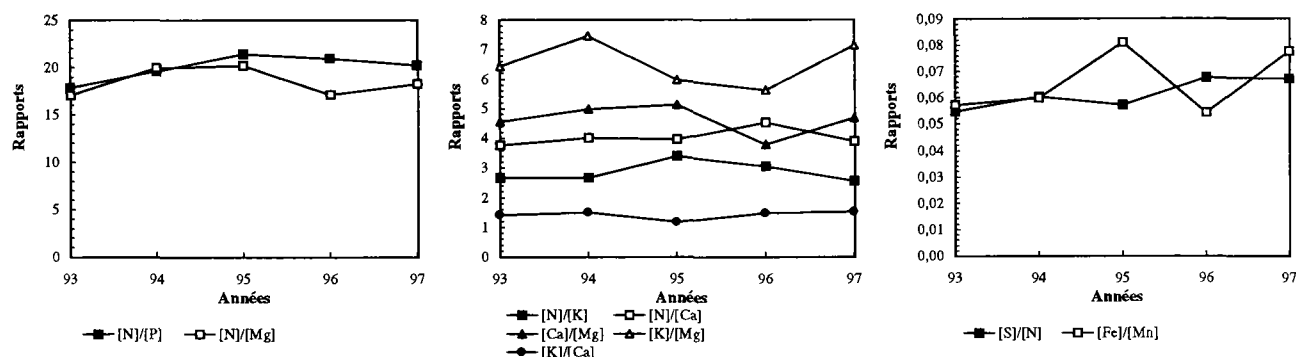
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	13	22	18	17	17	17	39	56	29	36	22	24	30
Interannuel 93-97 (n=5)	3	7	10	12	7	7	14	11	76	24	27	40	20

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg, K			P N, K, Mg S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Zn			Cu		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles, uniquement dans la couche 20-40 cm (1,9 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en potassium, en magnésium et en cuivre sont au contraire élevées. L'accroissement annuel moyen en diamètre est le plus fort de tous les peuplements de chêne sessile (0,73 cm/an entre 1992 et 1995). C'est aussi un des plus jeunes peuplements. Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1994 et 1995 (< 20 %), ils atteignent 40 à 50 % en 1996 et 1997, mais des notations plus sévères pourraient expliquer une partie de cette augmentation.

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure. On remarque cependant une légère diminution des teneurs foliaires en manganèse et en zinc. La teneur foliaire en cuivre, environ 4 fois plus importantes en 1995 que les autres années, pourrait être due à un problème analytique. Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1994, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Reno Valdeu (P. 54)

Commune de Saint-Victor de Reno (Orne)

Latitude: 48°31'23" N

Longitude: 0°40'48" E

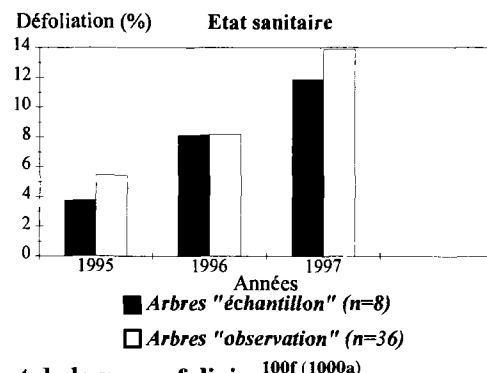
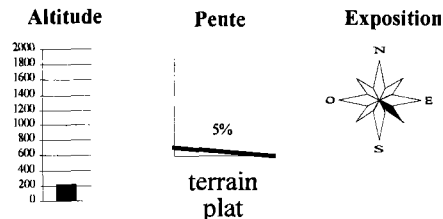
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 88 ± 2

Ho en 1995 (m) : 26,8 ± 1,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.81



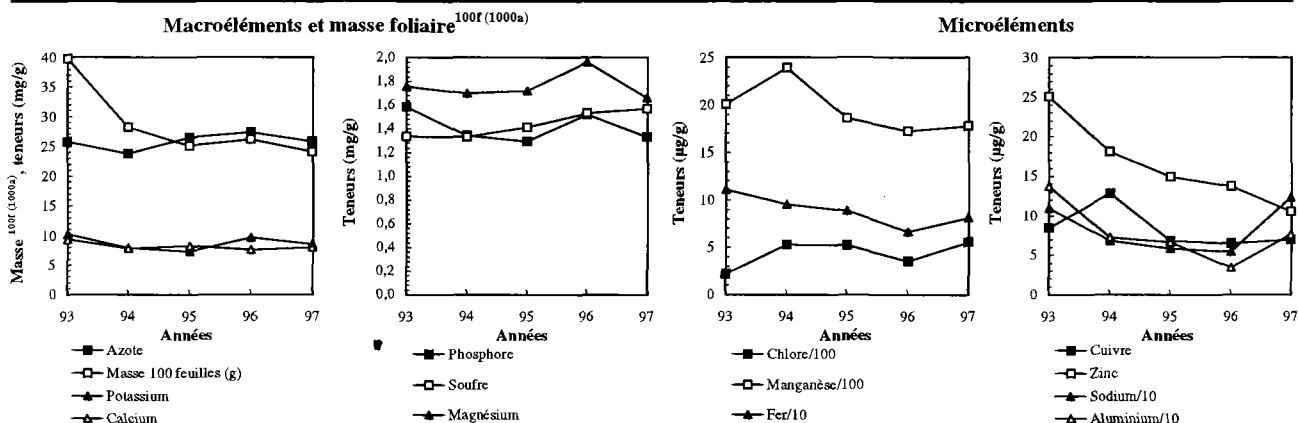
Végétation : *Carpinus betuli*

Humus : Oligomull - Mésomull

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé hydromorphe

Sol brun à hydromorphie de profondeur

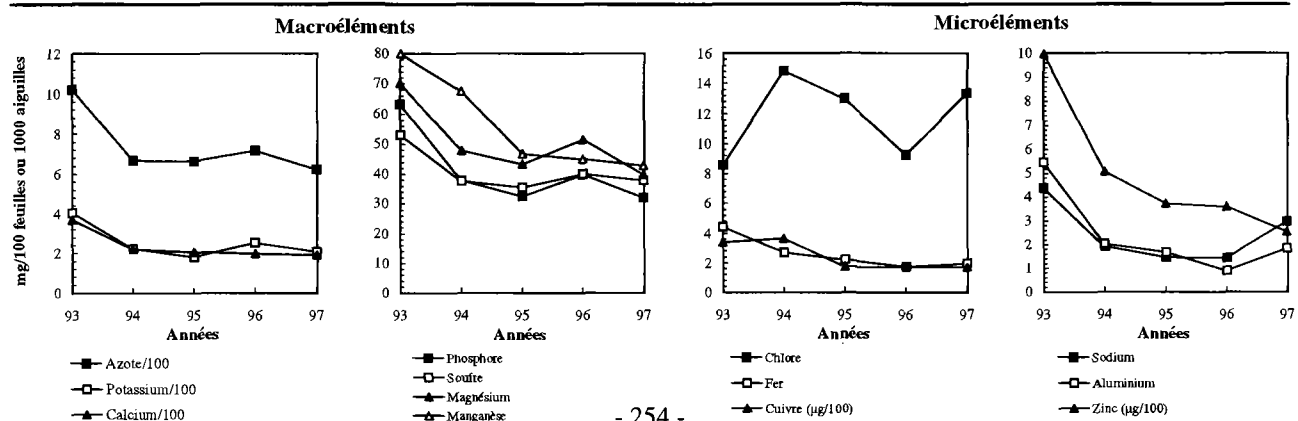
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



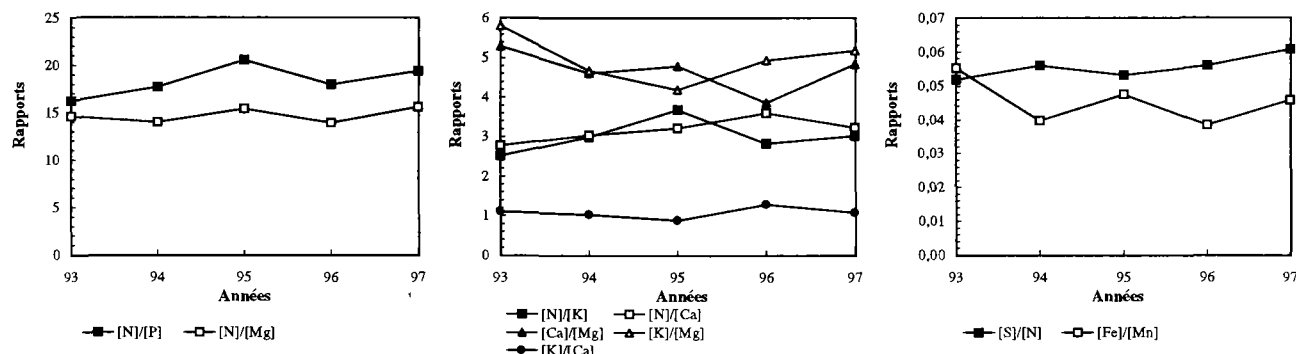
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	9	6	14	16	17	14	20	54	18	51	18	12
Interannuel 93-97 (n=5)	5	8	7	13	7	6	17	12	28	30	34	30	43

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg, K		N, Ca		P	N, K, Mg S, Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles dans les couche 10-20 cm et 20-40 cm (respectivement 1,9 et 0,0 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en potassium et en magnésium sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure mis à part pour le zinc.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de la Hardt (P. 237 S)

Commune de Schlierbach (Haut Rhin)

Latitude: 47°41'33" N

Longitude: 7°28'06" E

Structure du peuplement : Taillis sous futaie en conversion

Origine : Régénération naturelle

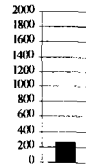
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 137 ± 27

Ho en 1995 (m) : 21,6 ± 1,4

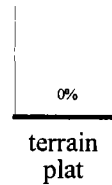
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : -0.38



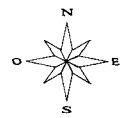
Altitude



Pente

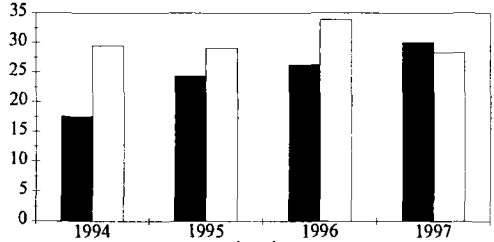


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

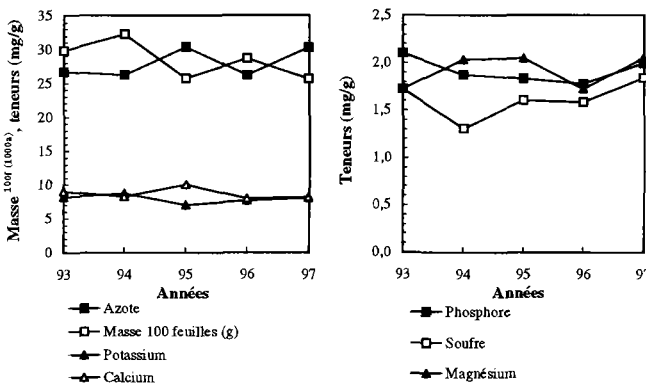
Végétation : *Stellario holosteeae-Carpinetum betuli*

Humus : Eumull

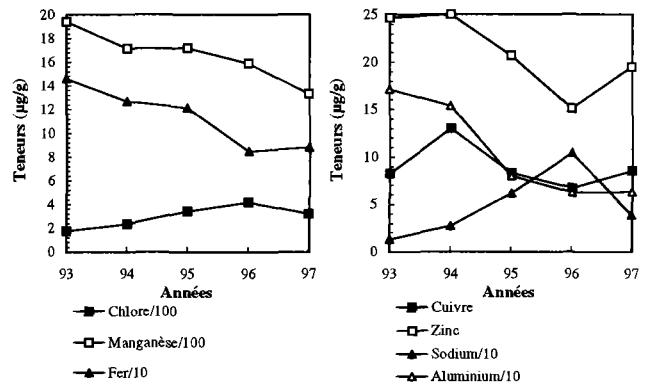
Type de sol : Sol brun polycyclique rubéfié

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire^{100f (1000a)}



Microéléments



Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

Macroéléments

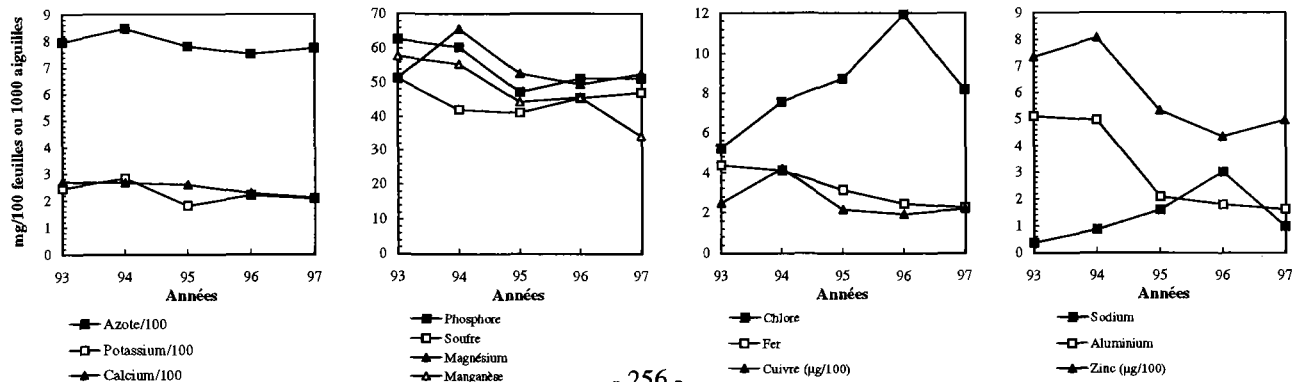
Microéléments

	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	15	11	16	23	19	15	17	15	28	68	30	23
Interannuel 93-97 (n=5)	7	6	11	7	9	8	21	12	24	17	66	28	44

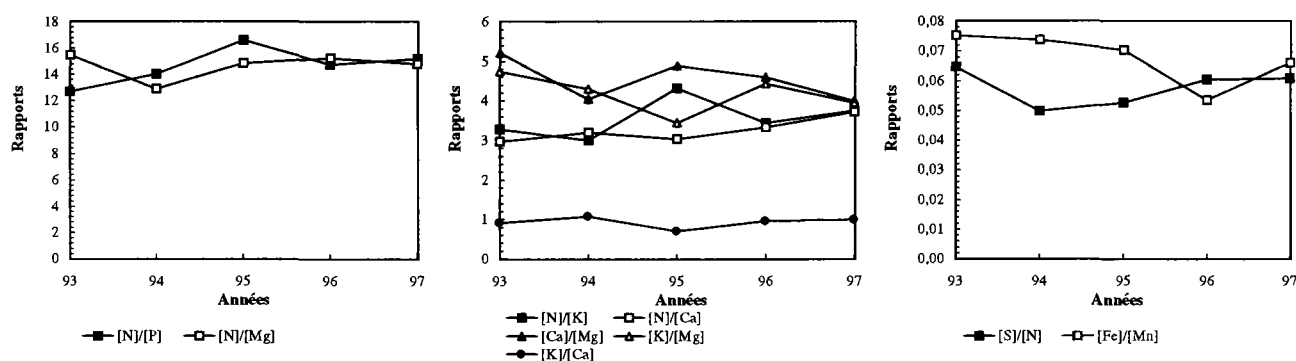
Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}

Macroéléments

Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	Mg, K		N, P, Ca	K, N, P, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en potassium sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs foliaires en azote, en phosphore et en magnésium sont au contraire élevées. L'accroissement annuel moyen en diamètre est le plus faible de tous les peuplements de chêne sessile (0,23 cm/an entre 1992 et 1995) mais c'est un taillis-sous-futaie en conversion. Les pourcentages de défoliation sont peu importants entre 1994 et 1997 (autour de 25 %).

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure mis à part pour le manganèse et l'aluminium.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Bercé (P. 143 p)

Commune de Jupilles (Sarthe)

Latitude: 47°47'46" N

Longitude: 0°22'49" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

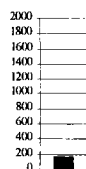
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 64 ± 4

Ho en 1995 (m) : 23,5 ± 2,5

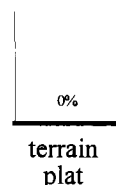
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : -0.12



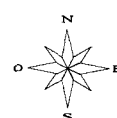
Altitude



Pente

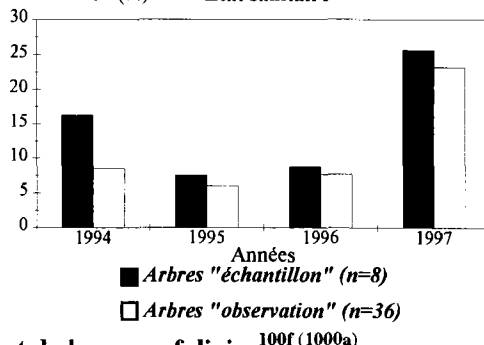


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

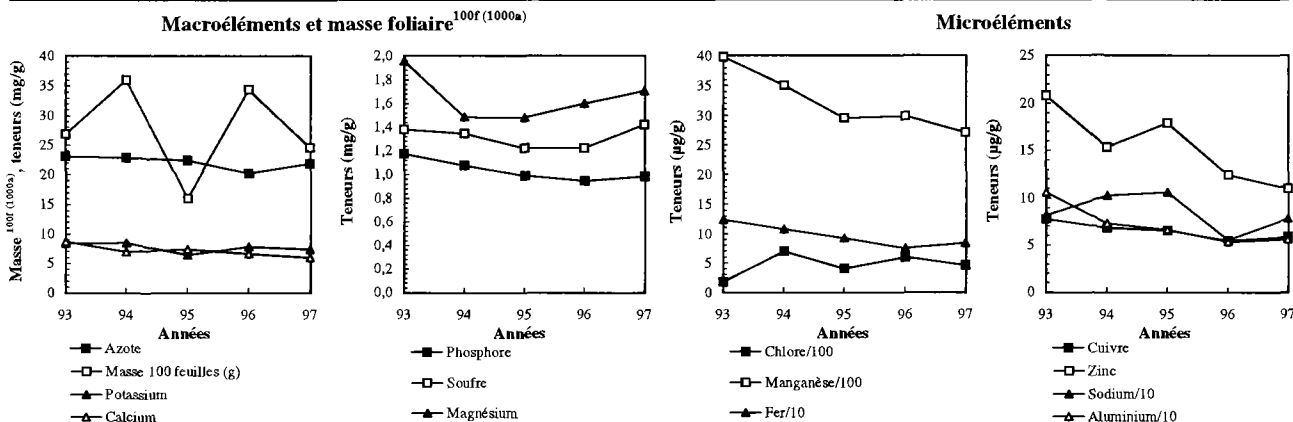


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Oligomull - Moder

Type de sol : Sol brun lessivé à pseudogley

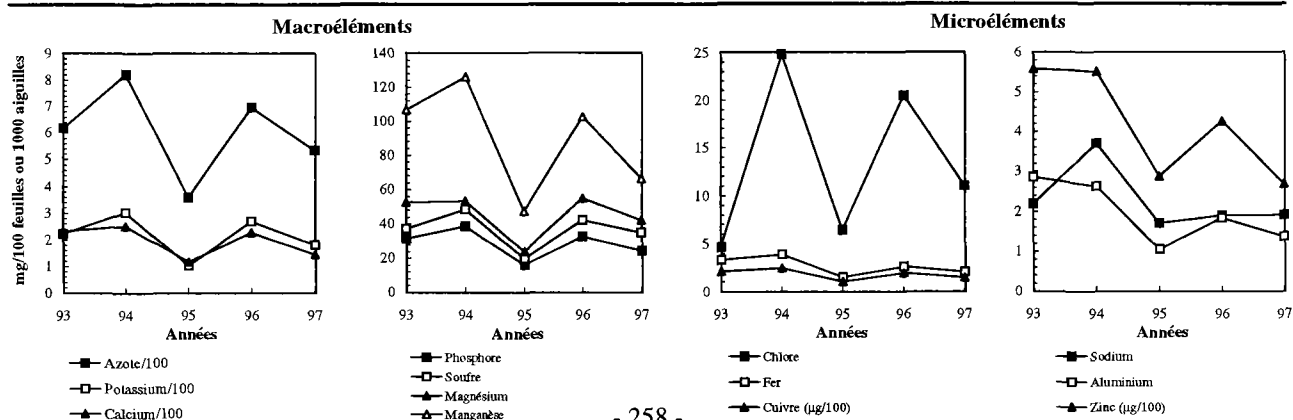
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



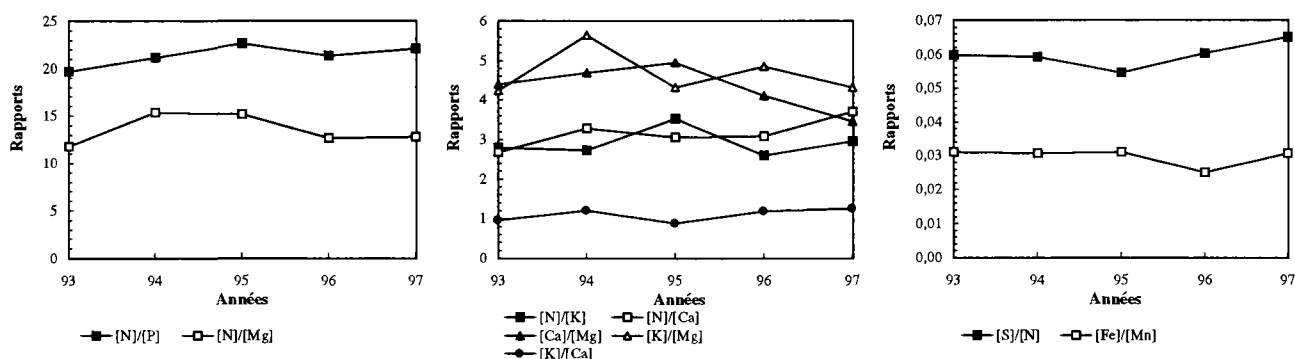
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	15	17	12	12	21	16	22	23	18	16	32	18	10
Interannuel 93-97 (n=5)	5	8	6	9	13	11	18	14	12	23	22	38	27

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			P	K	N, Mg, S, Ca
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant sauf pour le phosphore dont les teneurs foliaires sont inférieures au seuil indicatif critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles, uniquement dans la couche 20-40 cm (0,0 mg/Kg). Les teneurs foliaires en potassium sont entre le seuil critique et optimal. Par contre, les teneurs en azote, en magnésium et en manganèse sont élevées. Les pourcentages de défoliation sont peu importants entre 1994 et 1996 (inférieur à 17 %) et atteignent 27 % en 1997.

Les teneurs foliaires en manganèse, en zinc et en aluminium diminuent entre 1993 et 1997 mais la variabilité intraplacette est plus importante que la variabilité interannuelle.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Grésigne (P. 76)

Commune de Castelnaud de Montmirail (Tarn)

Latitude: 44°02'44" N

Longitude: 1°44'56" E

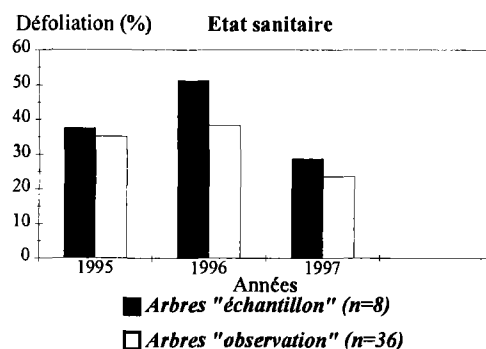
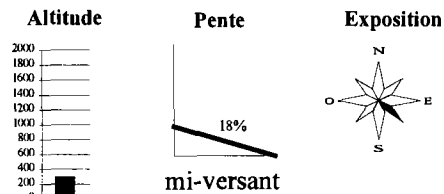
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 98 ± 3

Ho en 1995 (m) : 28,0 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.50



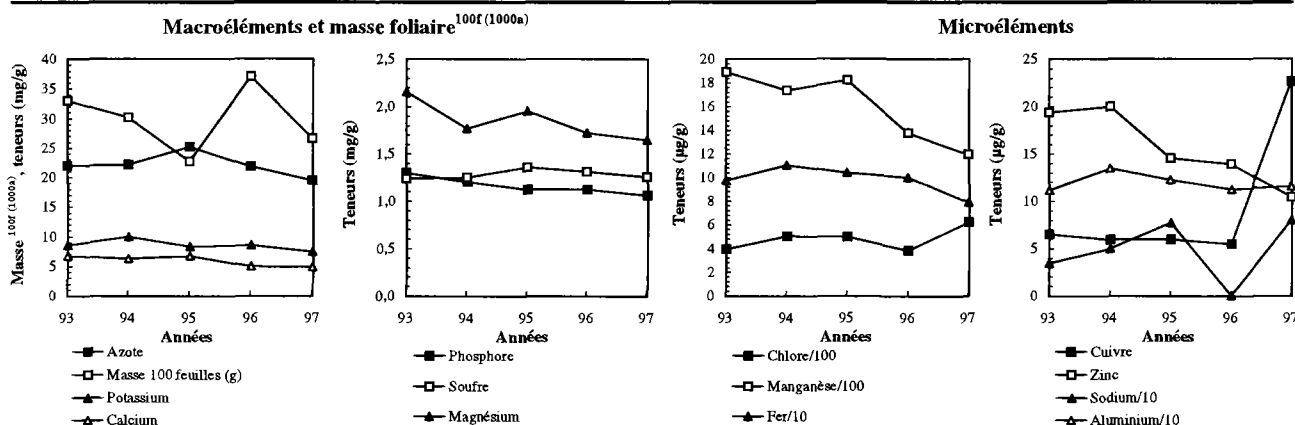
Végétation : *Hyperico androsaemi-Carpinion betuli*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé

Sol brun lessivé

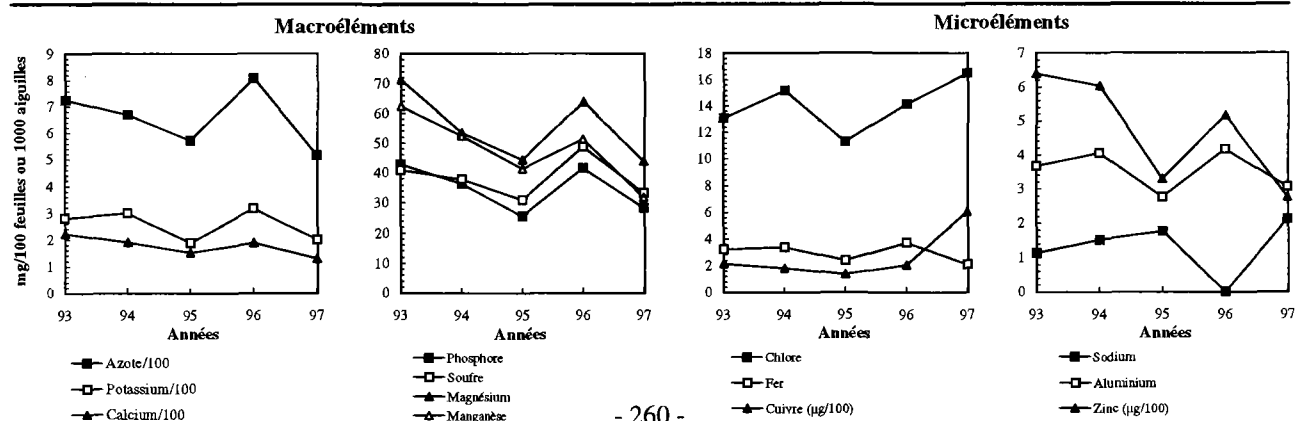
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



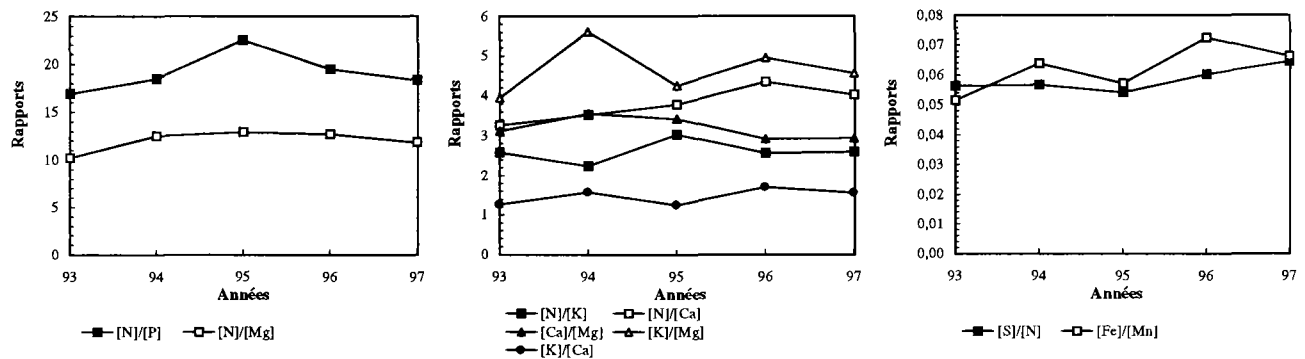
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	12	6	18	17	19	9	25	210	15	56	39	28
Interannuel 93-97 (n=5)	8	7	4	9	14	10	11	17	72	23	61	18	7

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			S	P	N, K, Mg Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en soufre sont entre le seuil de carence et le seuil critique et les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles, uniquement dans la couche 20-40 cm (0,0 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en potassium et en magnésium sont au contraire élevées. Un maximum de pourcentages de défoliation est atteint en 1996 avec 50 % mais ces valeurs élevées pourraient être dues partiellement à des notations sévères.

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure, mis à part une légère diminution des teneurs foliaires en magnésium, en zinc et en manganèse.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Moulière (P. 242)

Commune de Liniers (Vienne)

Latitude: 46°37'38" N

Longitude: 0°29'44" E

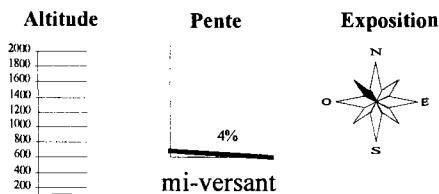
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 82 ± 4

Ho en 1995 (m) : 25,1 ± 1,2

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.90

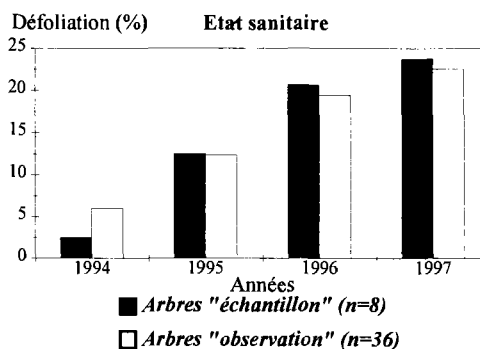


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

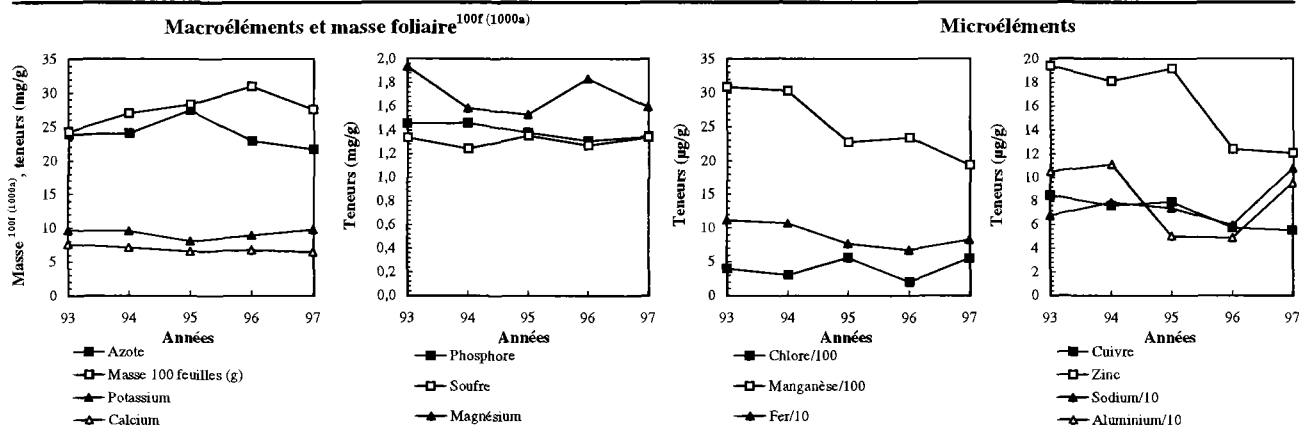
Humus : Moder

Type de sol : Sol brun acide

Sol brun lessivé



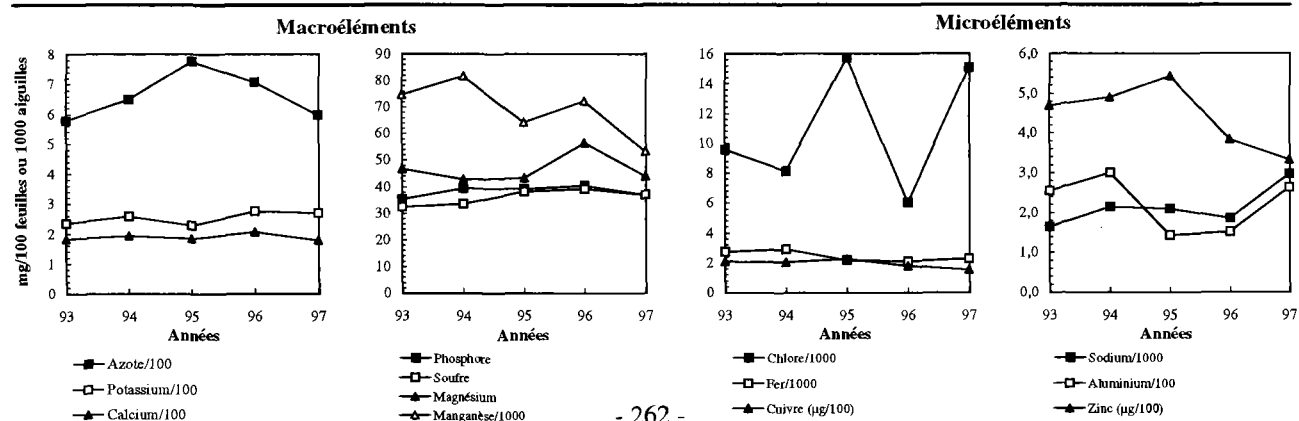
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



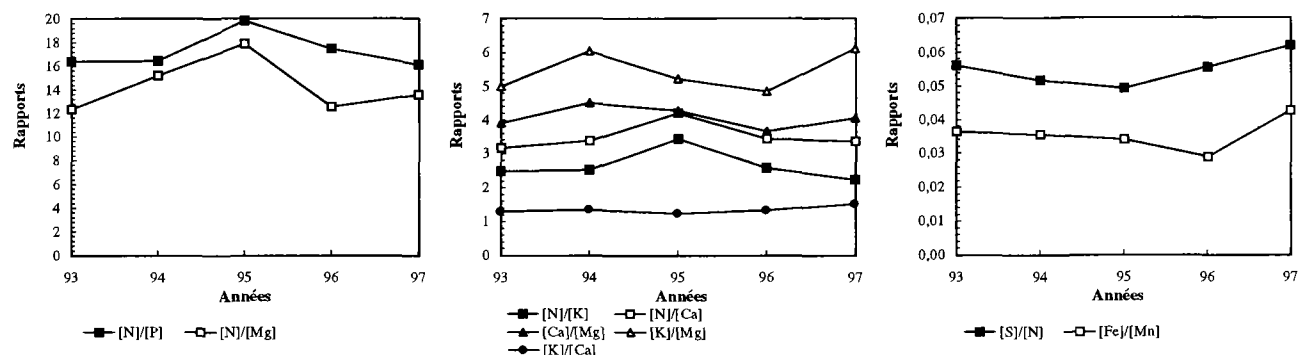
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	5	17	8	25	20	17	17	29	13	18	30	26	14	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	4	3	7	6	9	20	18	17	20	21	35	33	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			P	N, K, Mg, S, Ca	
Microéléments :	Fe, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles dans les couches 10-20 cm et 20-40 cm (respectivement 0,5 et 0,0 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en potassium, en magnésium et en manganèse sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation augmentent régulièrement depuis 1994 sans dépasser 25 %, des notations plus sévères pourraient expliquer une partie de cette augmentation. Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure, mis à part une légère diminution des teneurs foliaires en manganèse et en zinc.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Darney (P. 217)

Commune de Claudon (Vosges)

Latitude: 48°01'36" N

Longitude: 6°02'24" E

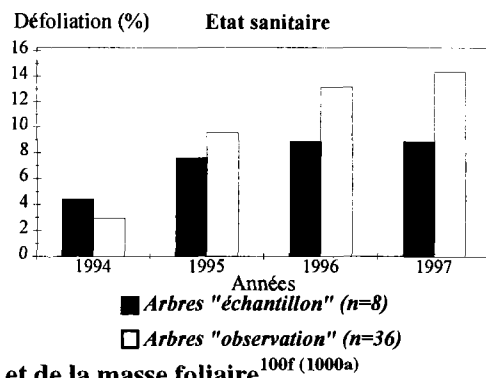
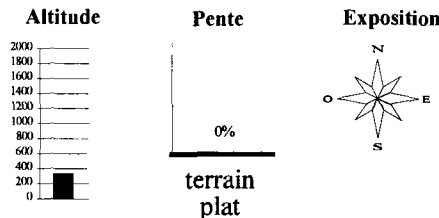
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 129 ± 18

Ho en 1995 (m) : 25,9 ± 1,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.43



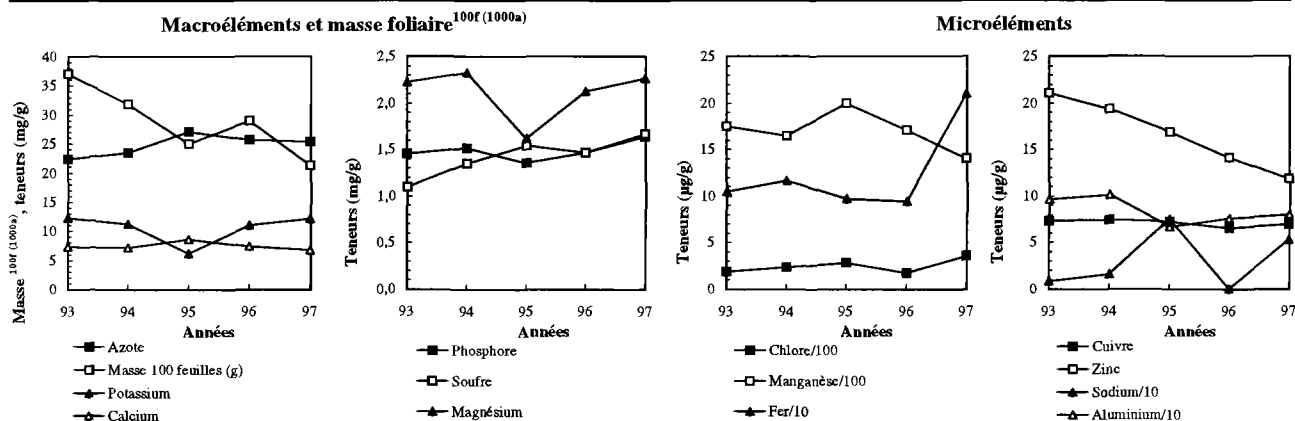
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Eumull

Type de sol : Sol brun lessivé à pseudogley

Pseudogley-Pélosol

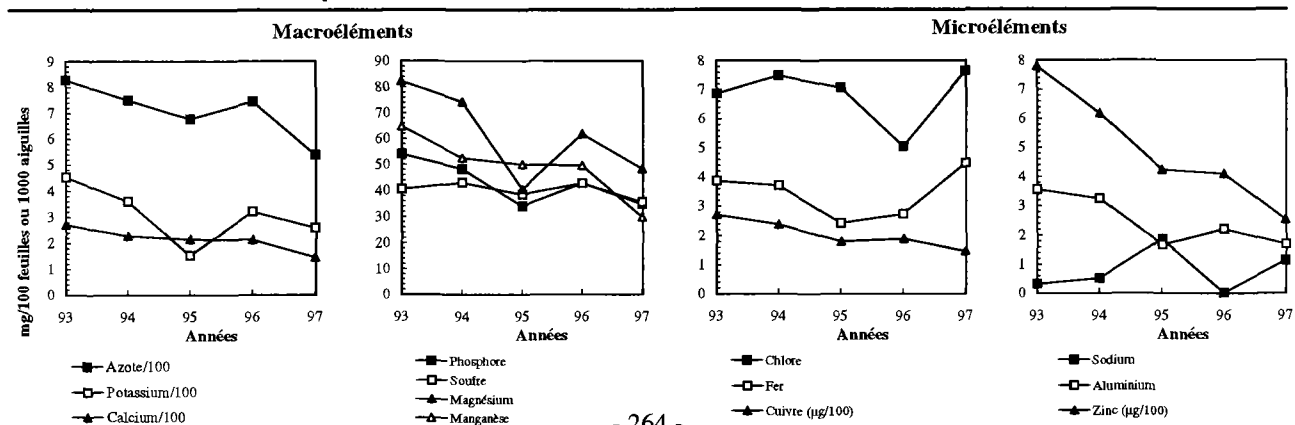
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



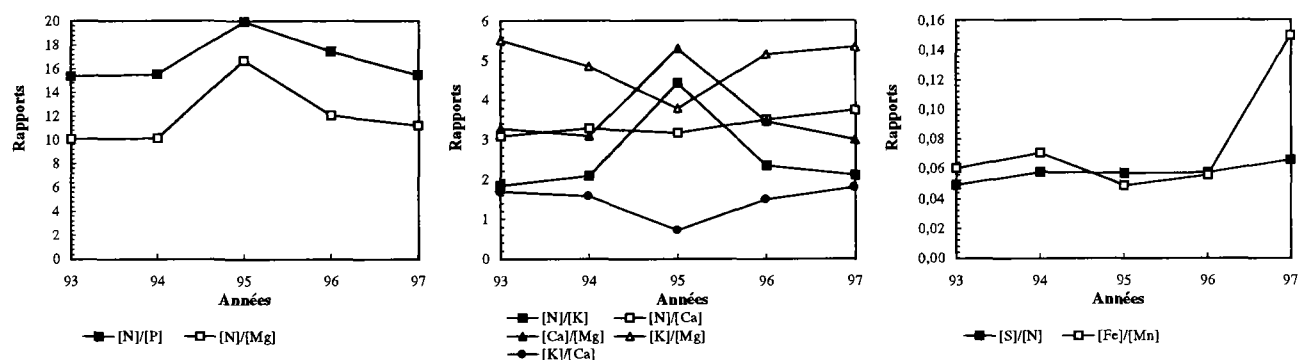
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	8	10	15	29	16	183	25	24	11	85	28	41	
Interannuel 93-97 (n=5)	7	6	14	21	8	12	35	11	5	20	94	27	15	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg			P, N, K, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont pourtant moyennes jusqu'à 40 cm (11,5; 8,5 et 4,8 mg/Kg pour respectivement les couches 0-10; 10-20 et 20-40 cm). Les teneurs foliaires en azote, en potassium et en magnésium sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation sont faibles depuis 1994 (< 15 %).

Une augmentation des teneurs foliaires en soufre et une diminution du zinc est à noter.

C'est un peuplement âgé (129 ans à 1,30 m en 1994), les valeurs des seuils indicatifs pourraient donc être ajustées en fonction de l'âge des arbres.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là, (voir en particulier les teneurs en fer).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Nonnenhardt (P. 26)

Commune de Langensoultzbach (Bas Rhin)

Latitude: 48°59'25" N

Longitude: 7°43'46" E

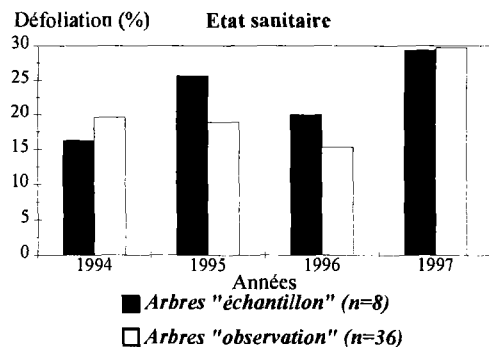
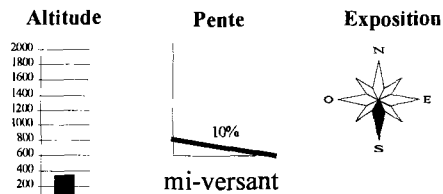
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle et semis de gland

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 76 ± 4

Ho en 1995 (m) : 24,9 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.46

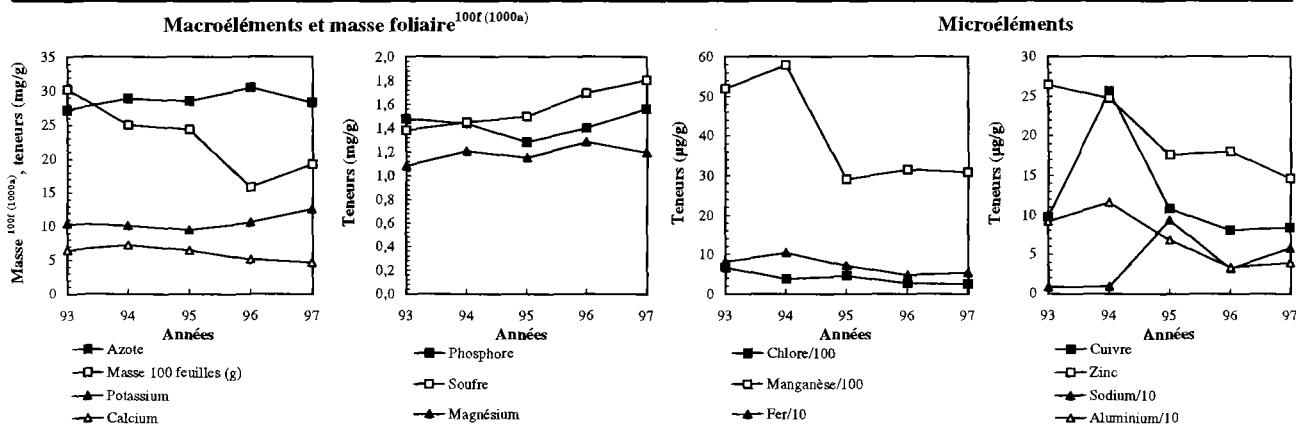


Végétation : *Luzulo luzuloidis-Fagenion sylvaticae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun acide

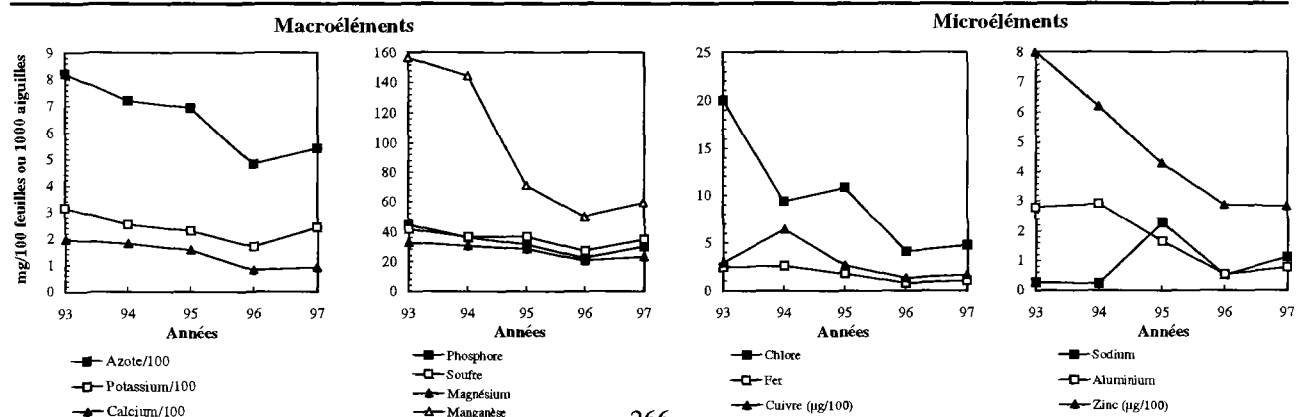
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



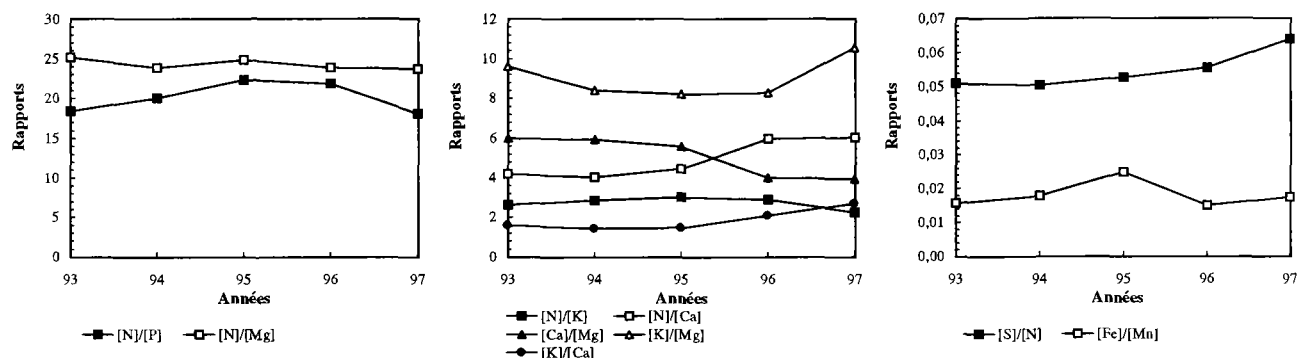
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	23	17	21	20	29	26	28	25	45	34	75	42	39
Interannuel 93-97 (n=5)	4	6	10	10	15	6	28	30	53	22	81	38	45

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Ca, Mg			Mg	P	N, K
				S, Ca		
Microéléments :	Fe, Zn		Mn, Cu			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en magnésium sont comprises entre le seuil indicatif de carence et critique et les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en magnésium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles (0,1; 0,03 et 0,02 cmol./Kg pour respectivement les couches 0-10 cm, 10-20 cm et 20-40 cm). Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont moyennes jusqu'à 40 cm (19,4 à 9,6 mg/Kg). Les teneurs foliaires en azote, en potassium, en manganèse et en cuivre sont au contraire élevées. Ce peuplement a une bonne croissance probablement en réaction aux nombreuses éclaircies pratiquées depuis 1980. Les pourcentages de défoliation sont non négligeables (25 % en 1995 et 30 % en 1997) même si des notations plus sévères pourraient expliquer une partie de cette augmentation. Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est apparente pour la période de mesure mis à part pour le soufre qui a tendance à augmenter et le zinc qui au contraire diminue. Les teneurs foliaires en manganèse semblent particulièrement élevées en 1993 et 1994 (près de deux fois les valeurs habituelles observées pour les chênes).

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Fontainebleau (P. 352)

Commune de Fontainebleau (Seine et Marne)

Latitude: 48°27'14" N

Longitude: 2°43'02" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

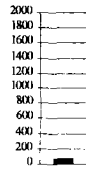
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 113 ± 3

Ho en 1995 (m) : 27,8 ± 1,5

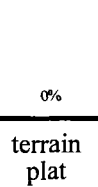
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : -0.06



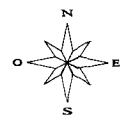
Altitude



Pente

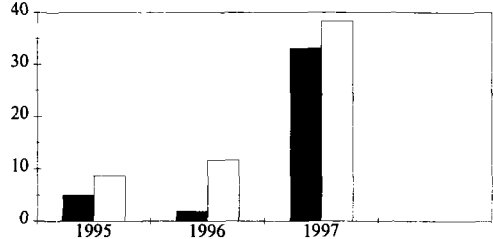


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

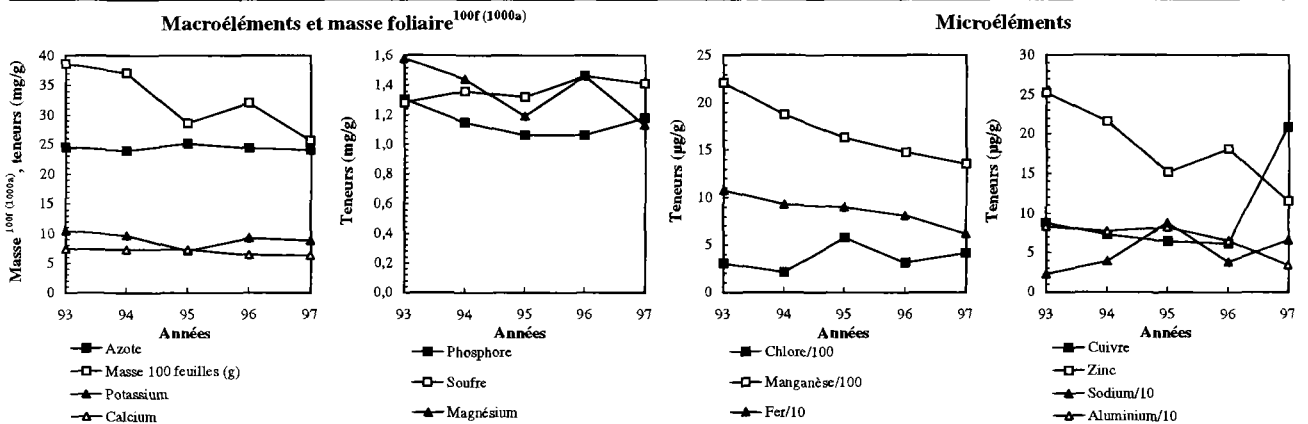


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol lessivé podzolique

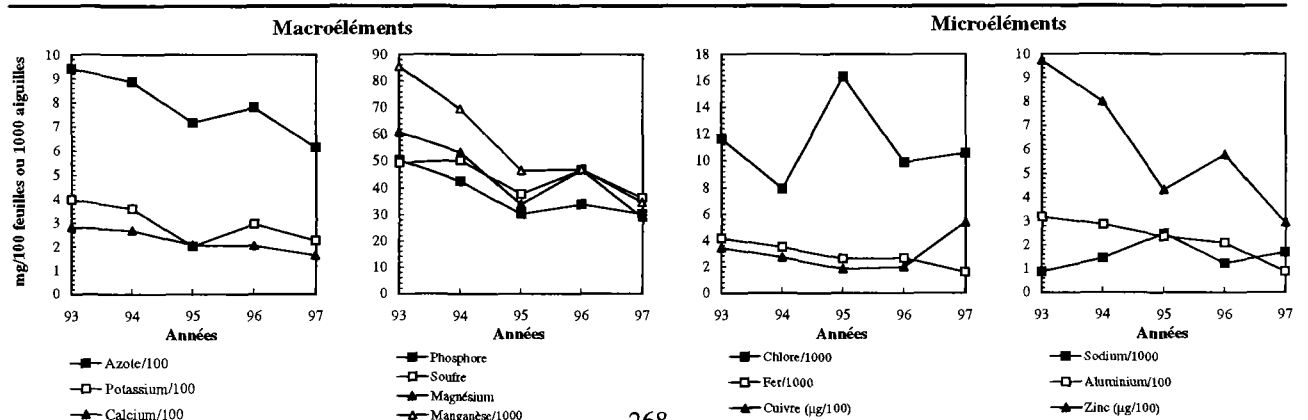
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



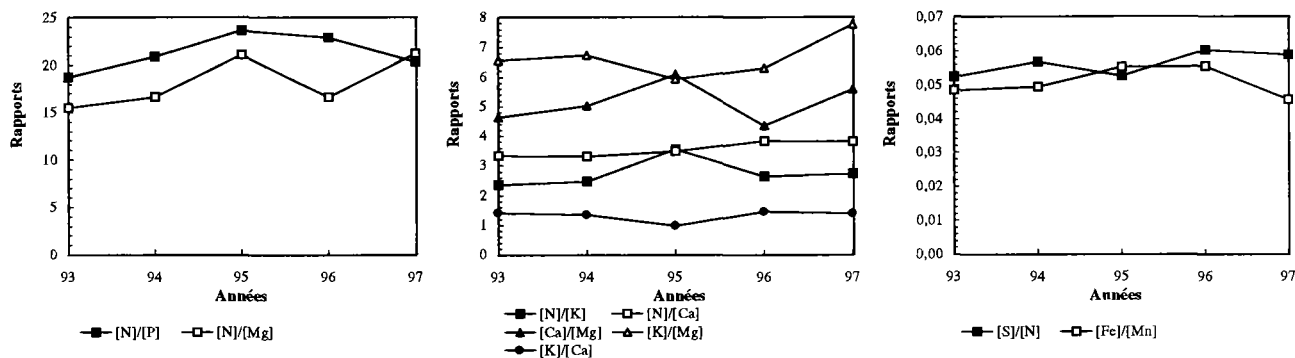
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	8	6	9	15	22	18	28	117	23	41	19	32
Interannuel 93-97 (n=5)	2	8	5	12	7	13	17	18	56	26	46	34	27

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, P, Ca, Mg, K			P, Mg, N, K, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15		1,0	4,0	3,0	0,9				
	Critique	20	1,1	1,3	6,0	5,0	1,2				
	Optimum	22	1,5		8,5		1,4				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	15	1,0		5,0	3,0	1,0	60	60	5	15
	Borne supérieure (bs)	1,8	25		10,0	8,0	2,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore et en magnésium sont comprises entre le seuil indicatif critique et optimal. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont faibles dans les couches 10-20 cm et 20-40 cm (respectivement 0,5 et 1,1 mg/Kg) et les teneurs en magnésium échangeable dans le sol sont moyennes à faibles (0,13 à 0,04 cmo /Kg entre 0 et 40 cm). Les teneurs foliaires en azote et en potassium sont au contraire élevées. Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1995 et 1996 (< 10 %) et deviennent importants en 1997 (environ 35 %) même si des notations plus sévères peuvent expliquer une partie de cette augmentation.

Une légère diminution des teneurs foliaires en zinc et en manganèse est à noter.

Placette de niveau 1

Forêt Sectionale du Maupuy (P. 24)
Commune de Saint Léger le Guérétois (Creuse)

Latitude: 46°09'47" N
Longitude: 1°49'33" E

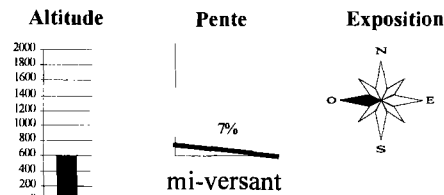
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 24 ± 2

Ho en 1995 (m) : 19,6 ± 1,2

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.94

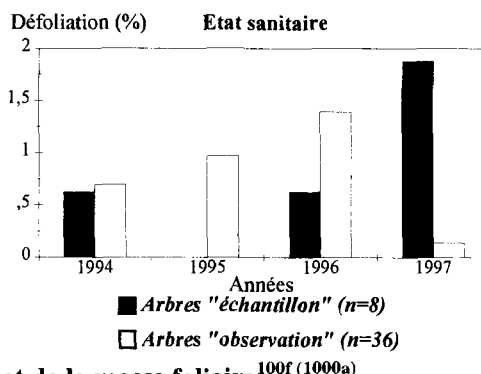


Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

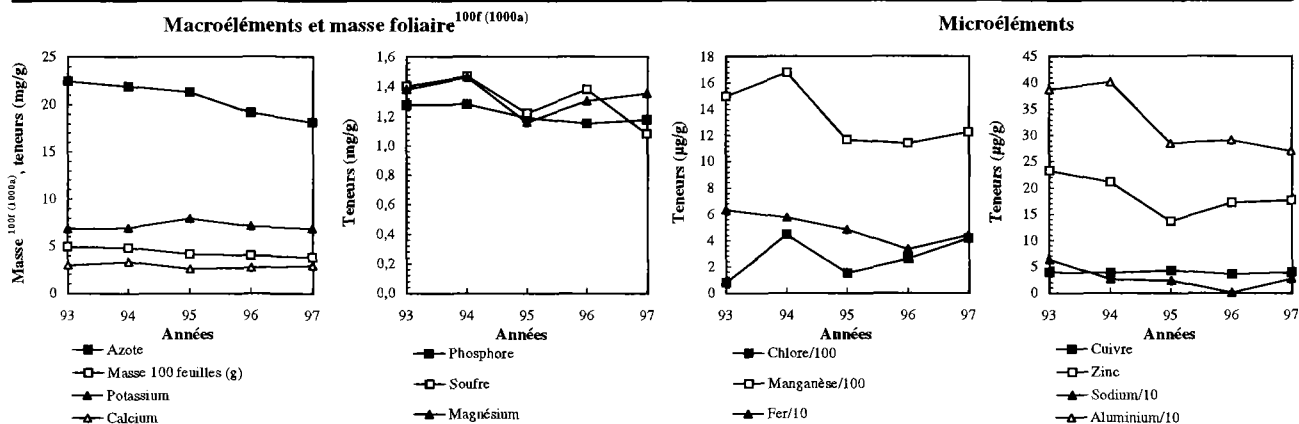
Humus : Moder - Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique humifère

Sol brun acide humifère



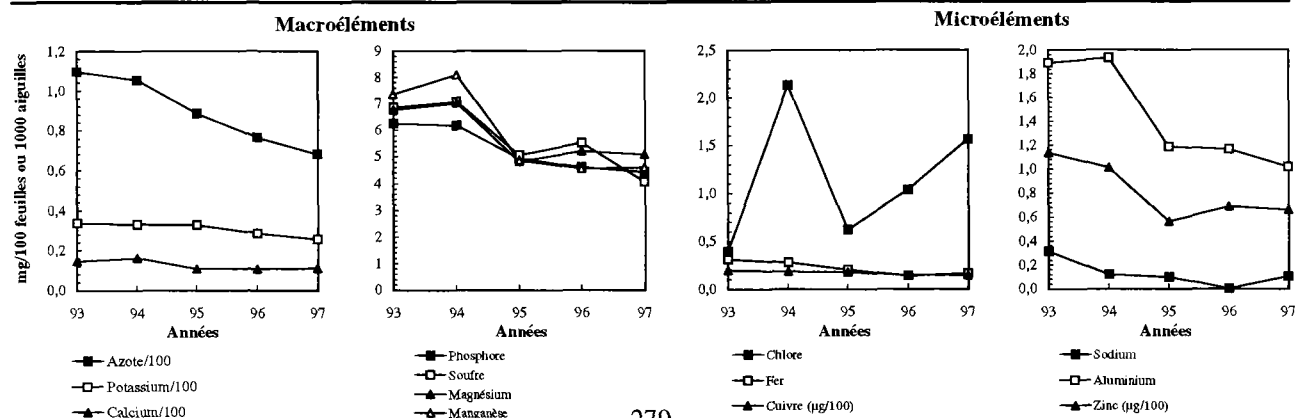
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



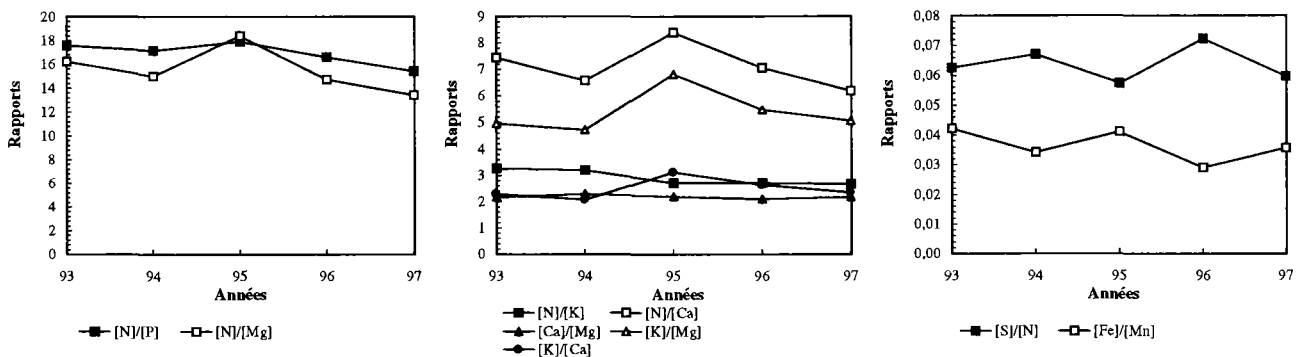
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	10	9	26	25	14	15	27	23	24	154	35	15	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	4	11	6	9	8	22	16	6	18	74	53	17	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			P, Ca, N, S, K, Mg		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6				
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0		2,5	16	
	Optimum					2,5					
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont élevées jusqu'à 40 cm (entre 18 et 26 mg/Kg). Les accroissements en surface terrière sont les plus élevés de tous les peuplements de douglas. C'est un des plus jeunes peuplements (24 ans à 1,30 m en 1994). Les teneurs foliaires en calcium sont au contraire élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. Les pourcentages de défoliation sont très faibles entre 1994 et 1997 (< 5 %).

Une légère diminution des teneurs foliaires en aluminium est à noter.

Avant enrésinement, les lande étaient utilisées pour le pâturage et le ramassage de litière jusqu'à 1959.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale des Avant-Monts (P. 133)

Commune de Verreries de Moussans (Hérault)

Latitude: 43°26'54" N

Longitude: 2°42'56" E

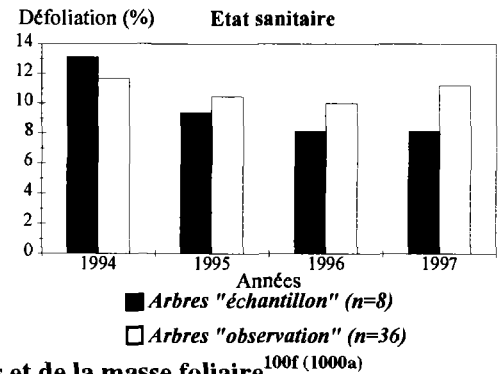
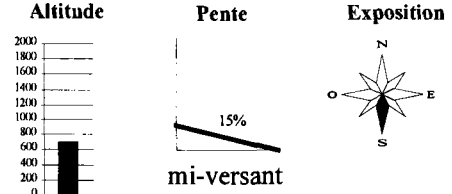
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 48 ± 1

Ho en 1995 (m) : 39,0 ± 2,9

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.23

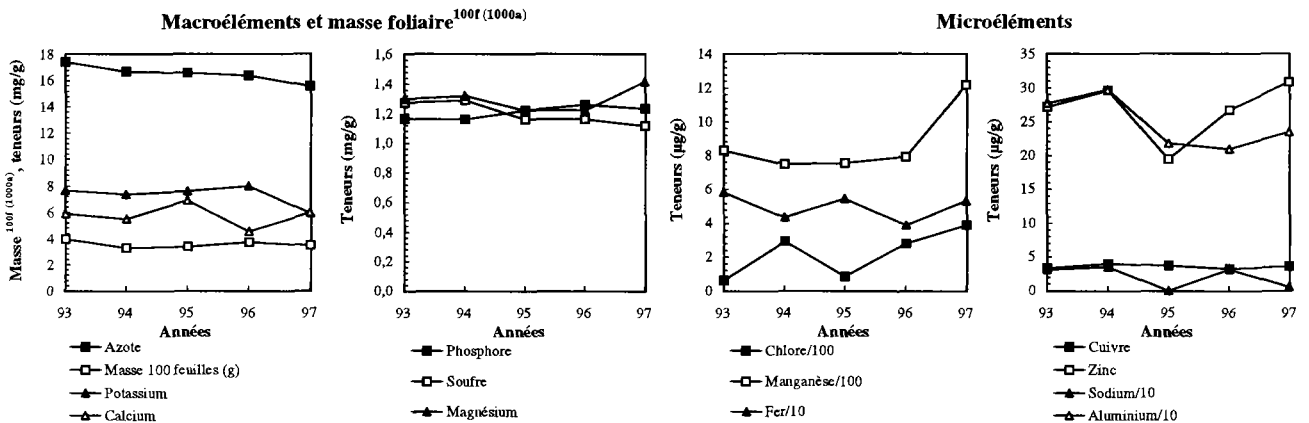


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinienion betuli*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun mésotrophe

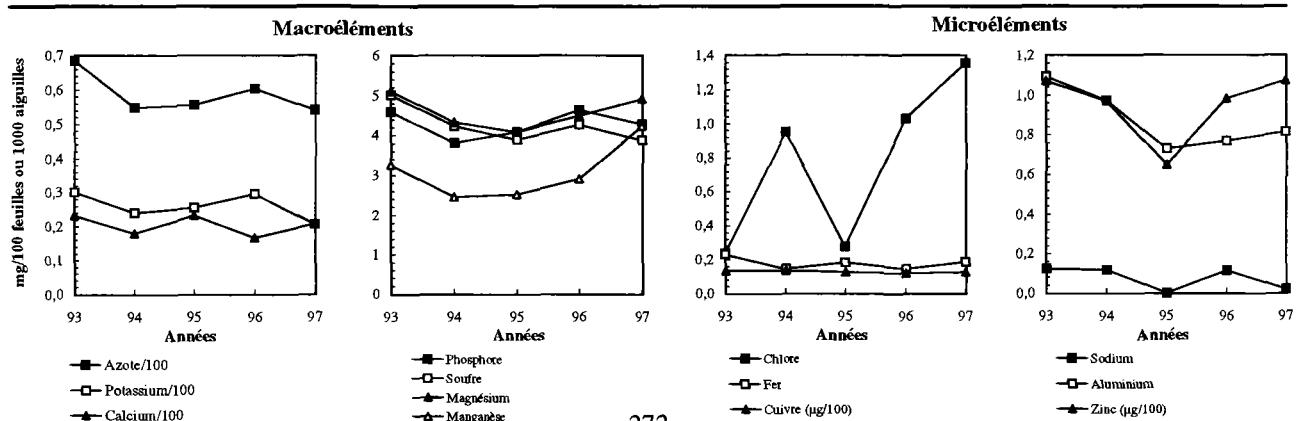
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



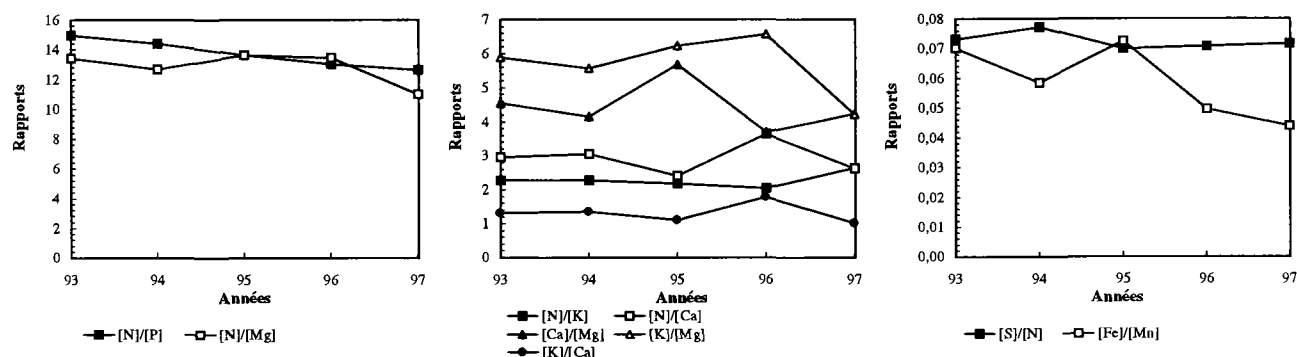
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zu	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	5	8	16	19	18	13	18	41	10	27	180	25	33
Interannuel 93-97 (n=5)	4	3	6	10	14	6	15	21	8	15	72	58	14

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing three segments]			[Bar chart showing three segments: P, Ca, N, S, K, Mg]		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6				
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0			2,5	16
	Optimum					2,5					
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont élevées jusqu'à 40 cm (entre 8 et 15 mg/Kg). Les teneurs foliaires en calcium sont au contraire élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 15 %).

Aucune tendance n'est décelable pour les teneurs foliaires au cours de temps.

Les 8 arbres échantillons remplacés en 1996 et les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 94-95 (57 jours), 95-96 (52 jours) et 96-97 (61 jours) mais ces écarts n'ont pas induit d'augmentation sensible de la variabilité interannuelle par rapport aux autres placettes de douglas.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Ecouves (P. 556)

Commune de La Lande de Goulte (Orne)

Latitude: 48°34'29" N

Longitude: 0°04'05" W

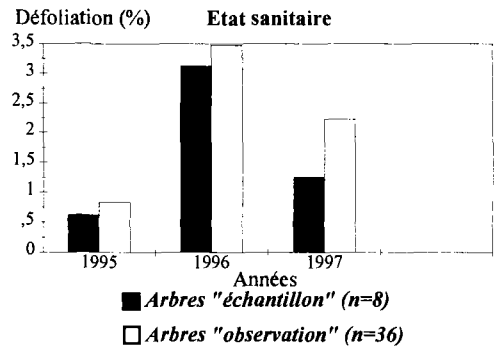
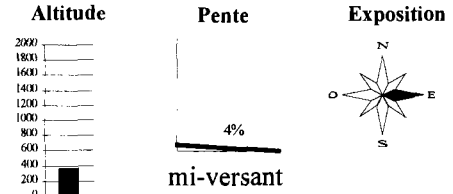
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 30 ± 1

Ho en 1995 (m) : 27,1 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.26

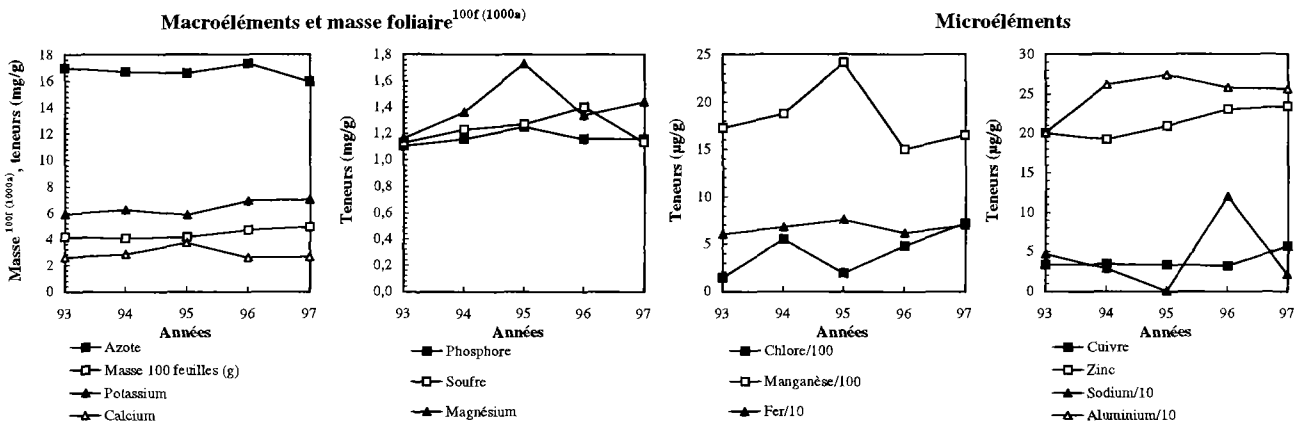


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

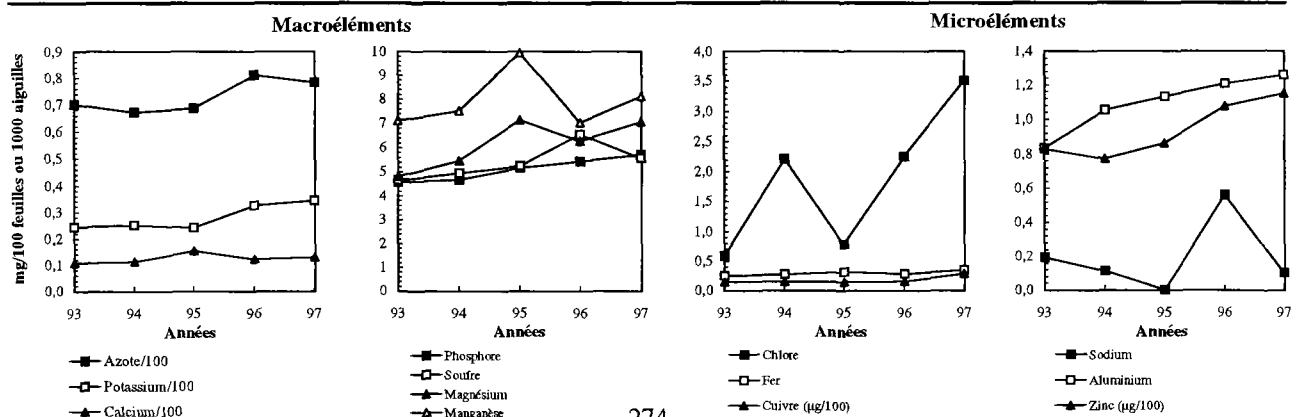
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



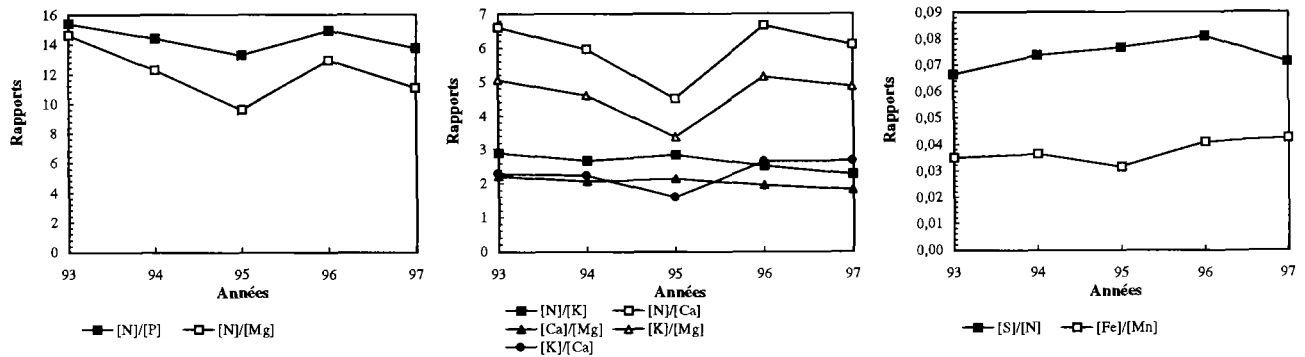
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	10	16	19	19	14	15	26	96	37	123	31	18
Interannuel 93-97 (n=5)	3	4	8	8	15	13	9	17	25	8	95	53	10

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			P, Ca, N, S, K, Mg		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6			
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0		2,5	16
	Optimum					2,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)									
	Borne supérieure (bs)									

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont moyennes à élevées jusqu'à 40 cm (entre 7 et 14 mg/Kg). Les teneurs foliaires en calcium sont au contraire élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. L'accroissement annuel en surface terrière est faible mais ce résultat n'est pas très fiable car il y a un décalage entre les dates d'inventaires et la coupe. D'autre part, la surface inventoriée en 1991 est supérieure à celle inventoriée en 1995. Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 5 %).

Aucune tendance n'est décelable pour les teneurs foliaires au cours du temps.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1994, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Lourdes (P. 23)

Commune de Lourdes (Hautes Pyrénées)

Latitude: 43°06'00" N

Longitude: 0°06'25" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 24 ± 1

Ho en 1995 (m) : 22,0 ± 1,6

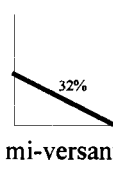
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.29



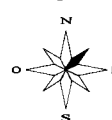
Altitude



Pente



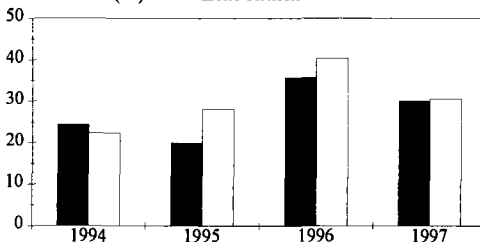
Exposition



mi-versant

Défoliation (%)

Etat sanitaire



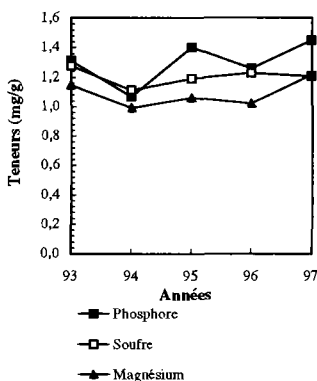
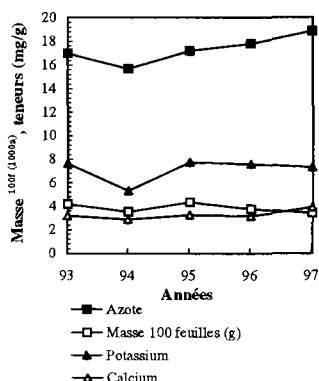
Végétation : *Hyperico androsaemi-Carpinion betuli*

Humus : Mésomull - Dysmull

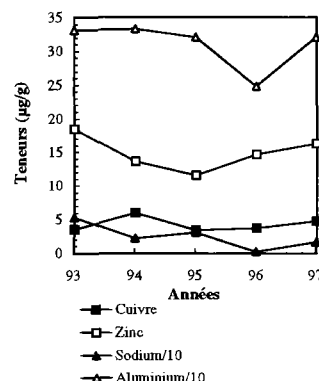
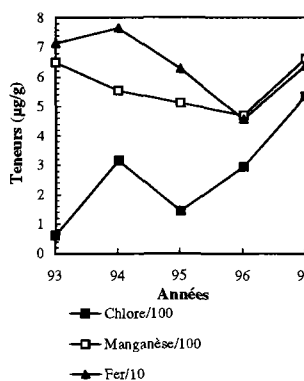
Type de sol : Sol brun colluvial humifère

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire^{100f (1000a)}



Microéléments

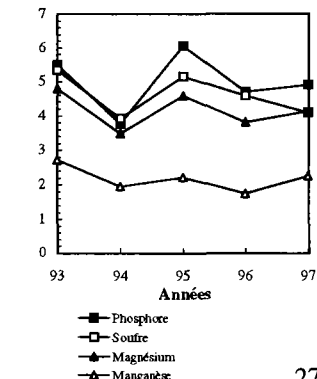
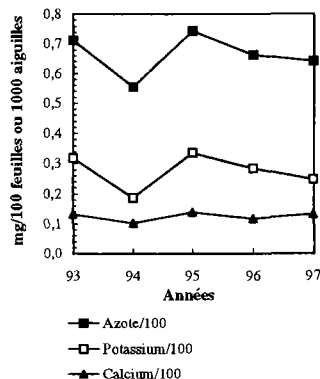


Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

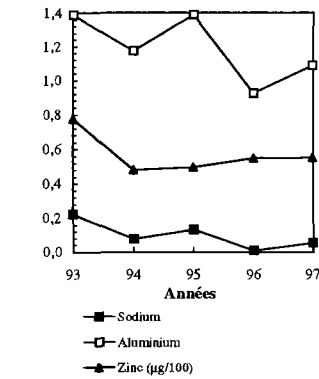
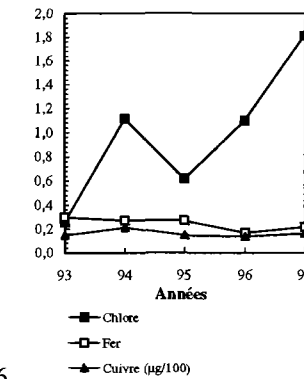
	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	8	13	12	22	19	16	43	27	18	154	30	20	
Interannuel 93-97 (n=5)	6	10	5	13	11	8	16	13	23	16	69	60	10	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}

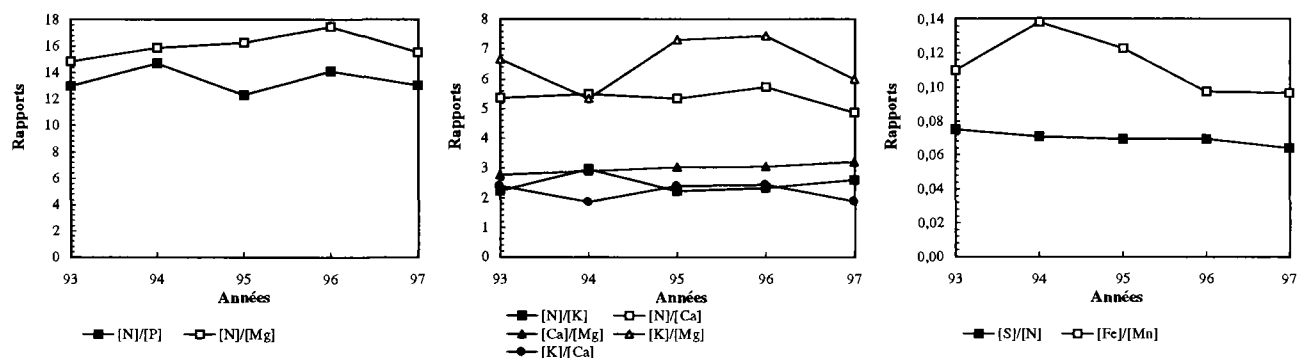
Macroéléments



Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing three segments]			[Bar chart showing three segments: P, Ca, N, S, K, Mg]		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6				
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0			2,5	16
	Optimum					2,5					
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont élevées jusqu'à 40 cm (entre 46 et 59 mg/Kg). Les teneurs foliaires en zinc sont faibles (< seuil critique) mais les valeurs de seuil sont très approximatifs. Les teneurs foliaires en calcium sont au contraire élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. L'accroissement annuel en surface terrière est faible par rapport à celui des autres peuplements de même âge. Les pourcentages de défoliation sont les plus importants des placettes de douglas (entre 20 et 40 %). Ces valeurs pourraient résulter en partie d'une sévérité plus importante des notations à partir de 1996. On note cependant que ce peuplement fait régulièrement l'objet d'attaques de rouille.

Aucune tendance n'est décelable pour les teneurs foliaires au cours de temps.

Un arbre échantillon sec a été remplacé en 1995. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (75 jours), en 94-95 (90 jours), en 95-96 (80 jours) et en 96-97 (50 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Départementale de Brou (P. 31)

Commune de Dième (Rhône)

Latitude: 45°56'51" N

Longitude: 4°28'42" E

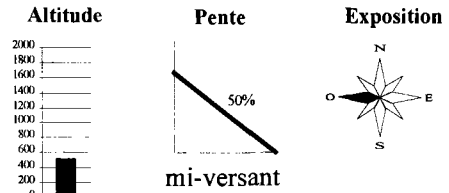
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 24 ± 1

Ho en 1995 (m) : 20,9 ± 1,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.42

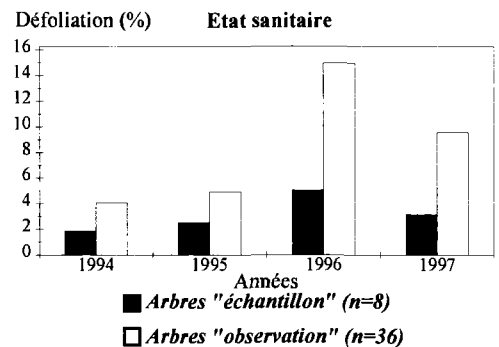


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

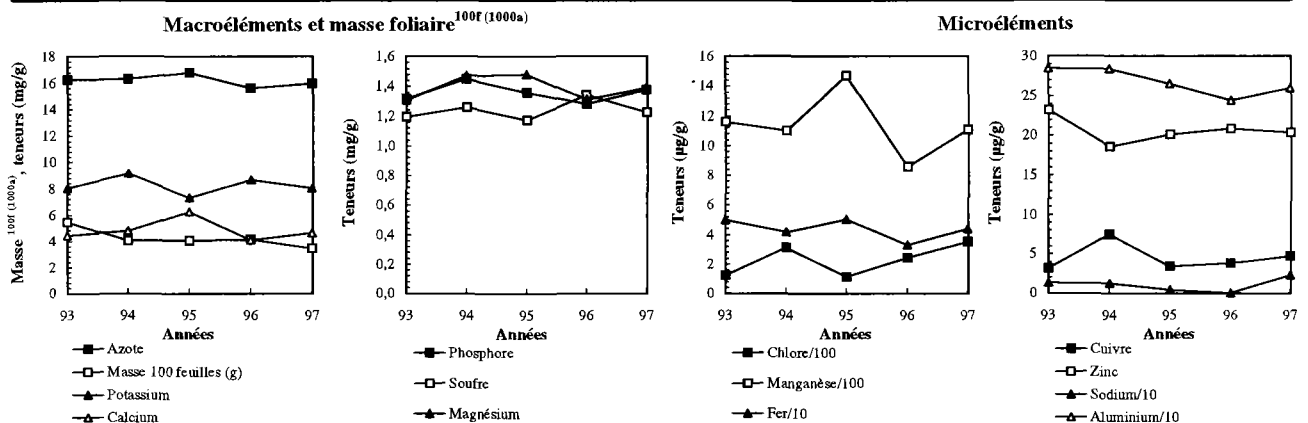
Humus : Dysmull

Type de sol : Sol brun ocreux

Sol brun acide



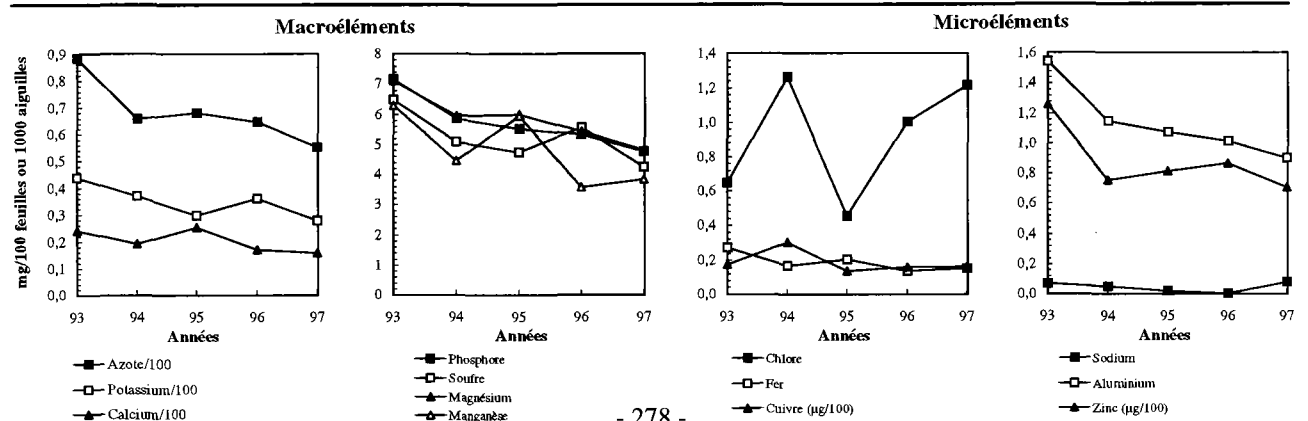
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



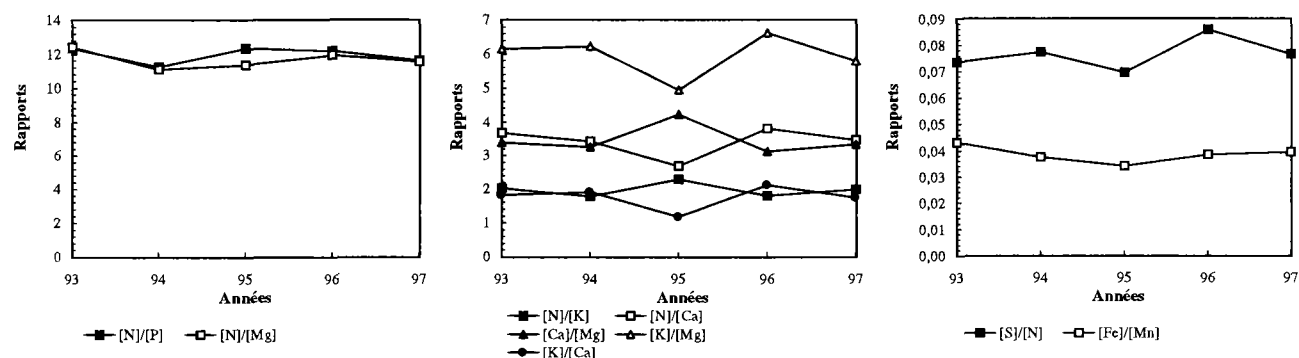
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	13	6	13	13	40	16	20	50	42	20	203	23	28
Interannuel 93-97 (n=5)	2	4	5	8	15	5	15	17	35	7	75	43	6

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, K, Ca, Mg]			P, Ca, N, S, K, Mg		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6				
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0		2,5	16	
	Optimum					2,5					
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est globalement satisfaisant, mais les teneurs en phosphore sont comprises entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique. Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales sont moyennes jusqu'à 40 cm (entre 5 et 11 mg/Kg). Les teneurs foliaires en calcium sont au contraire élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). En 1996, le pourcentage de défoliation évalué sur les arbres "observation" est nettement supérieur (15 %) à celui évalué sur les arbres "échantillon" (5 %).

Aucune tendance n'est décelable pour les teneurs foliaires au cours du temps.

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale d'Anost (P. 43)

Commune de Anost (Saône et Loire)

Latitude: 47°05'35" N

Longitude: 4°05'10" E

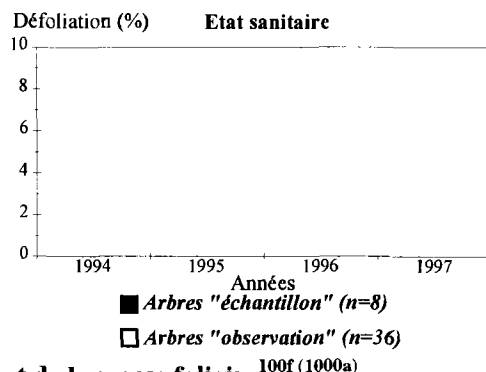
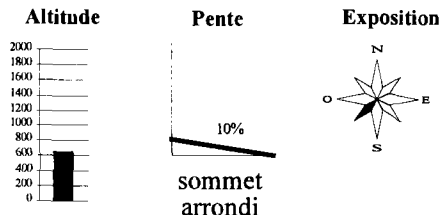
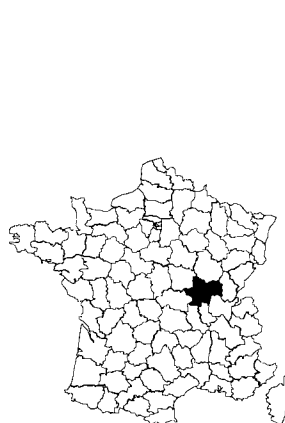
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation et regarnis

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 20 ± 1

Ho en 1995 (m) : 20,6 ± 1,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1993-1995 : 2.59

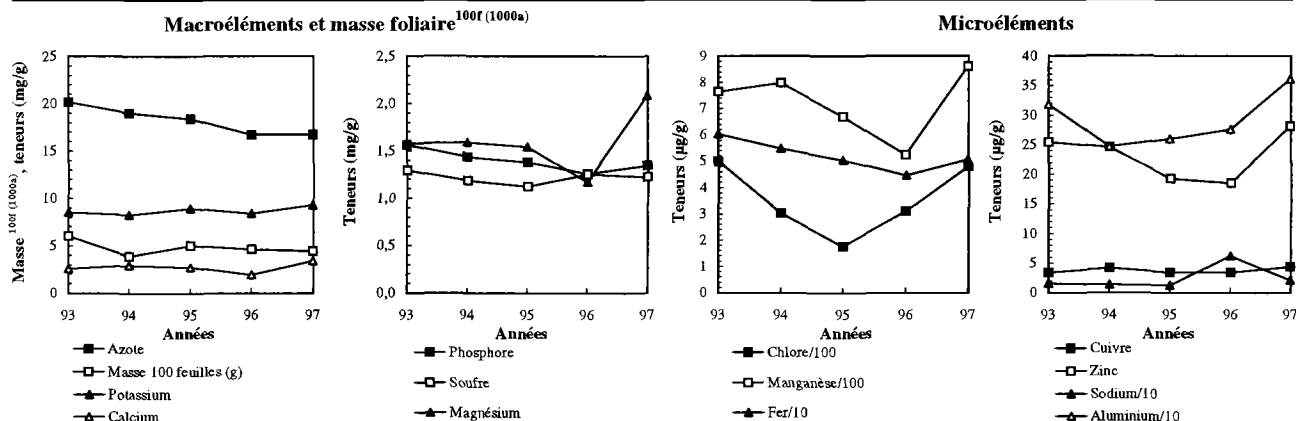


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder - Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

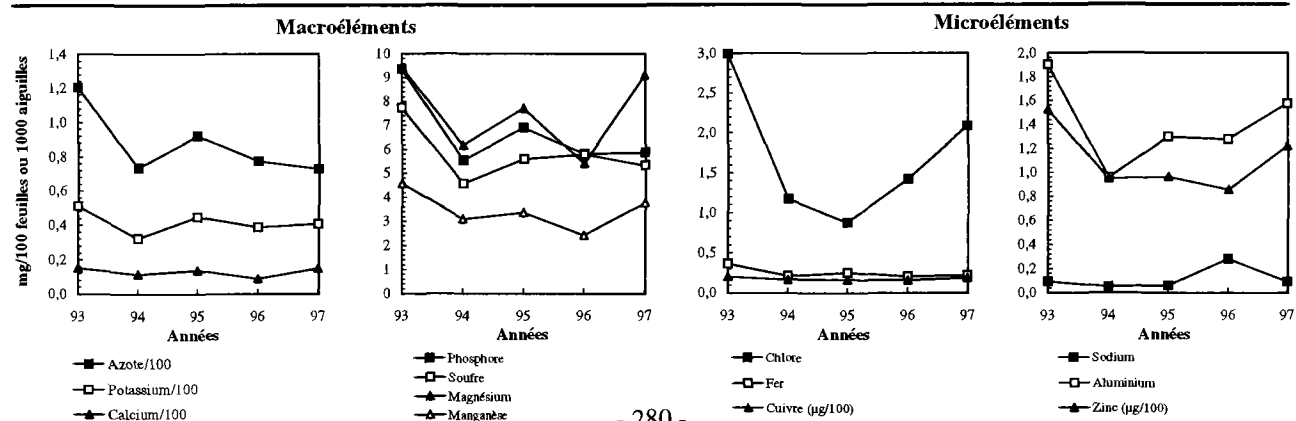
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



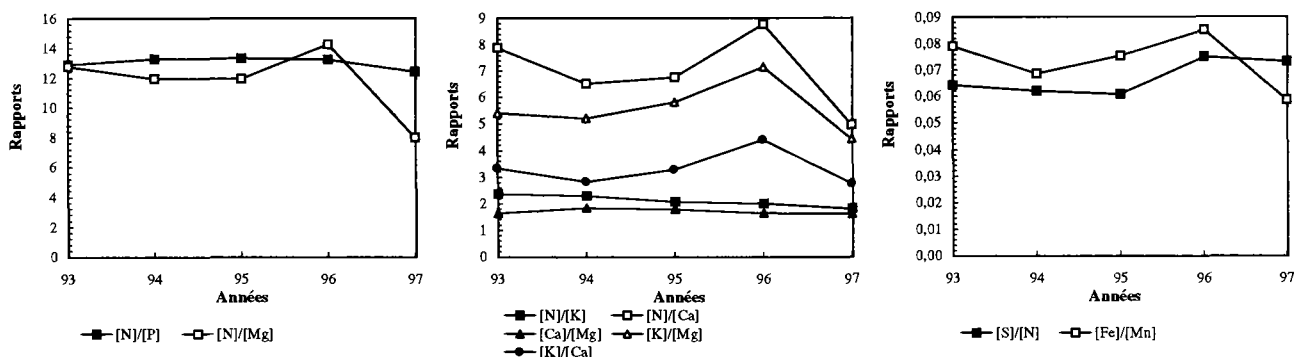
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	16	12	20	19	15	25	25	33	29	154	23	44
Interannuel 93-97 (n=5)	7	7	5	4	18	18	10	16	12	16	77	34	14

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[N], [P], [K], [Ca], [Mg]			Ca, N, P, S, K, Mg		
Microéléments :				Zn, Cu		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	1,0	4,0	1,0	0,6				
	Critique	15	1,4	1,2	6,0	2,0	1,0		2,5	16	
	Optimum					2,5					
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

L'état nutritionnel de cette placette est satisfaisant avec toutefois des teneurs foliaires en calcium élevées. Le seuil indicatif optimal n'a pas été proposé pour les autres éléments. Aucune défoliation n'a été observé sur cette placette qui est installée sur le plus jeune peuplement de douglas du réseau (20 ans à 1,30 m en 1994). Malgré une forte densité, l'accroissement annuel en surface terrière est le plus élevé des placettes de douglas avec 2,59 m²/ha/an. Aucune tendance n'est décelable pour les teneurs foliaires au cours du temps. En 1997, on remarque que la teneur foliaire en magnésium est élevée par rapport aux années précédentes.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de la Croix-Scaille (P. 14)

Commune de Thilay (Ardennes)

Latitude: 49°56'51" N

Longitude: 4°48'35" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 35 ± 1

Ho en 1995 (m) : 20,1 ± 1,3

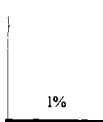
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.06



Altitude

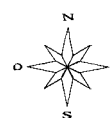


Pente

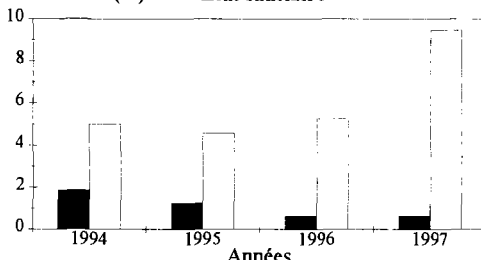


terrain plat

Exposition



Défoliation (%)



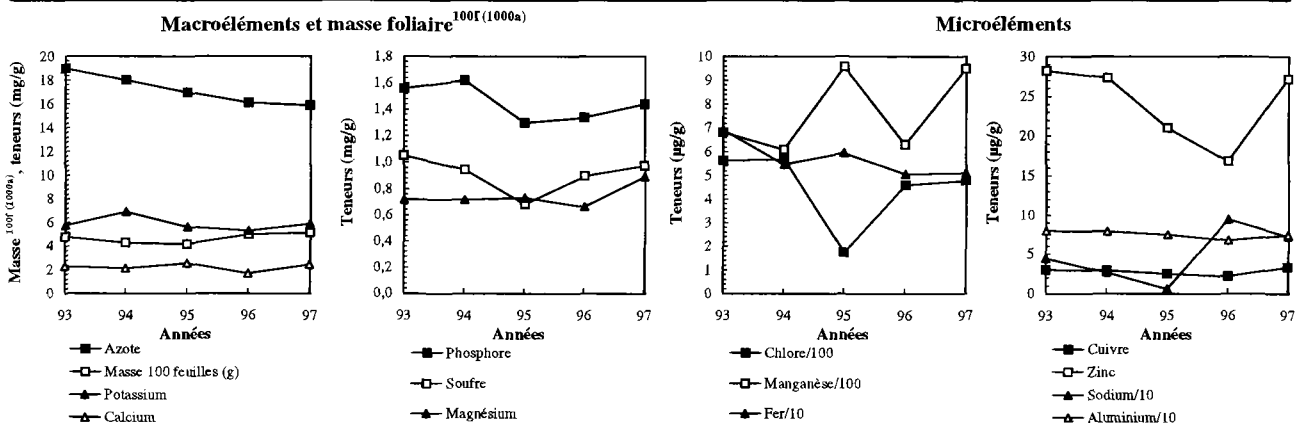
Etat sanitaire

Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder - Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

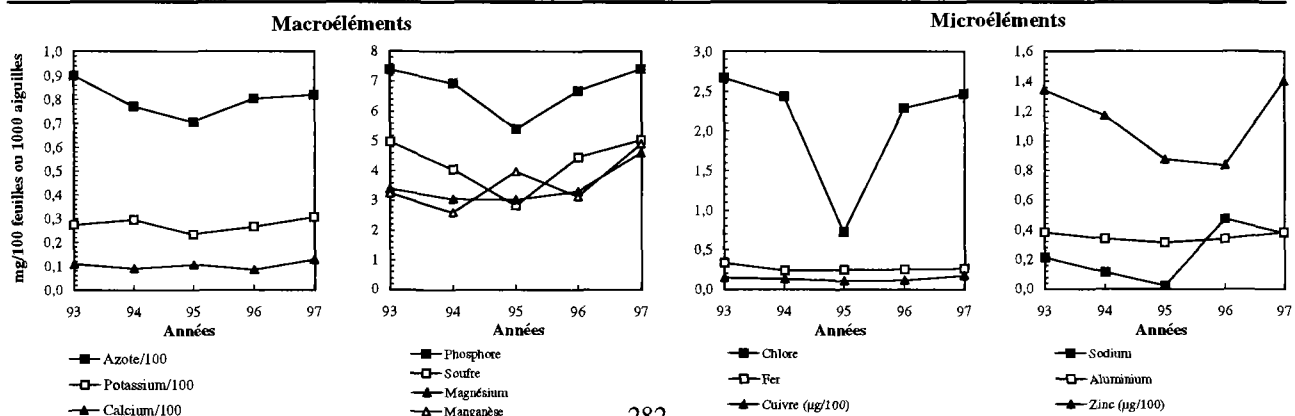
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



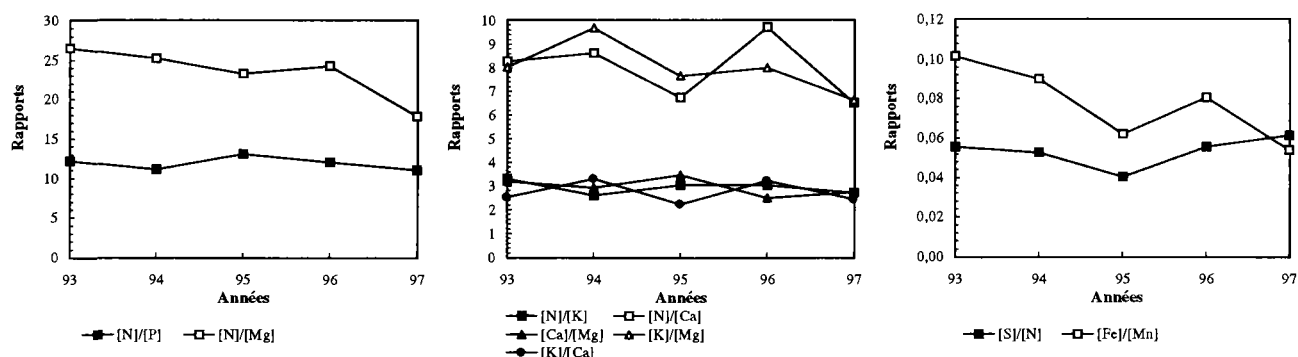
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	12	8	22	27	17	13	59	15	32	86	30	35
Interannuel 93-97 (n=5)	7	8	14	9	14	10	12	20	14	19	65	32	6

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}			
Classes	I	II	III				
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé				
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal	
Macroéléments :	S	P, Ca, Mg, K	N	S, Mg		P, Ca	N, K
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu		Fe	Zn, Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en phosphore, en calcium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote en potassium et en manganèse. Les teneurs en magnésium et en calcium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles (respectivement entre 0,02 et 0,10 cmolc/Kg et entre 0,06 et 0,12 cmolc/Kg dans les couches 0-10 cm et 20-40 cm) tandis que les teneurs en phosphore (Dyer) dans le sol sont moyennes pour les placettes du réseau (entre 4 et 13 mg/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre et abondance d'azote) et rapports N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium et abondance d'azote et de potassium). Malgré ces faibles teneurs foliaires en nutriment et les déséquilibres mis en évidence, l'accroissement en surface terrière de cette placette est moyen (1,06 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 10 %) mais les estimations obtenues sur les arbres "observation" conduisent à des pourcentages sensiblement supérieurs à ceux obtenus sur les arbres "échantillon". Aucune tendance au cours du temps des teneurs foliaires n'est visible pour cette placette mis à part pour l'azote qui montre une légère diminution.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Espinouse (P. 83)
Commune de Cambon et Salvergues (Hérault)

Latitude: 43°38'14" N
Longitude: 2°55'16" E

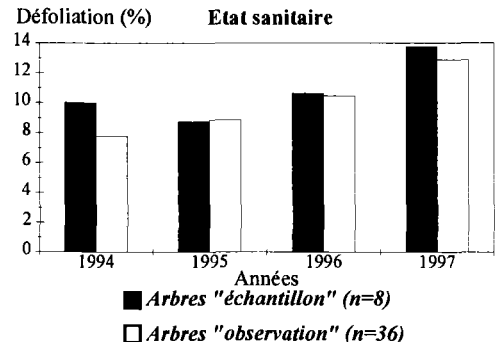
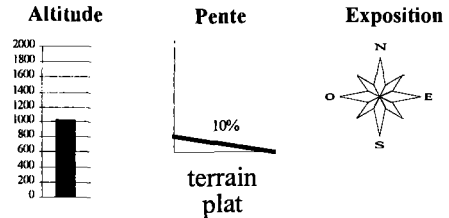
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 27 ± 1

Ho en 1995 (m) : 16,9 ± 1,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.53

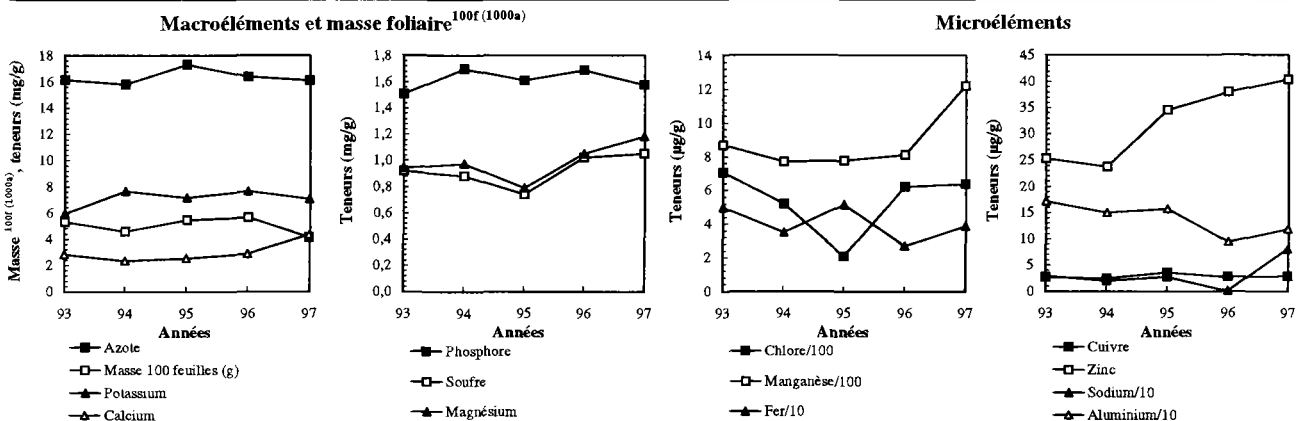


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

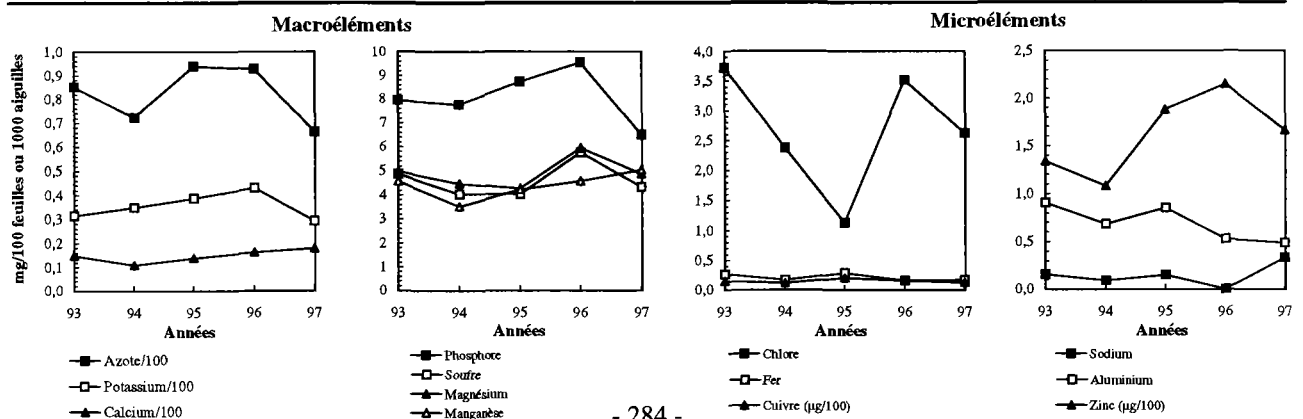
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



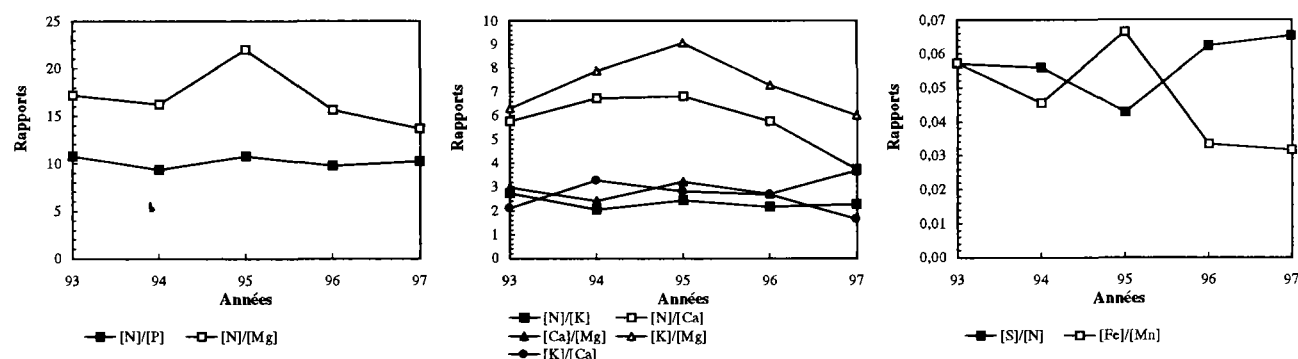
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	4	18	8	13	24	27	30	20	13	40	110	32	19
Interannuel 93-97 (n=5)	3	4	12	9	24	13	23	19	13	21	85	33	20

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S, Mg	Ca	N, P, K
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Cu	Fe	Zn, Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en calcium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote, en phosphore, en potassium et en manganèse. Les teneurs en magnésium, en calcium et en potassium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles (respectivement environ 0,08; 0,15 et 0,07 cmolc/Kg) tandis que les teneurs en phosphore (Dyer) dans le sol sont élevées pour les placettes du réseau (entre 31 et 51 mg/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre et abondance d'azote) et rapports N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium et abondance d'azote et de potassium). L'utilisation passée des sols (culture, fumure pacage jusqu'à 1930 puis lande et pâturage jusqu'en 1960) pourrait expliquer en partie ces problèmes nutritionnels. L'accroissement en surface terrière de cette placette est faible (0,53 m²/ha/an), on notera que cette placette se situe à 1000 m d'altitude.

Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 15 %).

Les teneurs foliaires en zinc augmentent entre 1993 et 1997 mais la variabilité intraplacette est élevée pour cet élément.

Les 8 arbres "échantillons" ont été remplacés en 1996. - 285 -

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Chaux du Dombief (P. 22)

Commune de La Chaux du Dombief (Jura)

Latitude: 46°34'47" N

Longitude: 5°52'37" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

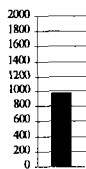
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 58 ± 3

Ho en 1995 (m) : 30,2 ± 2,5

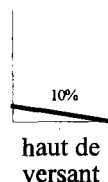
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.00



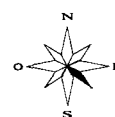
Altitude



Pente

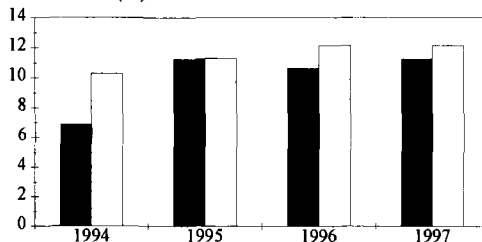


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

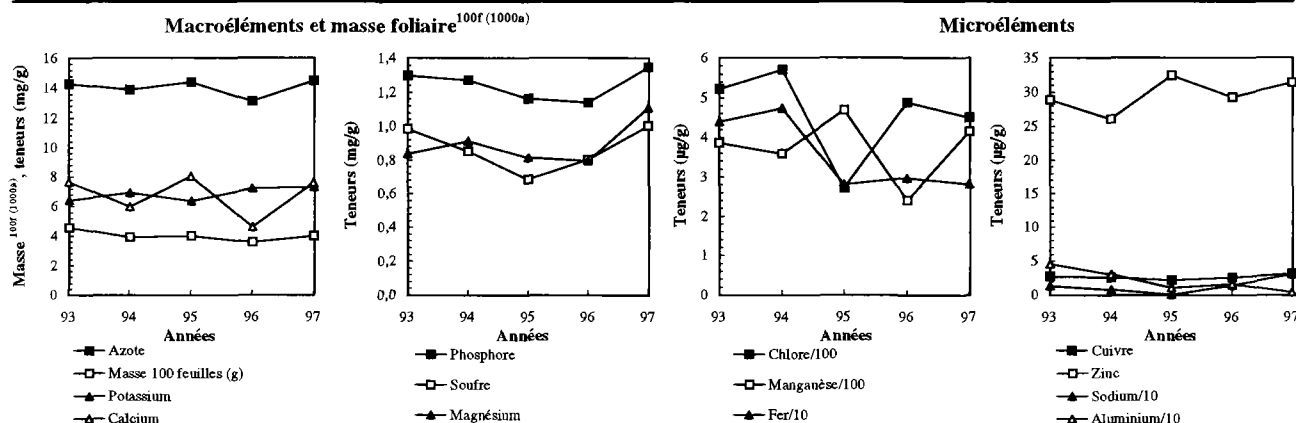


Végétation : *Galio odorati Fagenion*

Humus : Eumull - Amphimull

Type de sol : Sol brun eutrophe

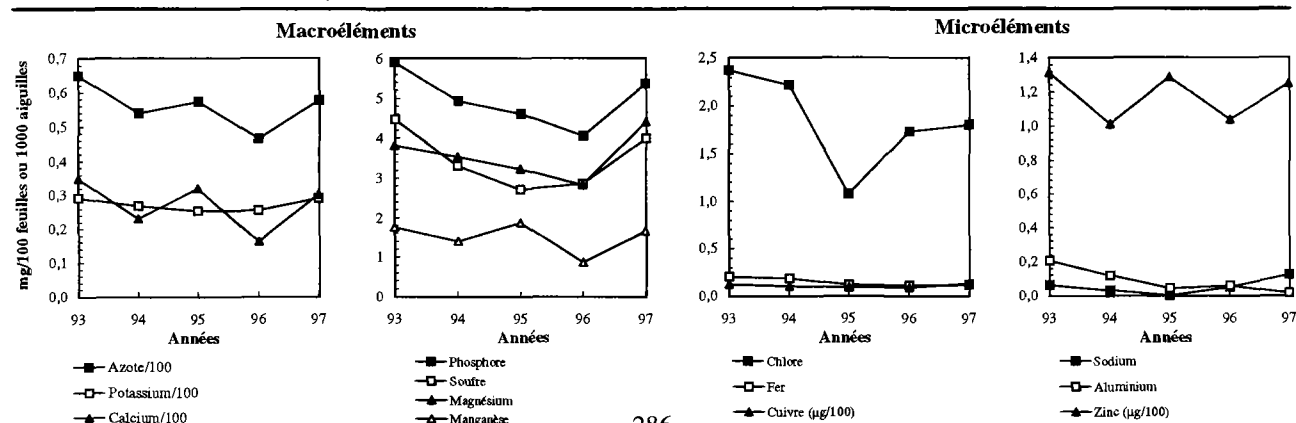
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



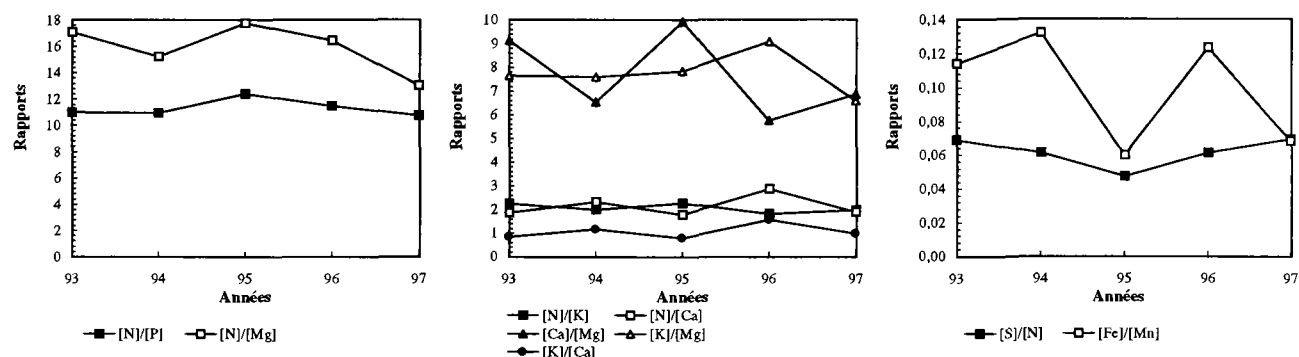
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	13	6	15	17	21	27	38	11	20	138	42	169
Interannuel 93-97 (n=5)	4	6	14	6	19	13	24	20	13	8	76	22	69

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}				
Classes	I	II	III	Carence			Critique	Optimal
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé					
Seuils	borne inf.		borne sup.					
Macroéléments :	S	N, P, Mg, K	Ca	P, S, Mg			N	K, Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu			Fe	Zn, Mn

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)							Microéléments (µg/g)			
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en azote et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en potassium, en calcium et en manganèse. Les teneurs en magnésium échangeable dans le sol et en phosphore dans les couches minérales du sol sont moyennes. Les teneurs en calcium échangeable dans le sol sont très élevées (22 à 27 cmolc/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre) et rapports N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium et abondance de potassium). L'accroissement en surface terrière de cette placette est moyen (1,00 m²/ha/an), on note que cette placette est à environ 1000 m d'altitude.

Les pourcentages de défoliation sont faibles entre 1994 et 1997 (< 15 %).

Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Placette de niveau 1

Forêt Communale des Rousses (P. 29)

Commune de Les Rousses (Jura)

Latitude: 46°31'00" N

Longitude: 6°03'44" E

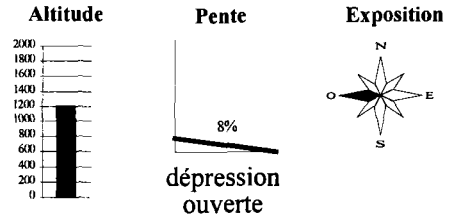
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 111 ± 29

Ho en 1995 (m) : 23,6 ± 2,2

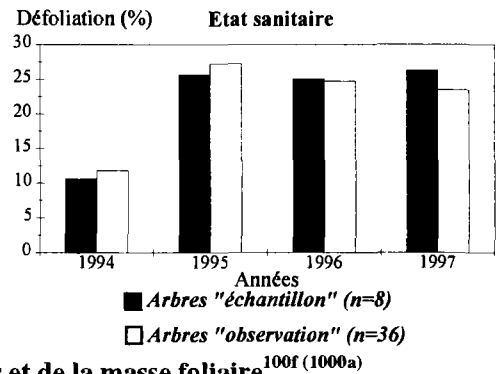
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.92



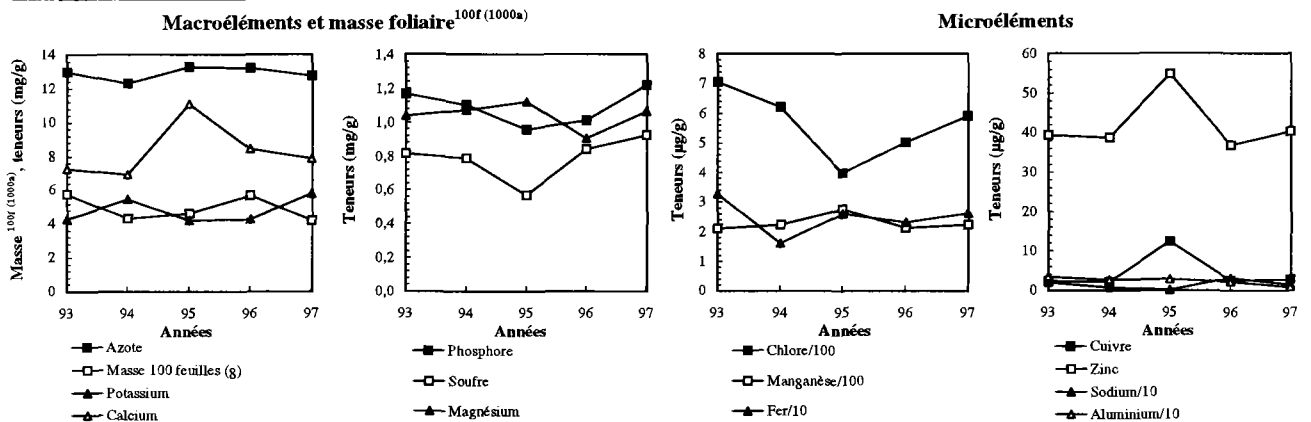
Végétation : *Aceri pseudoplatani-Fagion sylvaticae*

Humus : Amphimull - Dysmull

Type de sol : Sol humo-calciq



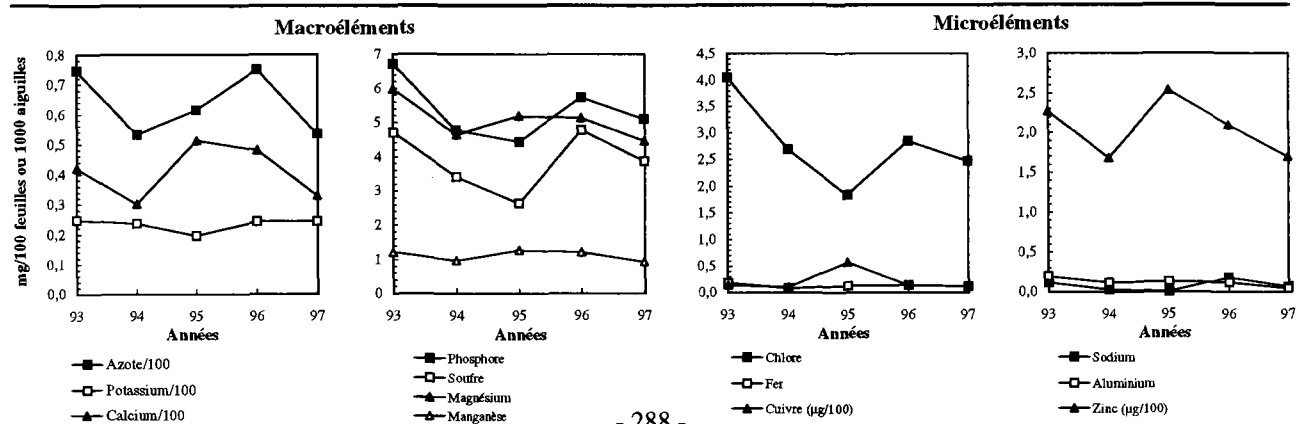
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



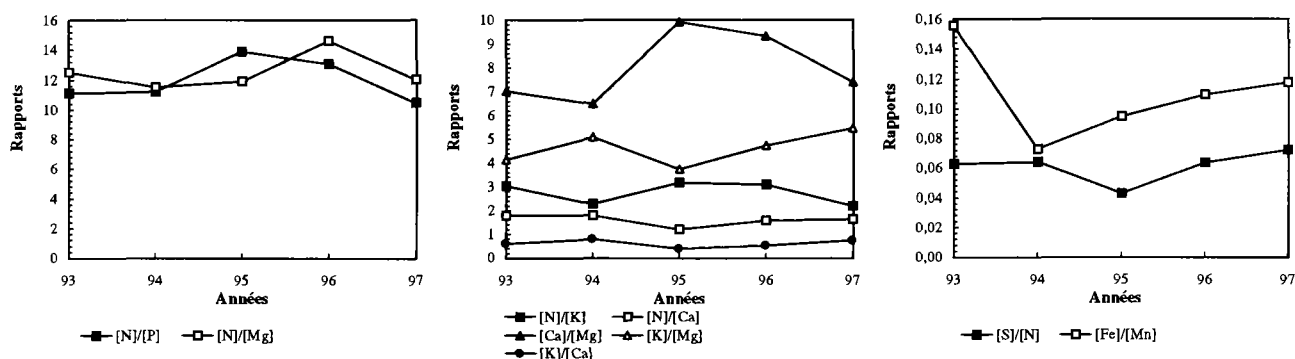
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	14	9	22	13	23	32	30	16	15	136	24	170	
Interannuel 93-97 (n=5)	3	9	15	14	18	7	21	11	91	15	75	19	36	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}			
Classes	I	II	III				
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé				
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal	
Macroéléments :	S	N, P, Mg, K	Ca	S	N, P	K, Mg	Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Fe	Mn Cu, Zn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Deux éléments foliaires sont en dessous du seuil indicatif de carence: le soufre et le fer. Les teneurs foliaires en azote et en phosphore sont faibles ainsi que dans une moindre mesure le potassium et le magnésium. Des teneurs foliaires élevées en calcium et en manganèse sont relevées. Aucun prélèvement n'a été réalisé dans les horizons minéraux du sol faute de sol constitué. Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport N/Ca et S/N faible (déficit de soufre et valeurs élevées du calcium). L'accroissement en surface terrière de cette placette est moyen (0,92 m²/ha/an), on note l'altitude de cette placette: 1200 m.

Les pourcentages de défoliation sont les plus élevés pour les placettes d'épicéa du réseau mais ils restent inférieurs à 25 %.

Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps. Les teneurs foliaires en cuivre et en zinc sont particulièrement élevées en 1995 (éventuellement du à un problème d'analyse).

Placette de niveau 3

Forêt Sectionale de Manson (P. 20)

Commune de Saint Genès Champagnelle (Puy de Dôme)

Latitude: 45°45'20" N

Longitude: 2°57'58" E

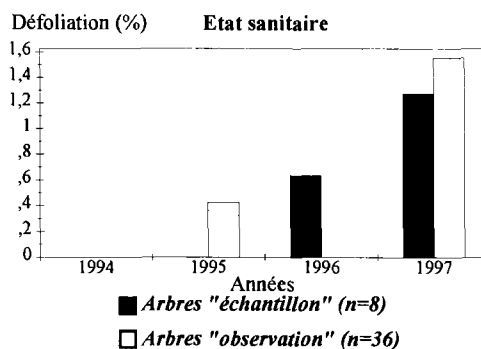
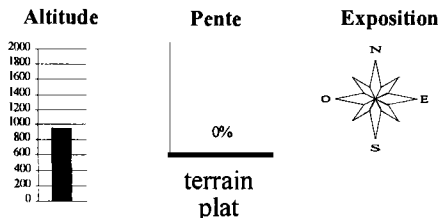
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 28 ± 1

Ho en 1995 (m) : 20,2 ± 1,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 2.11

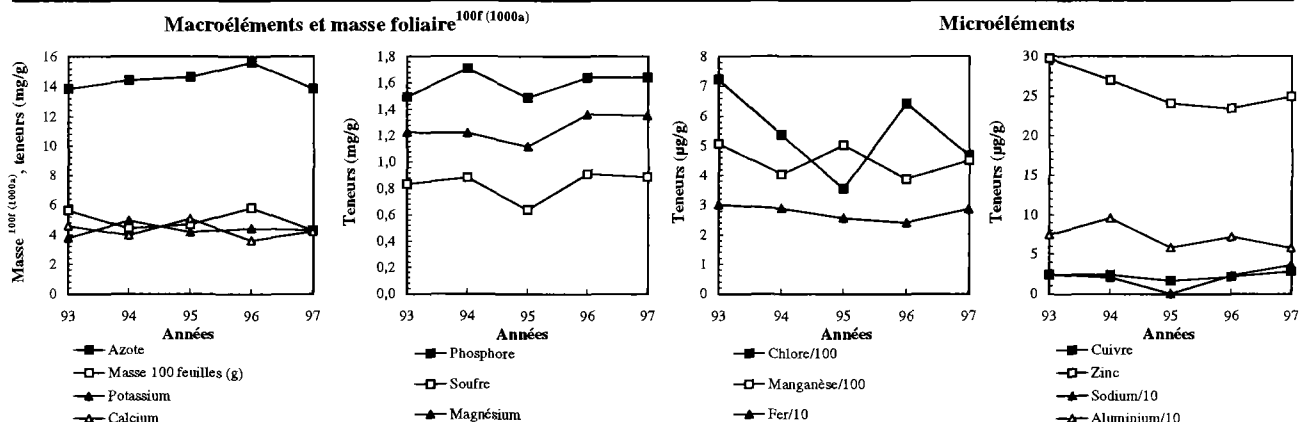


Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

Humus : Dysmull

Type de sol : Sol brun andique

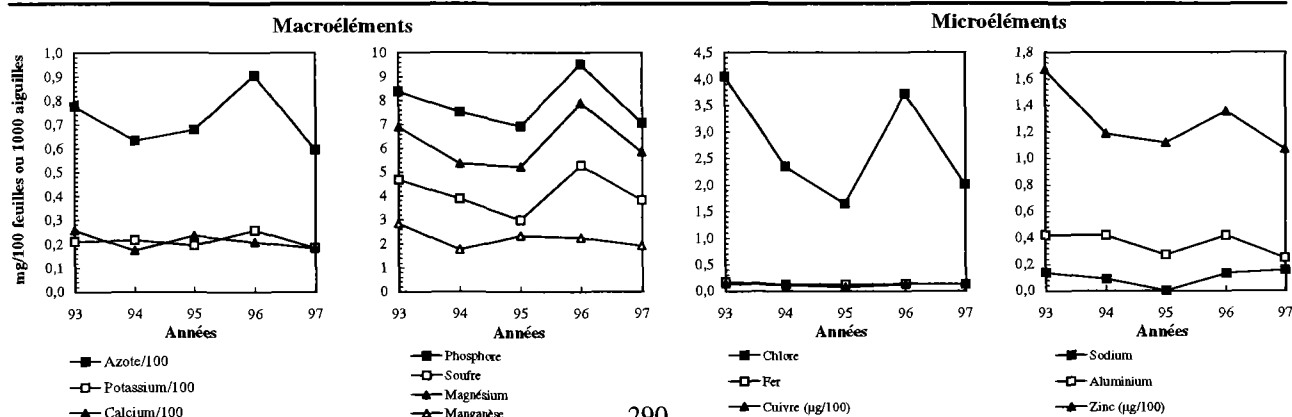
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



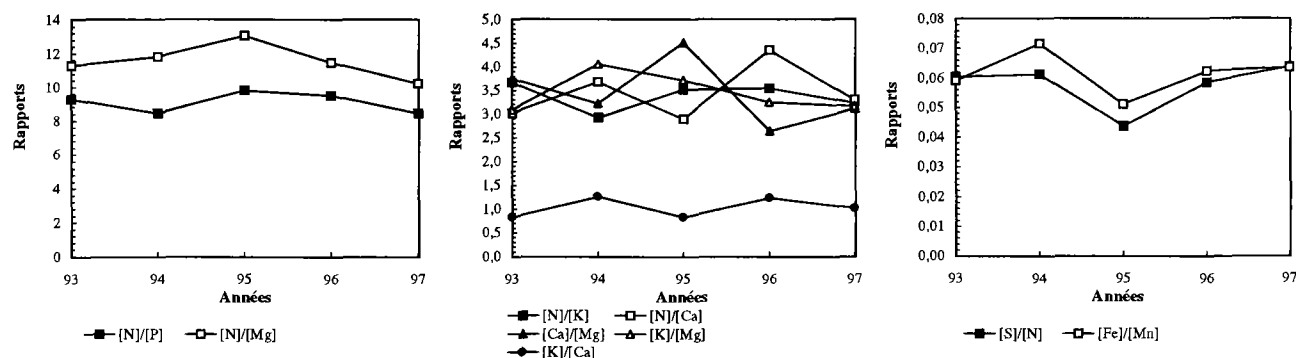
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	13	9	14	26	13	15	26	10	26	112	29	26
Interannuel 93-97 (n=5)	4	5	12	9	12	7	8	11	17	9	56	24	19

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S, K	N, Mg	P, Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Fe	Cu	Mn Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en fer dans les aiguilles est mise en évidence pour cette placette et les teneurs foliaires sont faibles pour le soufre, le potassium, le cuivre et dans une moindre mesure pour l'azote et le magnésium. Des teneurs foliaires élevées en phosphore en calcium et en manganèse sont notées. Les teneurs en potassium échangeable dans les couches minérales du sol sont moyennes à faibles (entre 0,06 et 0,18 cmolc/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre), rapports N/P et N/K élevé. L'accroissement en surface terrière de cette placette est élevé (2,11 m²/ha/an). Ce peuplement est parmi les plus jeunes peuplements d'épicéa du réseau (28 ans à 1,30 m en 1994).

Pratiquement aucune défoliation n'est observée sur cette placette.

Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Glenne (P. 18)

Commune de Roussillon en Morvan (Saône et Loire)

Latitude: 47°00'33" N

Longitude: 4°07'06" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

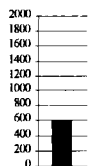
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 48 ± 2

Ho en 1995 (m) : 27,0 ± 1,2

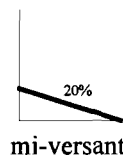
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.87



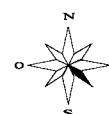
Altitude



Pente

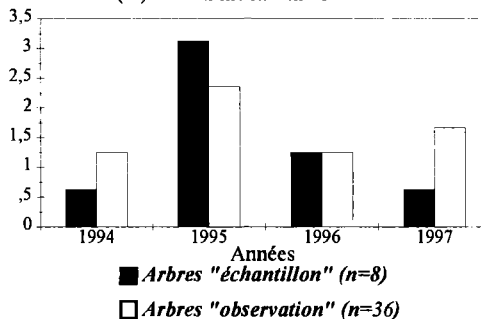


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

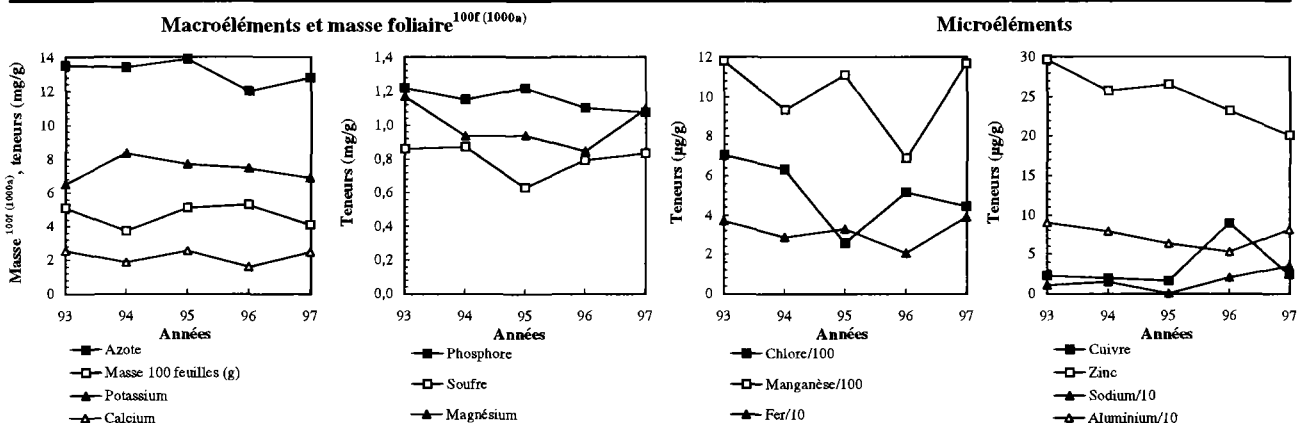


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

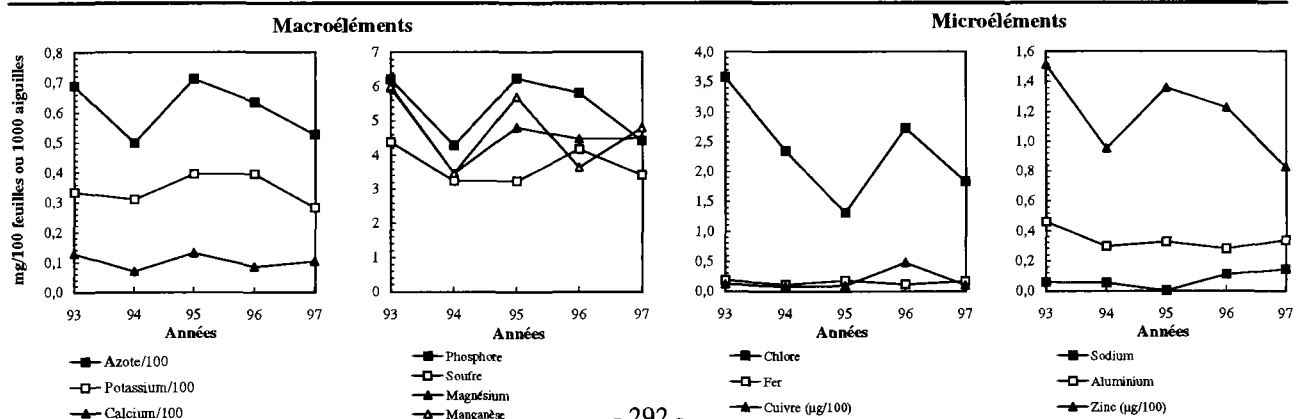
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



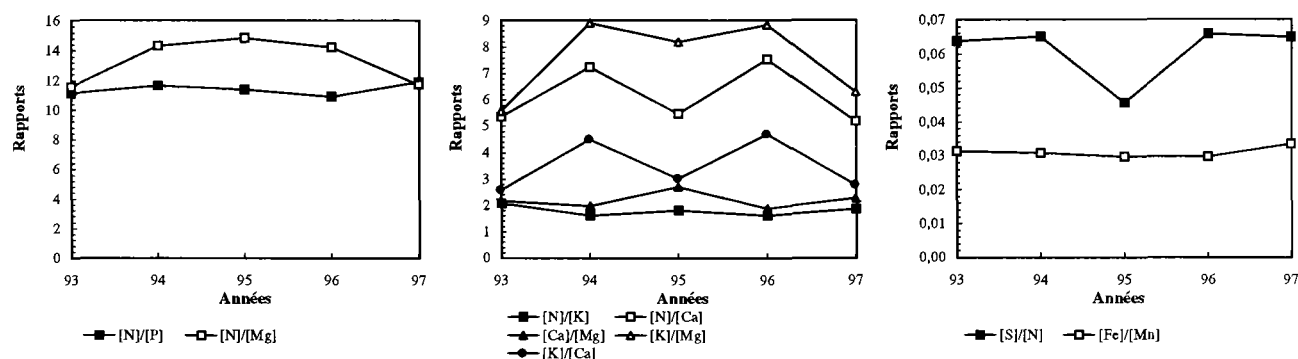
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	16	11	11	19	36	27	19	44	17	38	79	36	12
Interannuel 93-97 (n=5)	5	5	11	9	18	12	21	18	80	13	72	31	19

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		P, S	N, Ca, Mg	K
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Fe	Cu, Zn	Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore et en soufre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en azote, en calcium, en magnésium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en potassium et en manganèse. Les teneurs en phosphore et en azote dans les couches minérales du sol sont moyennes par rapport aux teneurs observées sur le réseau. Les teneurs en calcium et en magnésium sont par contre faibles dans les couches minérales (respectivement 0,01-0,12 et 0,03-0,11 cmolc/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre) et rapports N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium et abondance de potassium). L'accroissement en surface terrière de cette placette est moyen (0,87 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont négligeables entre 1994 et 1997 (< 5 %).

Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps mis à part pour le zinc.

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Bourg-Saint-Maurice (P. 15)

Commune de Bourg-Saint-Maurice (Savoie)

Latitude: 45°35'12" N

Longitude: 6°47'23" E

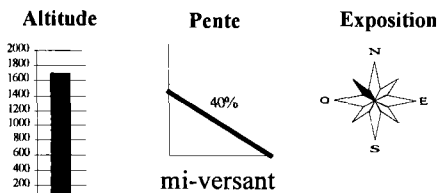
Structure du peuplement : Futaie jardinée vraie

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 182 ± 22

Ho en 1995 (m) : 22,0 ± 2,6

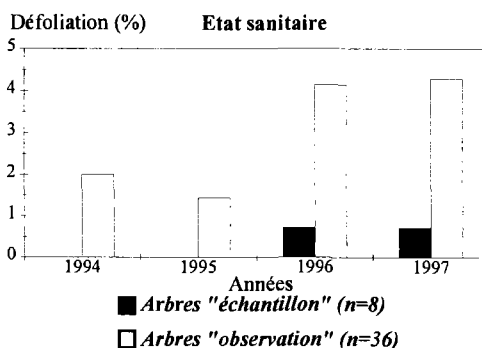
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : -1.23



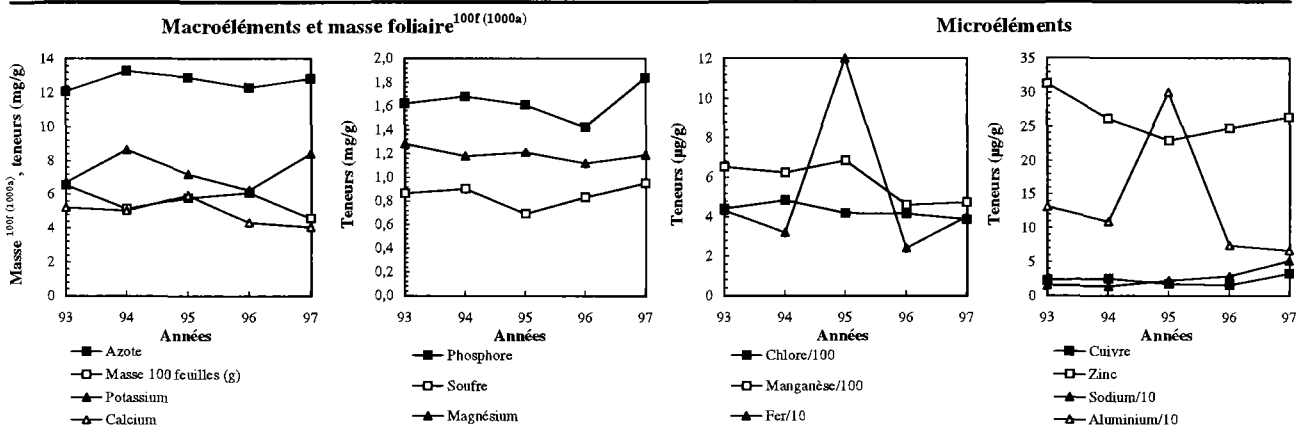
Végétation : *Vaccinio sp. pl.-Piceenion abietis*

Humus : Hémimoder

Type de sol : Sol brun acide



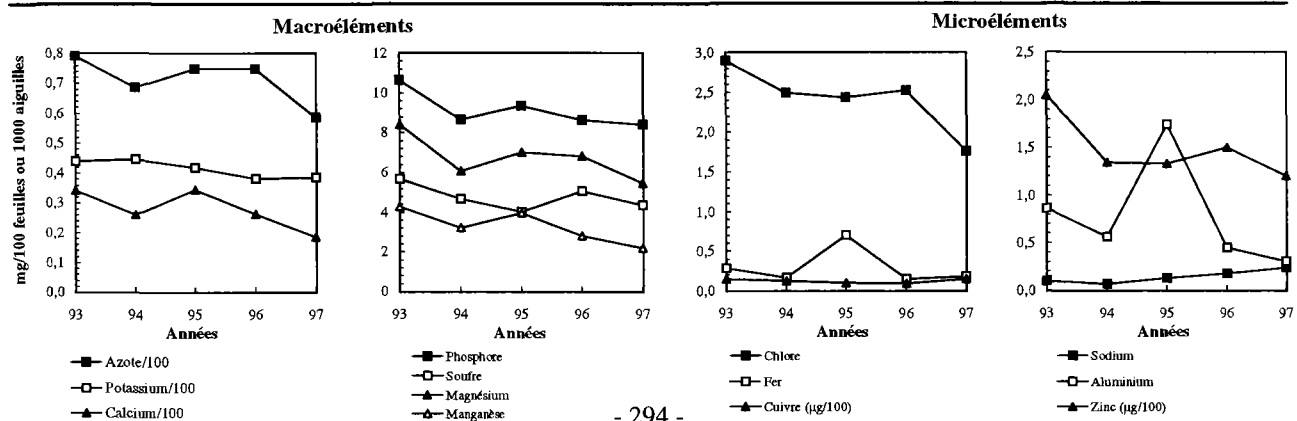
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



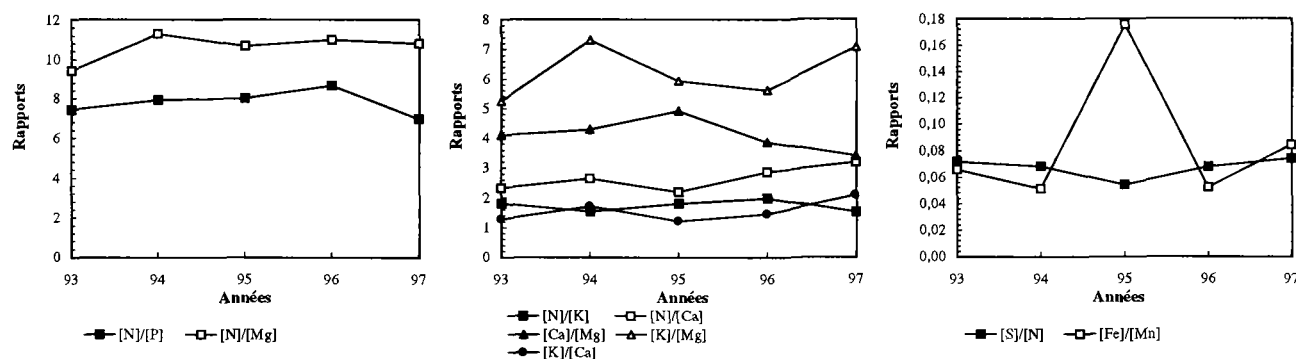
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	11	12	14	15	13	34	19	24	25	89	40	28
Interannuel 93-97 (n=5)	4	8	10	13	14	4	67	16	27	11	53	8	63

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		N, S	Mg	P, K, Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Fe	Zn, Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en soufre, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en magnésium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en phosphore, en potassium, en calcium et en manganèse. Les teneurs en azote dans les couches minérales du sol sont moyennes par rapport aux teneurs observées sur le réseau. Les teneurs en magnésium dans le sol sont satisfaisantes (entre 0,2-0,5 cmolc/Kg). Malgré les teneurs foliaires parfois faibles, aucun déséquilibres nutritionnels marqué n'est visible sur cette placette. L'accroissement en surface terrière ne peut pas être directement comparé à celui des autres placettes car il s'agit d'une futaie jardinée vraie. Les pourcentages de défoliation sont négligeables entre 1994 et 1997 (< 5 %). Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps. C'est le plus vieux peuplement d'épicéa commun du réseau et aussi le plus vieux peuplement toutes essences confondues. Les valeurs des seuils indicatifs devraient donc être adaptées pour cette placette. Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là (voir en particulier l'aluminium et le fer).

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale de Voirons (P. 4)

Commune de Saint-Cergues (Haute Savoie)

Latitude: 46°13'42" N

Longitude: 6°20'58" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation et regarnis

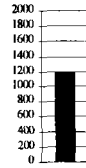
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 73 ± 5

Ho en 1995 (m) : 29,9 ± 1,4

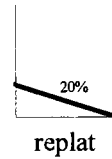
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.60



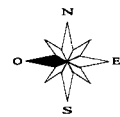
Altitude



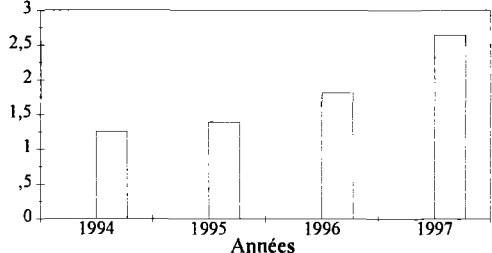
Pente



Exposition



Défoliation (%)



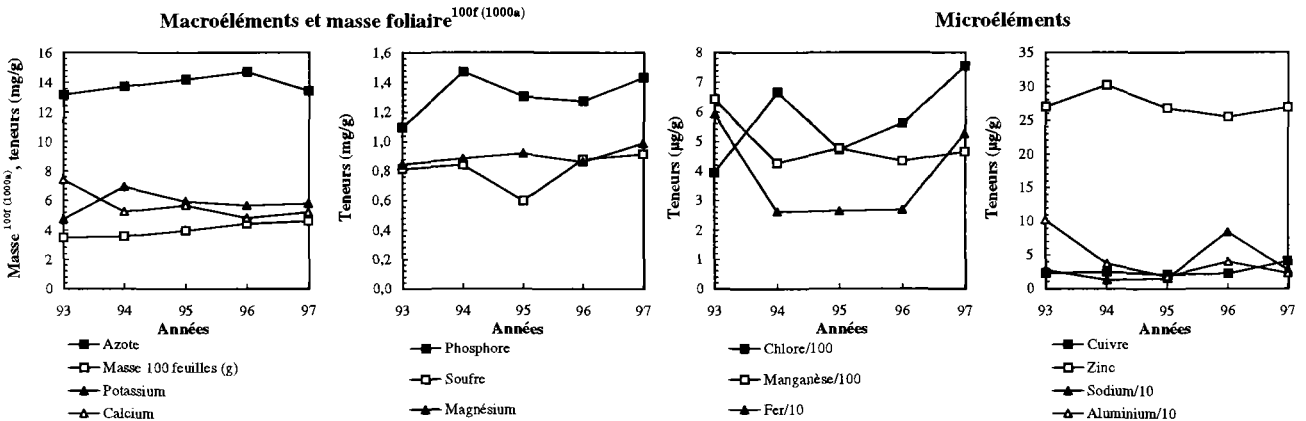
Etat sanitaire

Végétation : *Vaccinio sp. pl.-Piceion abietis*

Humus : Mésomull - Eumull

Type de sol : Pseudogley

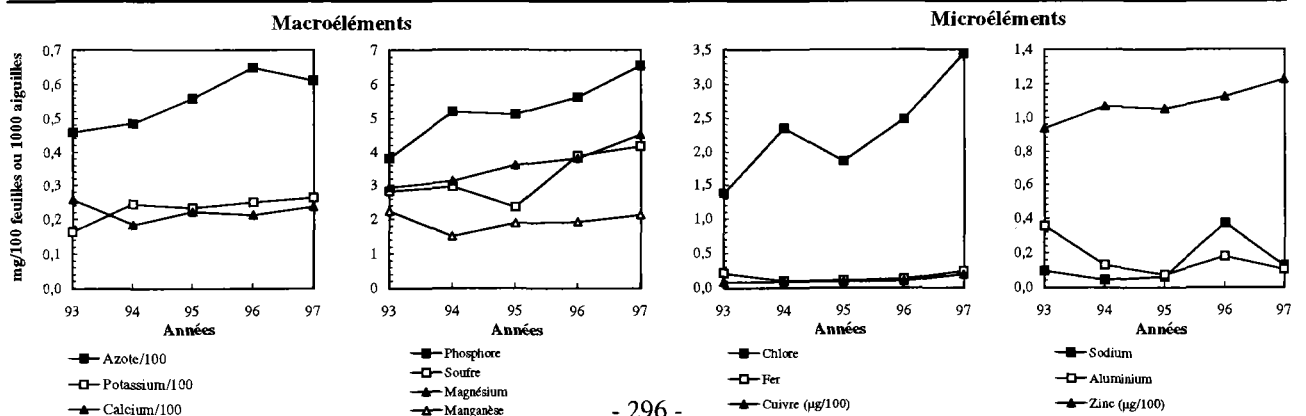
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



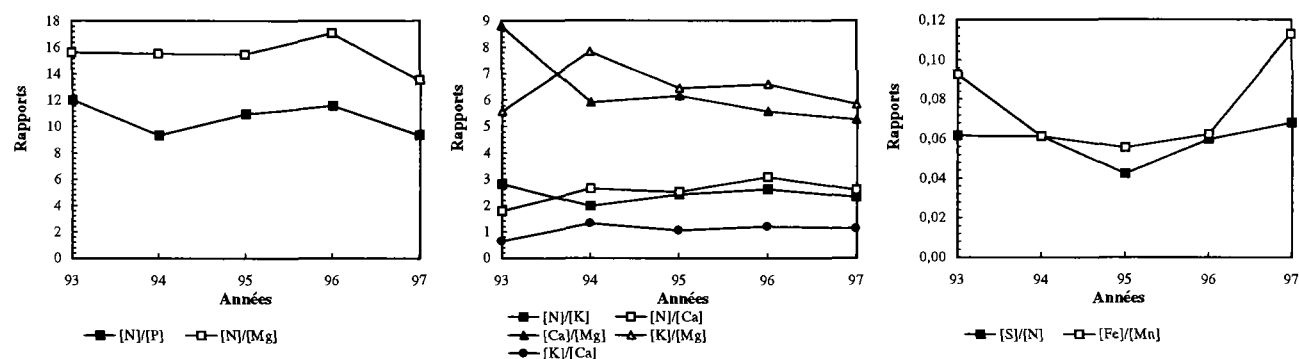
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	15	10	19	16	18	40	57	61	20	210	9	90
Interannuel 93-97 (n=5)	4	10	14	12	16	6	38	16	29	6	79	23	69

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S, Mg	N, P	K, Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Cu	Fe	Mn
					Zn	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en azote, en phosphore et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en potassium, en calcium et en manganèse. Les teneurs en magnésium, en azote et en phosphore dans les couches minérales du sol sont moyennes. Des déséquilibres nutritionnels sont notés pour cette placette: S/N faible (déficit de soufre), N/P élevé. L'accroissement en surface terrière de cette placette est faible (0,60 m²/ha/an) ce qui est à mettre en relation avec l'altitude de la placette (1200 m). Les pourcentages de défoliation sont négligeables entre 1994 et 1997 (< 5 %). Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Des écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (65 jours) mais apparemment sans provoquer de dérive marquée pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Nore (P. 91)

Commune de Mazamet (Tarn)

Latitude: 43°26'31" N

Longitude: 2°26'05" E

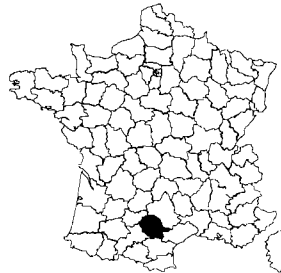
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

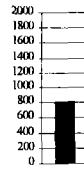
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 43 ± 3

Ho en 1995 (m) : 22,8 ± 1,6

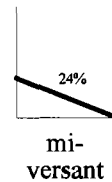
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.18



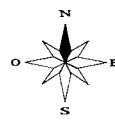
Altitude



Pente

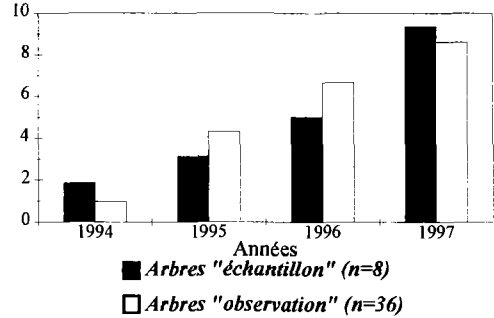


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

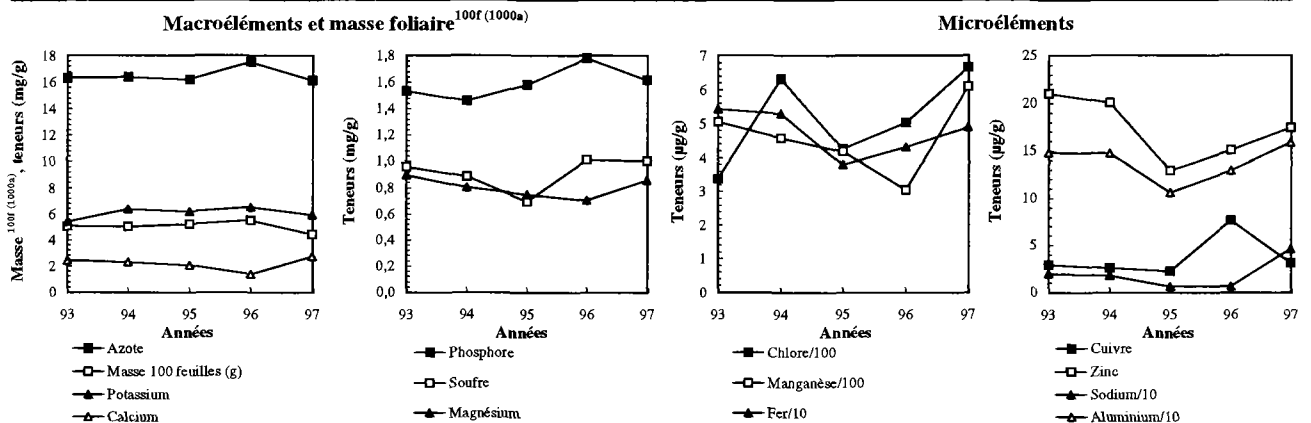


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

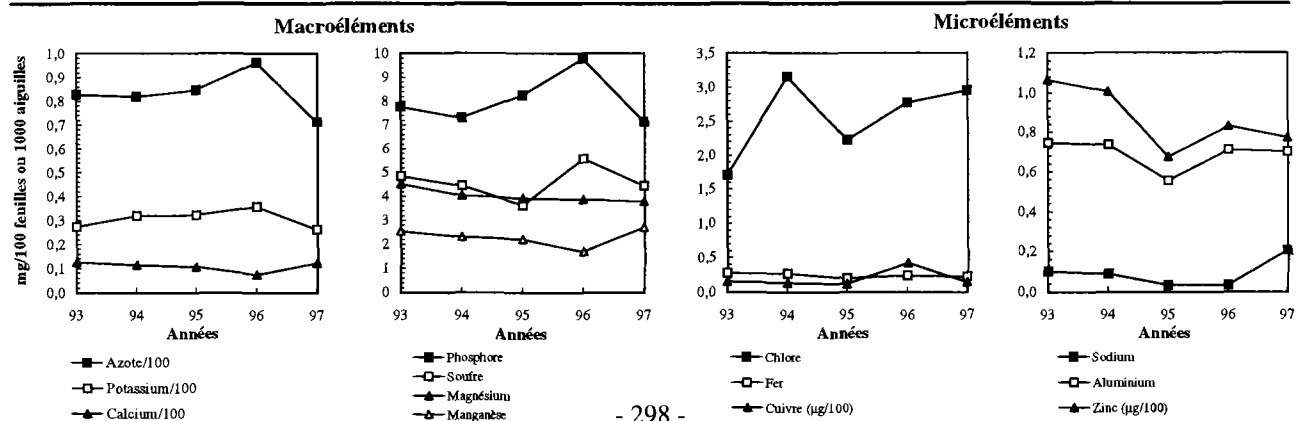
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



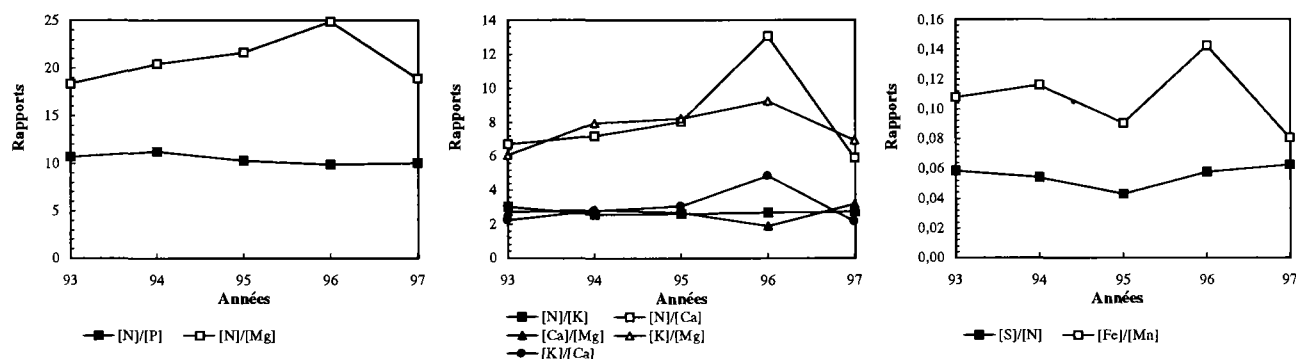
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	8	4	14	25	36	8	29	13	21	110	23	24	
Interannuel 93-97 (n=5)	3	7	13	6	22	9	13	22	54	18	76	24	13	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S, Mg	Ca	N, P, K
Microéléments :	Zn	Fe, Mn, Cu		Zn	Fe	Mn
					Cu	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en magnésium, en zinc (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en calcium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote, en phosphore, en potassium, et en manganèse. Les teneurs en magnésium dans les couches minérales du sol sont faibles (0,04 à 0,15 cmolc/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont notés pour cette placette: S/N faible (déficit de soufre), N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium). L'accroissement en surface terrière de cette placette est élevé (1,5 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %) mais en progression entre 1994 et 1997. Cette évolution pourrait être due en partie à des notations plus sévères de la défoliation à partir de 1995. Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (80 jours), en 94-95 (102 jours) et en 95-96 (66 jours).

Placette de niveau 3

Forêt Sectionale de Monteil (P. 18)

Commune de Peyrat le Chateau (Haute Vienne)

Latitude: 45°48'00" N

Longitude: 1°48'55" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation sur potets

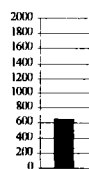
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 23 ± 1

Ho en 1995 (m) : 16,7 ± 0,9

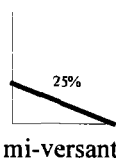
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 3.28



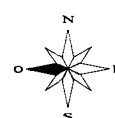
Altitude



Pente

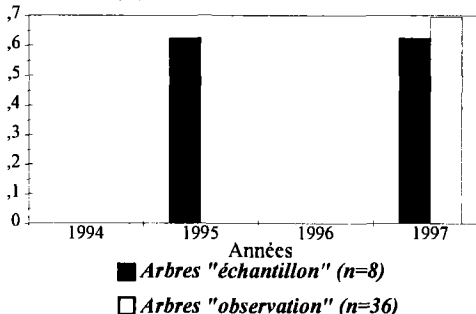


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

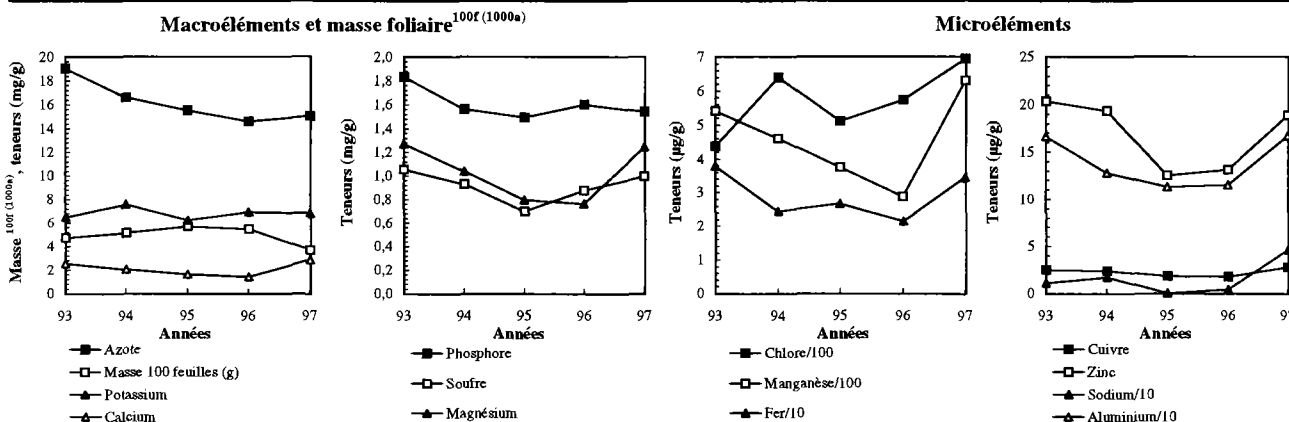


Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

Humus : Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

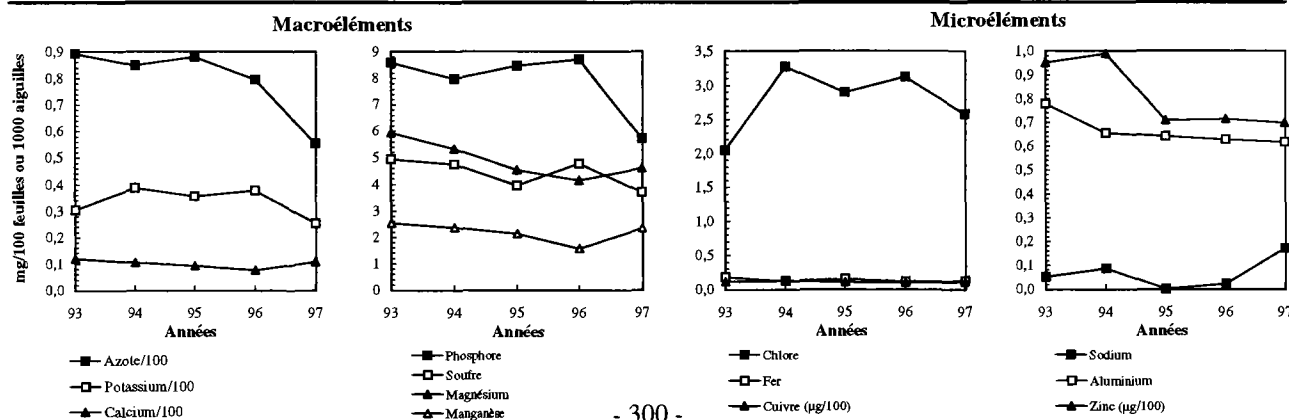
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



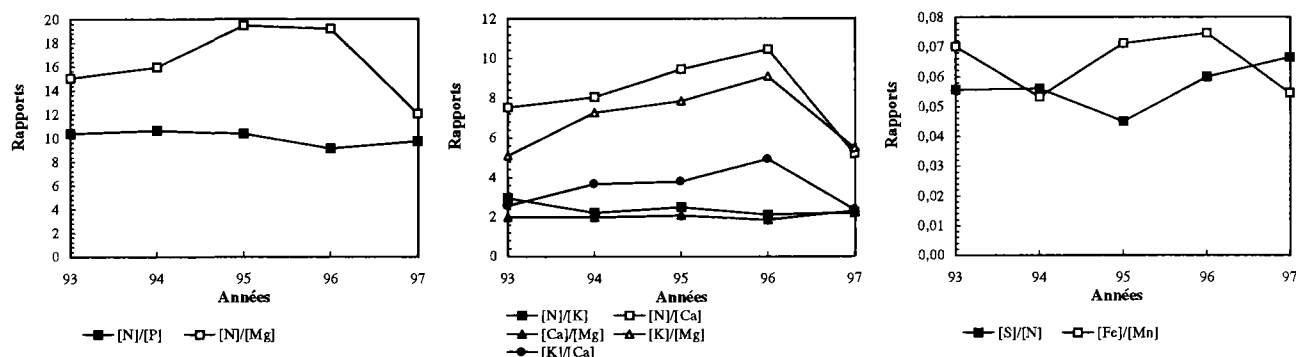
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	10	10	27	26	23	11	25	12	48	113	25	35
Interannuel 93-97 (n=5)	10	7	14	7	26	21	21	26	17	20	104	16	17

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S	Ca, Mg	N, P, K
Microéléments :	Zn	Fe, Mn, Cu		Fe	Cu, Zn	Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en fer dans les aiguilles est mise en évidence pour cette placette et les teneurs foliaires sont faibles pour le soufre, le cuivre, le zinc et dans une moindre mesure pour le calcium et le magnésium. Des teneurs foliaires élevées en azote, en phosphore, en potassium et en manganèse sont notées. Les teneurs en calcium et en magnésium échangeable dans les couches minérales du sol sont moyennes à faibles (environ 0,12 et 0,08 cmolc/Kg). Des déséquilibres nutritionnels sont visibles sur cette placette: rapport S/N faible (déficit de soufre), rapports N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit de magnésium et valeurs élevées d'azote). C'est le plus jeune peuplement d'épicéa commun (23 ans à 1,30 m en 1994). Il a le plus fort accroissement annuel en surface terrière (3,28 m²/ha/an) mais l'accroissement annuel en diamètre obtenu par les mesures dendrométriques est très supérieur à celui obtenu par lecture des cernes pour la même période de croissance. Pratiquement aucune défoliation n'est observée sur cette placette. Aucune évolution évidente des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps. Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Sectionale de Laveline (P. 27)

Commune de Ban de Laveline (Vosges)

Latitude: 48°14'02" N

Longitude: 7°06'14" E

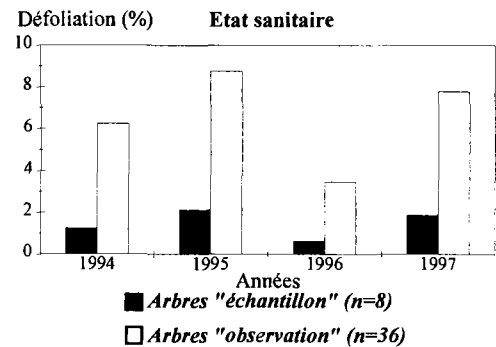
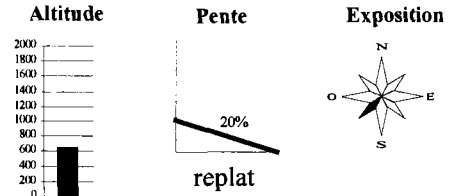
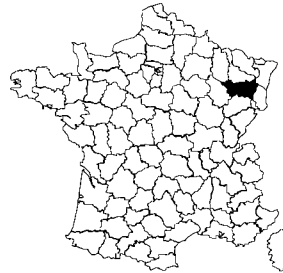
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 89 ± 2

Ho en 1995 (m) : 34,8 ± 2,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.42

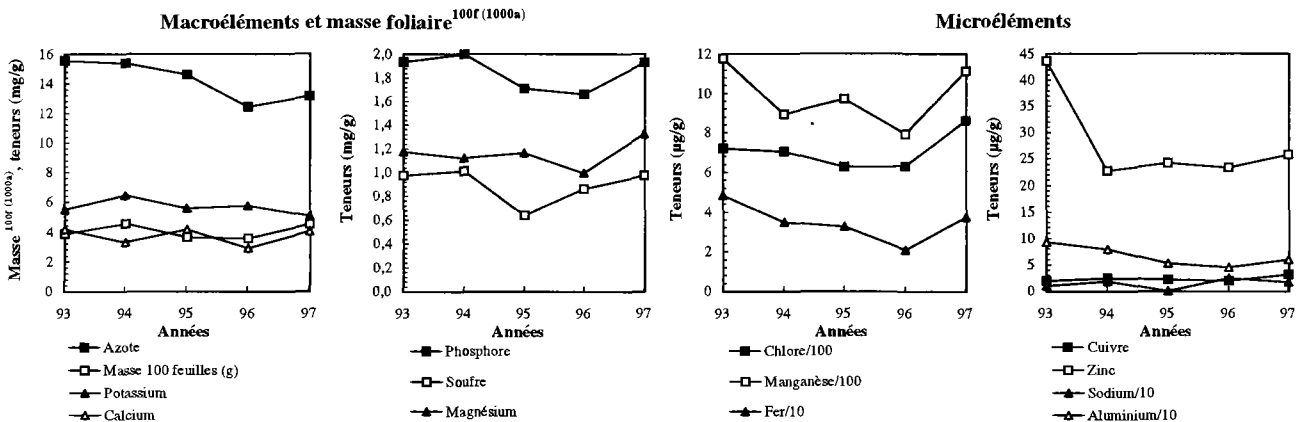


Végétation : *Luzulo luzuloidis-Fagenion sylvaticae*

Humus : Dysmull

Type de sol : Sol brun acide

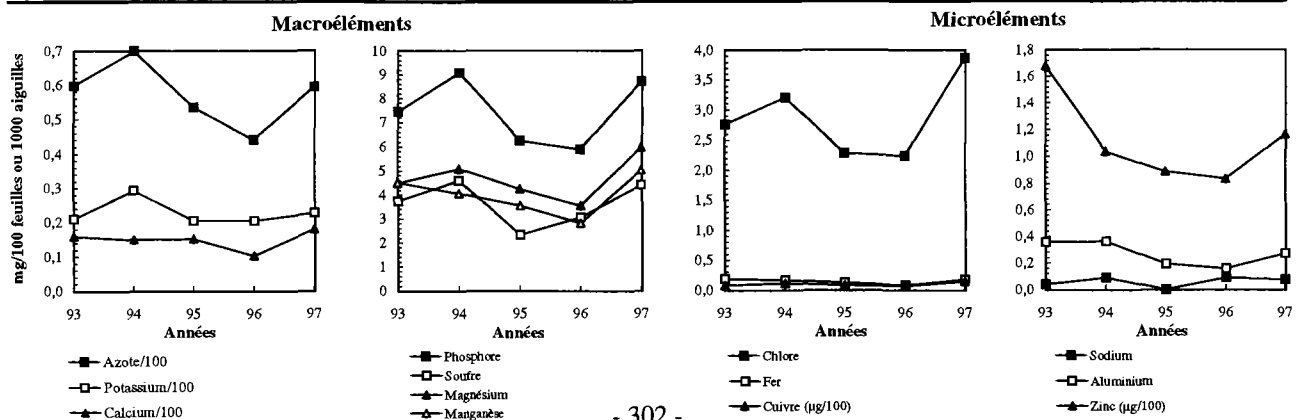
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



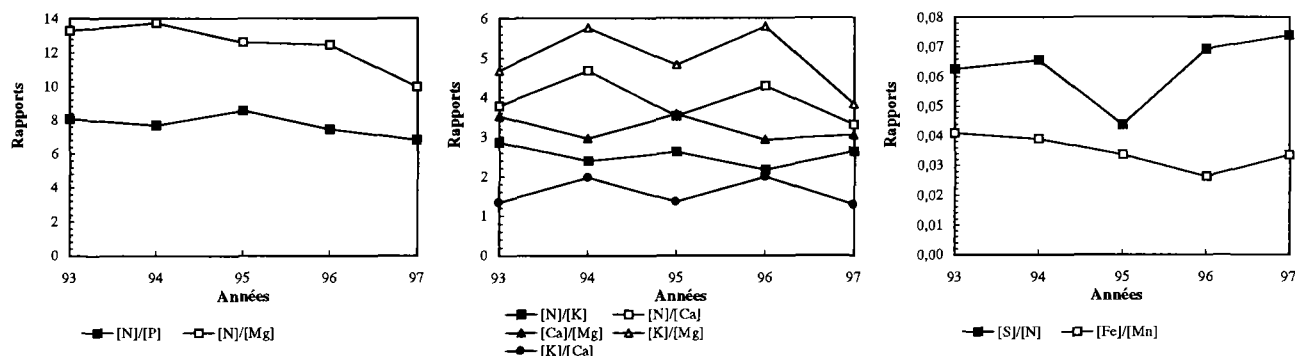
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	10	9	21	19	17	43	23	18	22	186	22	26	
Interannuel 93-97 (n=5)	9	7	15	8	14	9	25	14	20	28	61	12	27	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S	N, Ca, Mg	P, K
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Cu	Fe	Zn, Mn

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	11	1,0	0,8	4,0	1,0	0,6	30	20	2,0	10
	Critique	13	1,3	1,0	4,5	2,0	1,0			3,0	20
	Optimum	15	1,5		5,5	4,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	9,0	6,0	1,5	200	2000	7	60

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en cuivre (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en azote, en calcium, en magnésium et en fer (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en phosphore, en potassium, et en manganèse. Les teneurs en calcium et en magnésium dans les couches minérales du sol sont moyennes. Des déséquilibres nutritionnels sont notés pour cette placette: S/N et N/P faibles (déficit de soufre et valeurs élevées de phosphore), N/P, N/Mg et K/Mg élevés (déficit en magnésium). L'accroissement en surface terrière de cette placette est faible (0,42 m²/ha/an) à cause de l'âge du peuplement (89 ans à 1,30 m en 1994).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %). Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps. On remarque cependant des teneurs foliaires en zinc particulièrement élevées en 1993.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Retz (P. 19)

Commune de Oigny en Valois (Aisne)

Latitude: 49°12'21" N

Longitude: 3°07'36" E

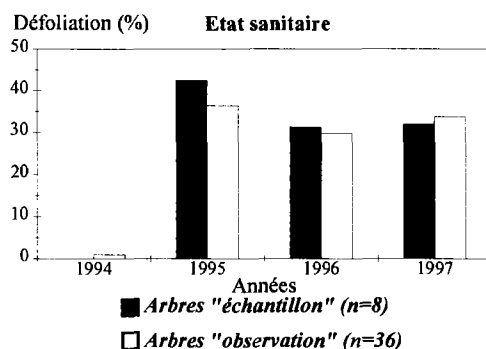
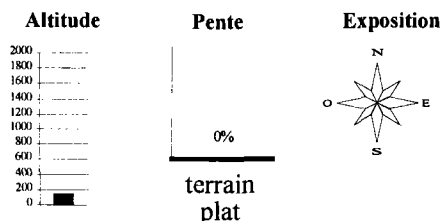
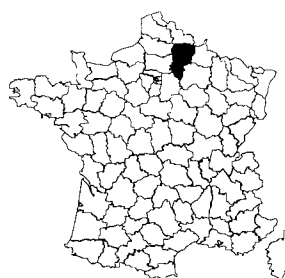
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation - Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 53 ± 4

Ho en 1995 (m) : 29,2 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.16

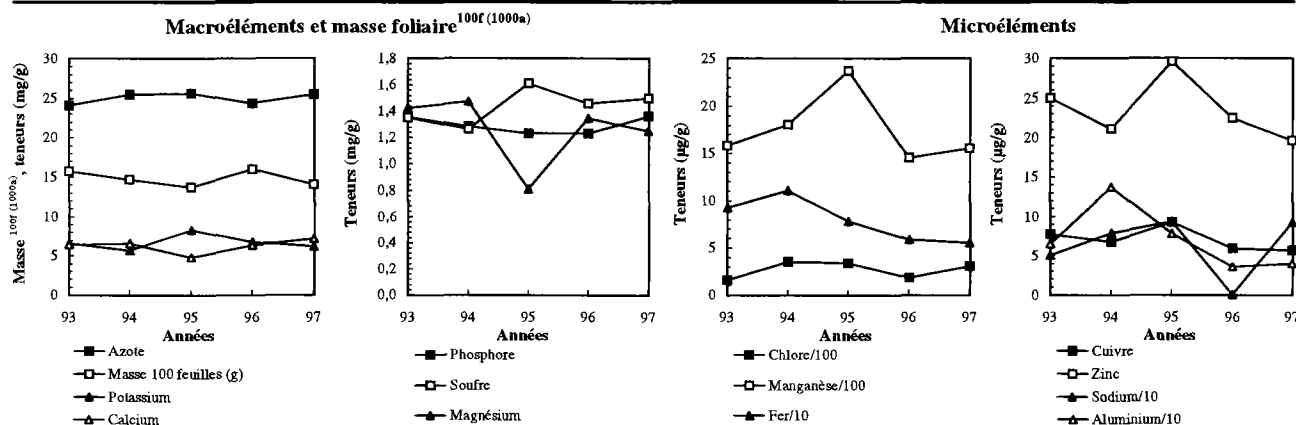


Végétation : Galio odorati-Fagenion

Humus : Moder - Hémimoder

Type de sol : Pseudogley

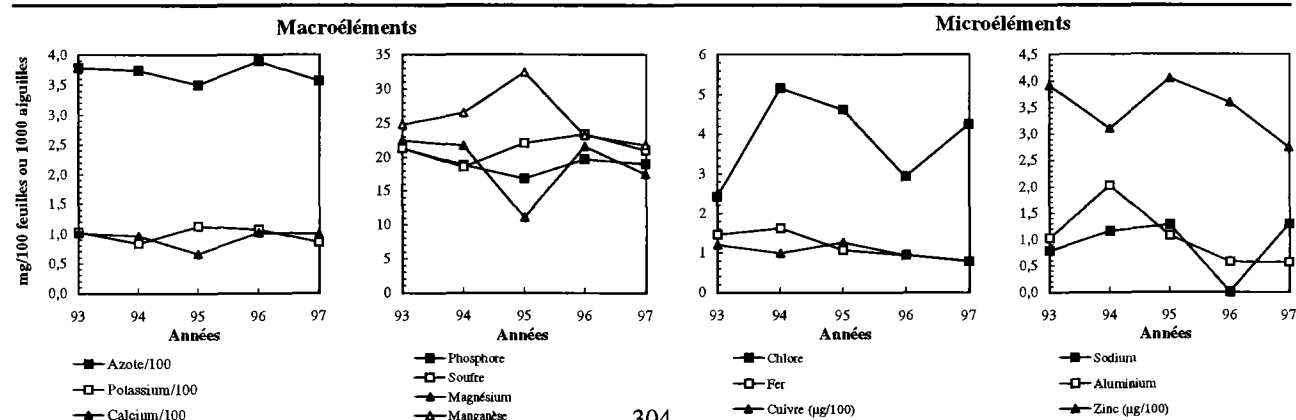
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



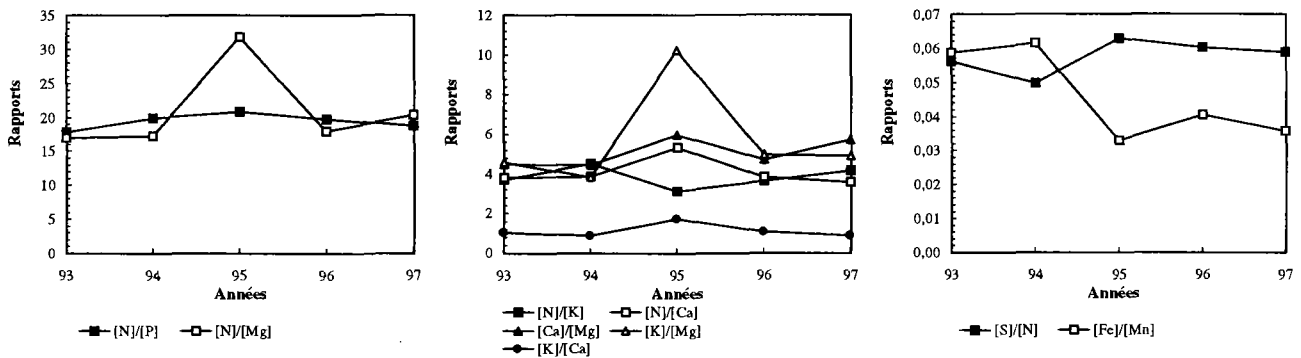
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	13	3	19	5	22	12	24	10	18	49	22	25
Interannuel 93-97 (n=5)	3	5	8	13	12	19	26	19	19	15	56	31	51

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P, Ca, Mg, K			S, K	P, Mg	N, Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en potassium (entre le seuil indicatif de carence et le seuil critique), en phosphore et en magnésium (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium, phosphore et magnésium dans les couches minérales du sol sont pourtant satisfaisantes jusqu'à 40 cm. En 1995 la teneur foliaire en magnésium est particulièrement basse, ce qui entraîne des rapports (N/Mg et K/Mg) élevés. L'accroissement en diamètre pour cette placette est le plus fort (0,73 cm/an entre 92 et 95) avec la placette HET 60.

Les pourcentages de défoliation sont élevés depuis 1995 (entre 30 et 45 %). Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale des Colettes (P. 70)

Commune de Coutansouze (Allier)

Latitude: 46°11'37" N

Longitude: 2°59'54" E

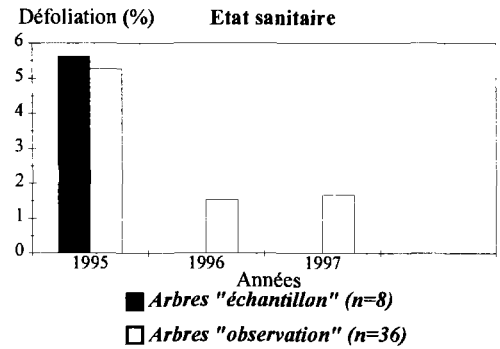
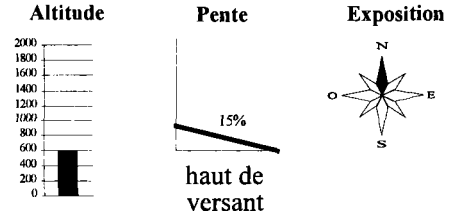
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 87 ± 22

Ho en 1995 (m) : 28,9 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.39

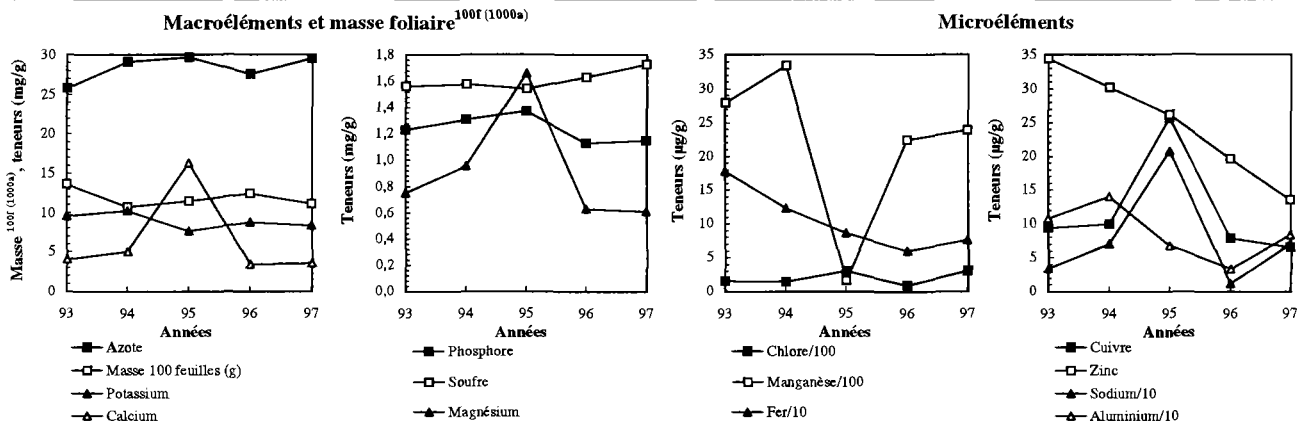


Végétation : non disponible

Humus : Dymull - Oligomull

Type de sol : Sol brun acide

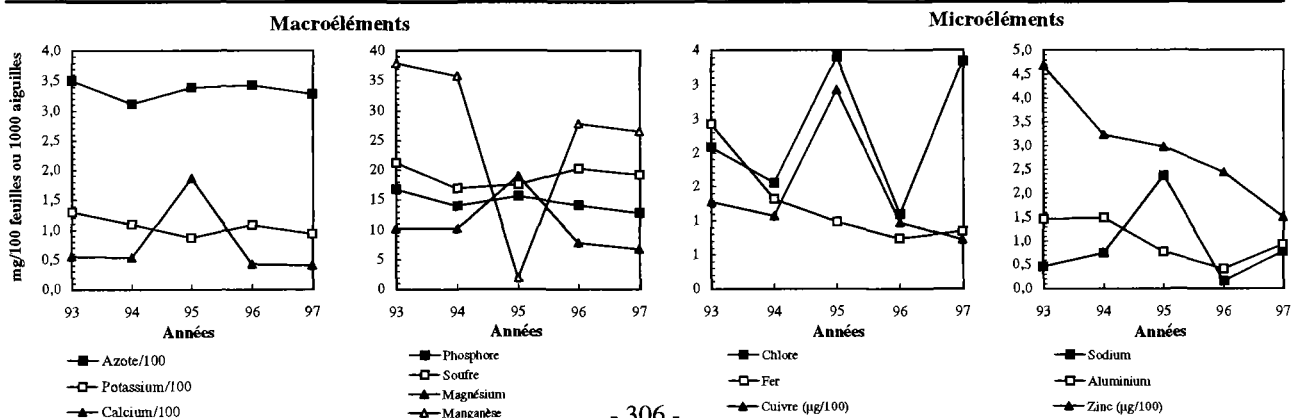
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



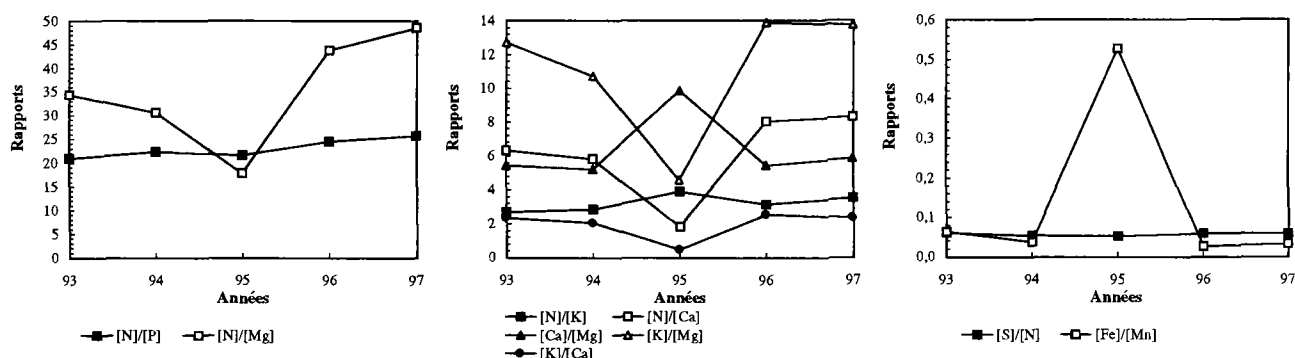
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	6	6	9	30	19	8	28	19	19	44	70	13
Interannuel 93-97 (n=5)	5	7	4	10	76	42	41	49	59	30	86	44	42

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	Mg	S, P, Ca, K	N		K	N
Microéléments :		Fe, Mn, Zn	Cu	P, Mg	S, Ca	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en magnésium foliaire est mise en évidence certaines années (93, 96 et 97). Les teneurs foliaires sont faibles pour le phosphore et le potassium, elles sont élevées pour l'azote. Les teneurs en magnésium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles (0,04 à 0,16 cmolc/Kg), les teneurs en potassium sont faibles à moyennes (0,06 à 0,20 cmolc/Kg) et celles de phosphore (Dyer) sont faibles dans les couches 10-40 cm (0,0 à 0,5 mg/Kg). Le rapport N/Mg est élevé (déficit de magnésium). Les hêtres de cette placette ont un accroissement en surface terrière moyen (0,39 m²/ha/an). Pratiquement aucune défoliation n'est observée sur cette placette.

Les teneurs foliaires en fer et en zinc diminuent fortement entre 1993 et 1997. En 1995, on observe des teneurs particulièrement élevées de calcium, magnésium, sodium et cuivre et de teneurs très faibles de manganèse. Ces valeurs sont difficiles à interpréter.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1993 et en 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses ces années là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale du Jabron (P. 17)

Commune de Noyers sur Jabron (Alpes de Haute Provence)

Latitude: 44°07'52" N

Longitude: 5°48'00" E

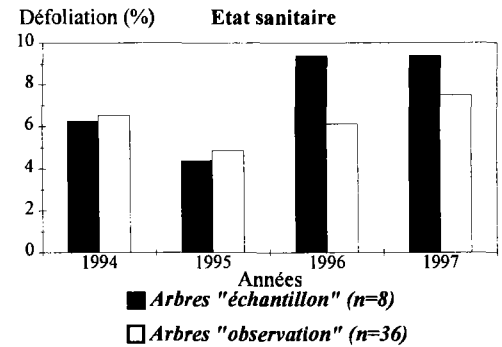
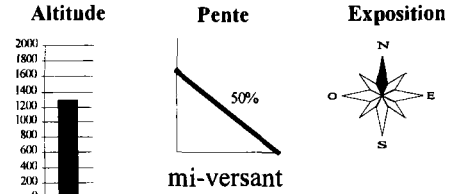
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Rejet sur souche

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 88 ± 13

Ho en 1995 (m) : 25,5 ± 1,3

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.68

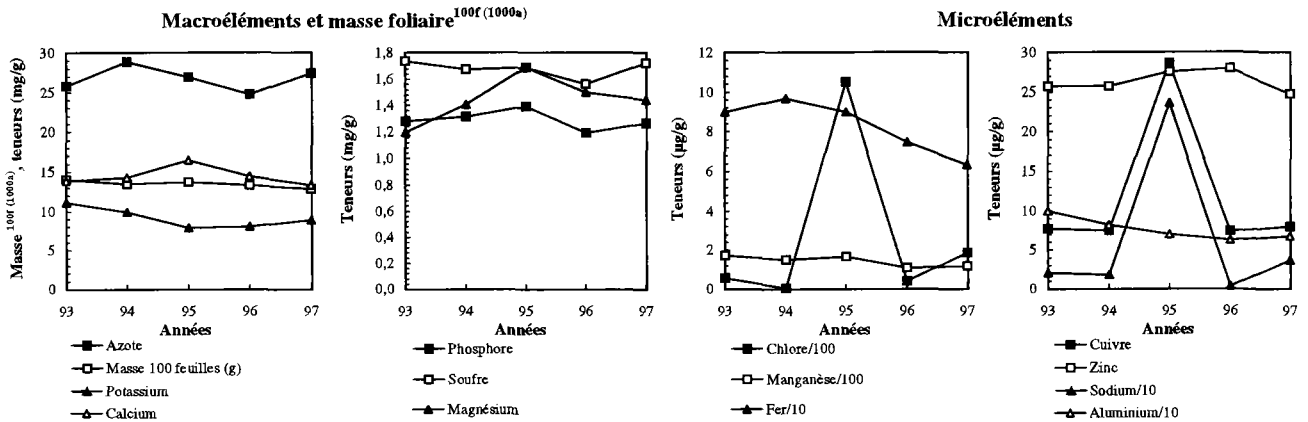


Végétation : *Geranio nodosi-Fagenion sylvaticae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun calcique

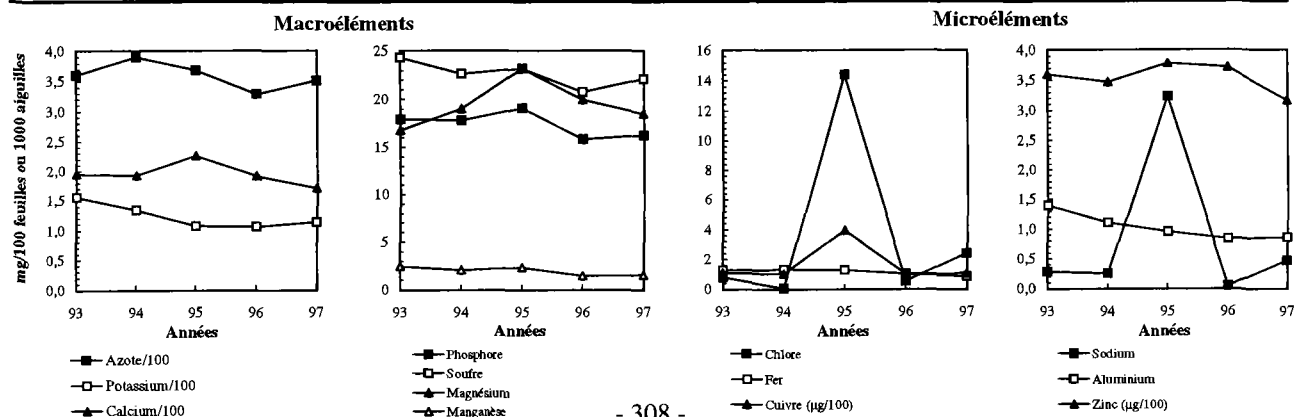
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



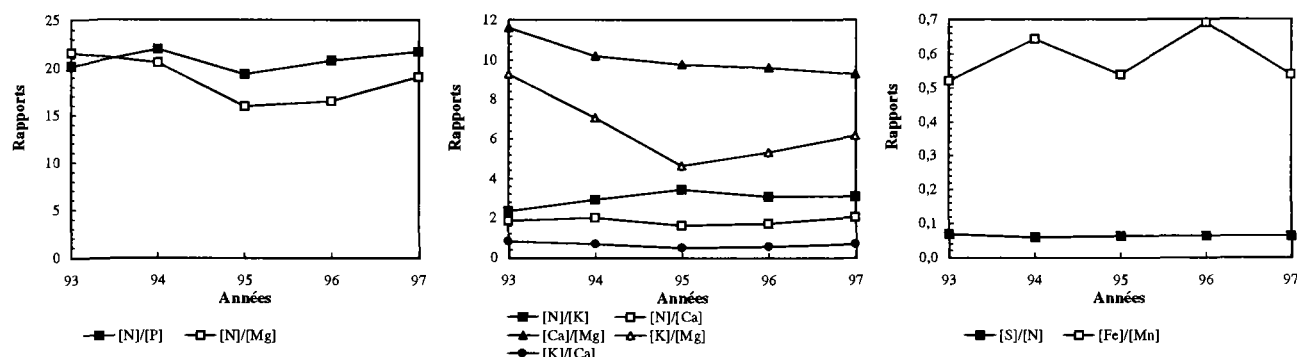
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	10	7	17	14	29	3	37	46	20	35	12	9
Interannuel 93-97 (n=5)	5	5	4	13	7	11	15	18	71	5	139	149	18

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Mg, K		N, Ca	P, Mg, S, Ca, N, K		
Microéléments :	Fe, Mn, Zn		Cu			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote en potassium et parfois en calcium. Les teneurs en phosphore et magnésium dans les couches minérales du sol sont moyennes mais les teneurs en calcium sont très élevées (environ 28 cmolc/Kg) ce qui entraîne des rapports N/Ca et K/Ca faibles. L'accroissement en surface terrière pour cette placette est moyen (0,68 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles depuis 1994 (< 10 %). Aucune évolution des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps mais en 1995 on observe des teneurs foliaires particulièrement élevées en chlore, en cuivre et en sodium.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Soulan (P. 13)

Commune de Soulan (Ariège)

Latitude: 42°55'53" N

Longitude: 1°16'56" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

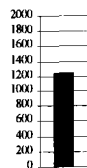
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 152 ± 9

Ho en 1995 (m) : 21,4 ± 1,4

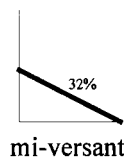
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.03



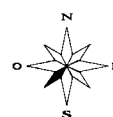
Altitude



Pente

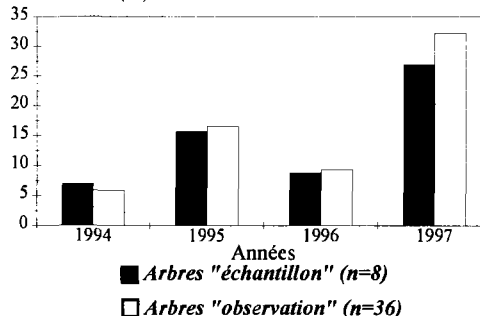


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

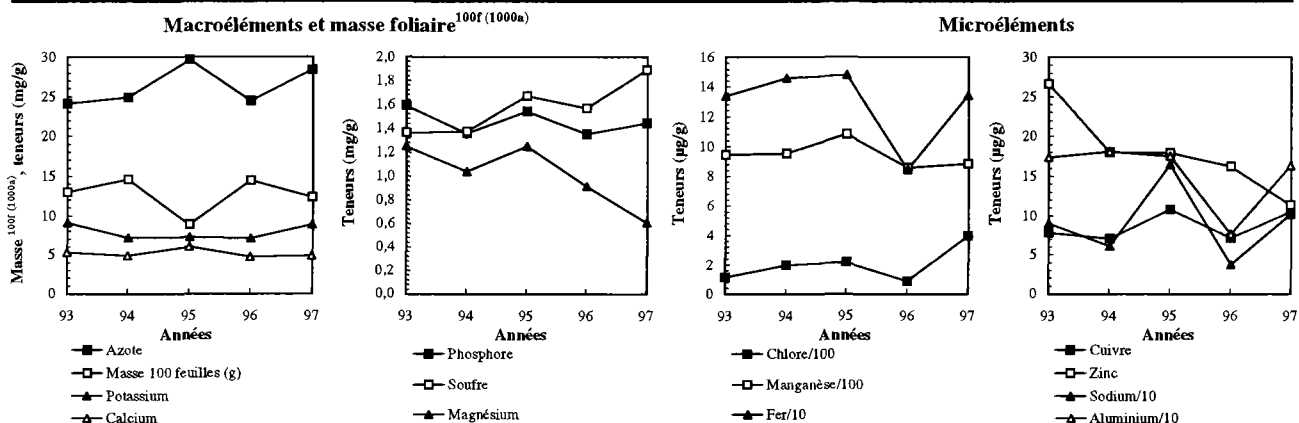


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

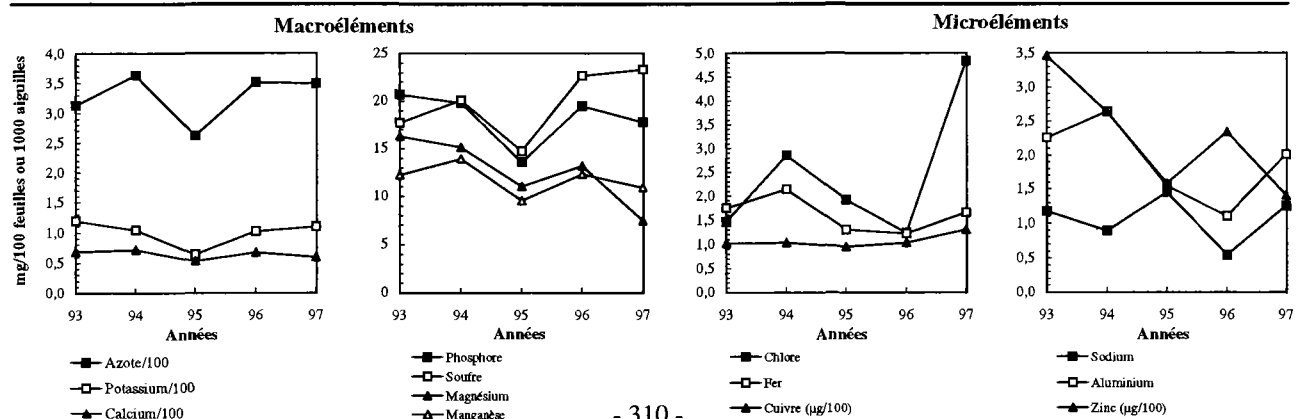
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



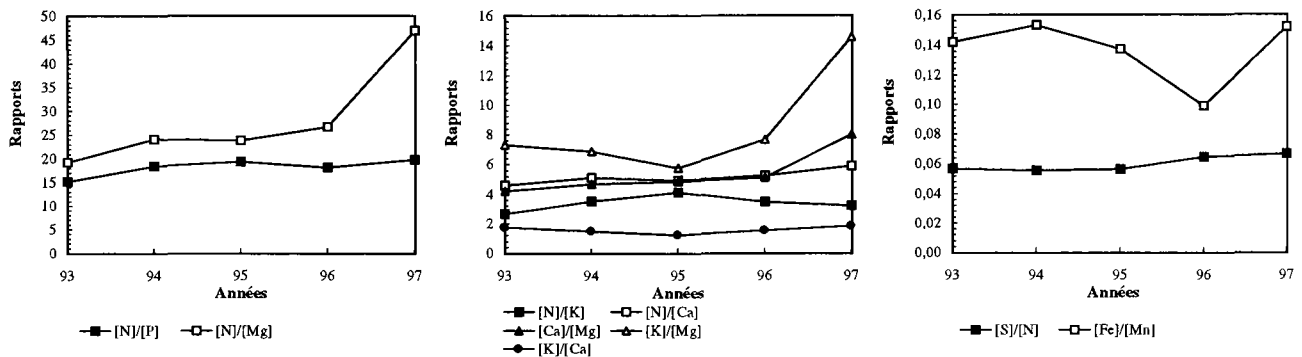
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	9	10	15	26	35	21	23	30	19	16	48	24
Interannuel 93-97 (n=5)	9	7	13	12	9	24	18	8	19	27	47	54	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Ca, Mg, K			K, N		
				P, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Zn	Fe, Mn, Cu				

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et optimal) et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium et magnésium dans les couches minérales du sol sont moyennes et les teneurs en phosphore sont même élevés (de 9 à 23 cmolc/Kg selon les couches minérales). Le rapport N/Mg est élevé (azote abondant et magnésium peu abondant). L'accroissement en surface terrière pour cette placette est très faible (0,03 m²/ha/an), c'est une placette d'altitude (1200 m). Les pourcentages de défoliation faibles depuis 1994 (< 15 %) deviennent plus importants en 1997 (30 %). Une diminution des teneurs foliaires en magnésium et en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est élevée pour le magnésium.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là (voir N, Mg, Na).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Cerisy (P. 117)

Commune de Montfiquet (Calvados)

Latitude: 49°10'57" N

Longitude: 0°51'23" W

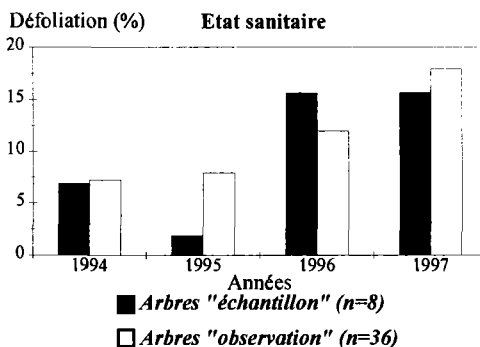
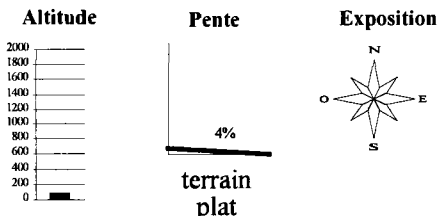
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 83 ± 4

Ho en 1995 (m) : 25,2 ± 1,8

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.18



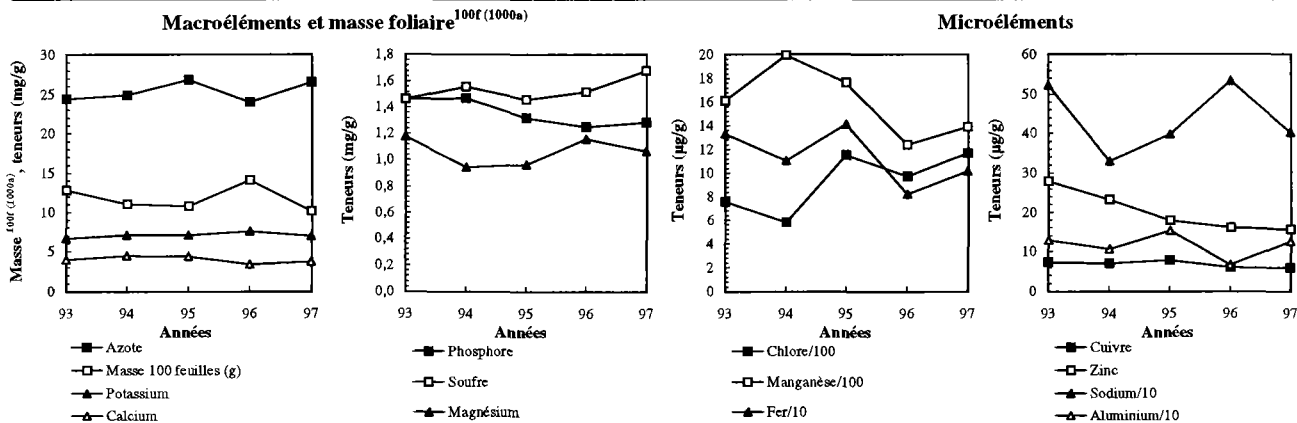
Végétation : *Carpinion betuli*

Humus : Moder - Dysmoder

Type de sol : Sol brun acide superficiel

Sol brun faiblement lessivé

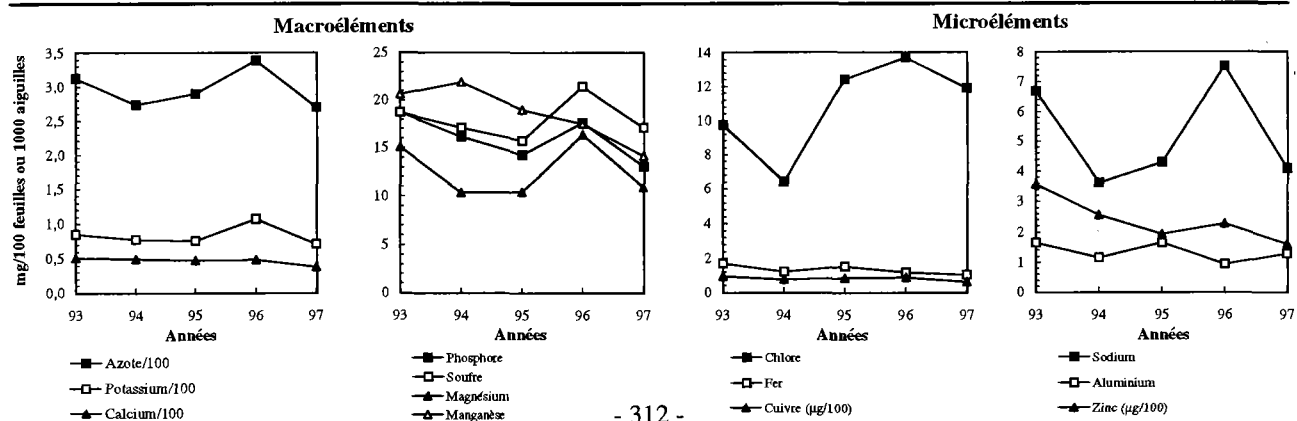
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



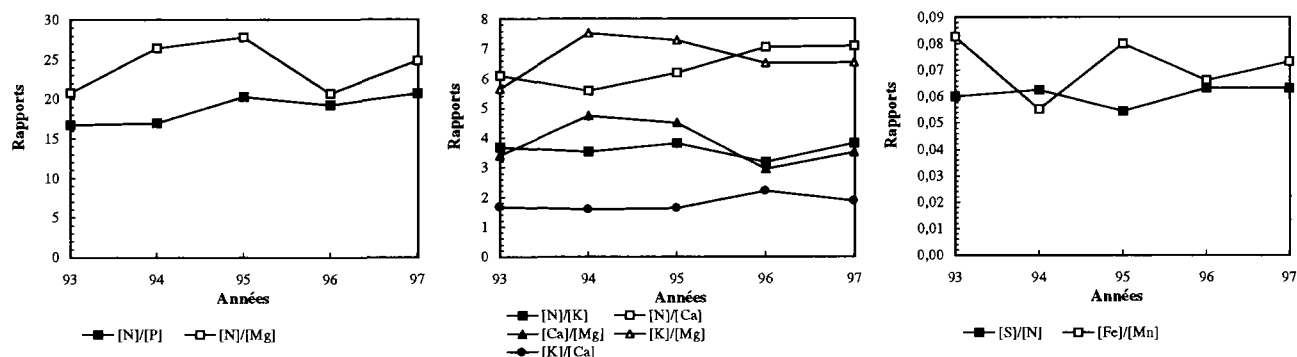
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	9	13	25	12	25	10	16	13	25	31	23	15
Interannuel 93-97 (n=5)	4	7	5	4	10	9	19	17	11	24	18	25	25

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	Ca	S, P, Mg, K	N	Ca	P, Mg	K, S, N
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en calcium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, phosphore, magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs de ces éléments sont moyennes à faibles dans les couches minérales du sol. Le rapport N/Ca est élevé (azote abondant et calcium peu abondant). L'accroissement en surface terrière pour cette placette est faible (0,18 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1994 et 1995 (< 10 %) et augmentent ensuite (entre 15 et 20 %). Cette augmentation pourrait résulter en partie des notations plus sévères à partir de 1996. Une diminution des teneurs foliaires en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est élevée.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lugny (P. 17)

Commune de Leuglay (Côte d'Or)

Latitude: 47°48'50" N

Longitude: 4°51'18" E

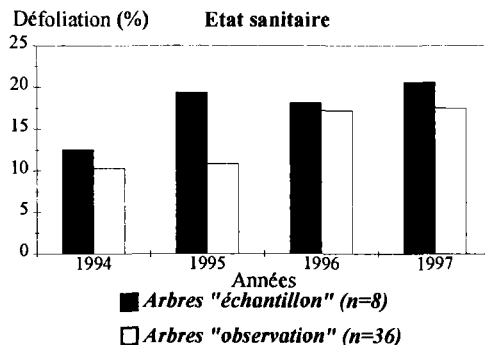
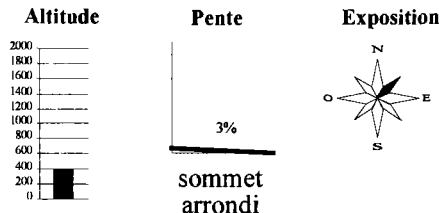
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle, rejet sur souche et balivage intensif

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 128 ± 13

Ho en 1995 (m) : 28,6 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : -0.72

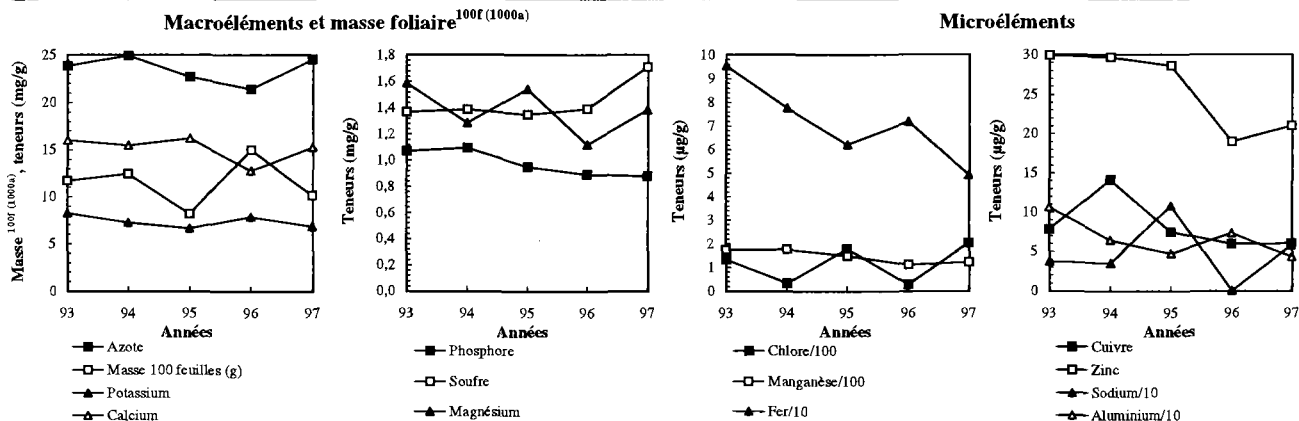


Végétation : *Cephalanthero-Fagion*

Humus : Mésomull - Eumull

Type de sol : Rendzine

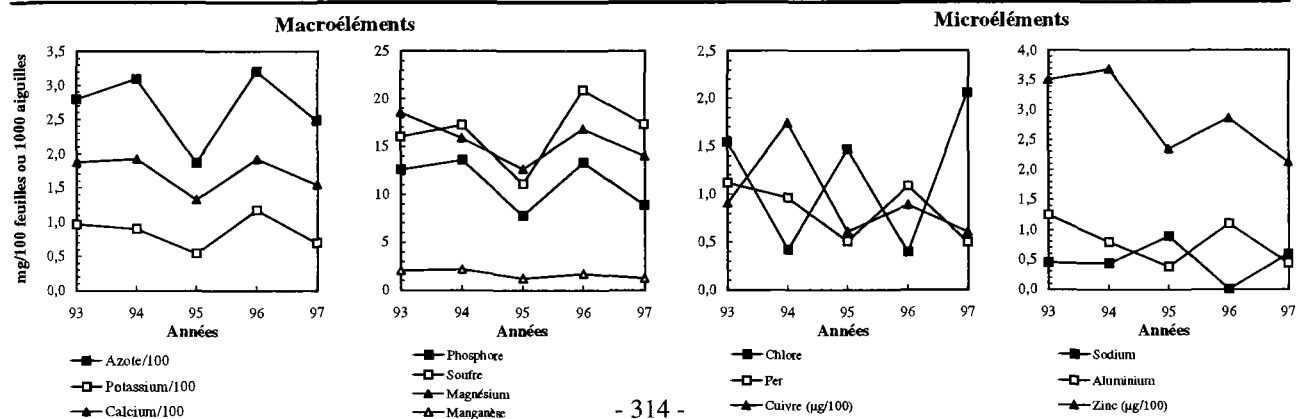
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



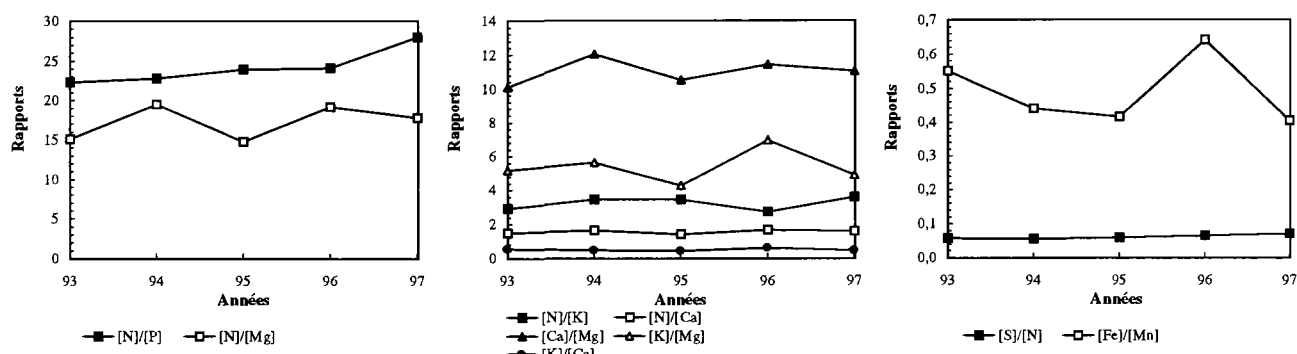
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	3	15	5	17	22	18	8	77	23	35	62	25	18	
Interannuel 93-97 (n=5)	5	9	9	8	8	12	22	18	37	18	74	64	34	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}											
Classes	I	II	III												
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé												
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal									
Macroéléments :	<table border="1"> <tr> <td>P</td> <td>N, S, Mg, K</td> <td>Ca</td> </tr> </table>			P	N, S, Mg, K	Ca	<table border="1"> <tr> <td>S</td> <td>K</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>P, Mg</td> <td></td> <td>Ca</td> </tr> </table>			S	K	N	P, Mg		Ca
P	N, S, Mg, K	Ca													
S	K	N													
P, Mg		Ca													
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn														

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, phosphore, magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium sont moyennes à faibles dans les couches minérales du sol, celles de phosphore et de magnésium sont moyennes. Les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles.

Les pourcentages de défoliation sont compris entre 10 et 25 %. Une diminution des teneurs foliaires en fer et en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est élevée pour le zinc.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de la Verrière du Grosbois (P. 20)

Commune de Verrière du Grosbois (Doubs)

Latitude: 47°11'31" N

Longitude: 6°16'41" E

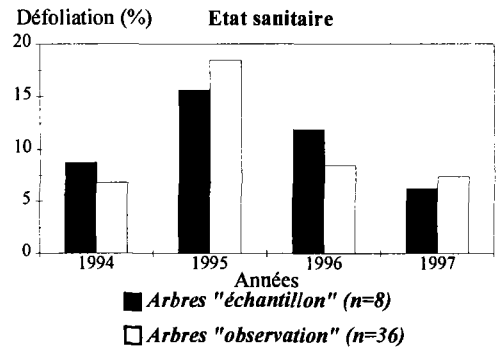
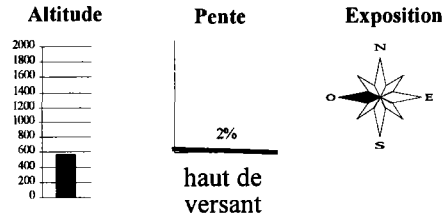
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 41 ± 6

Ho en 1995 (m) : 20,1 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.00

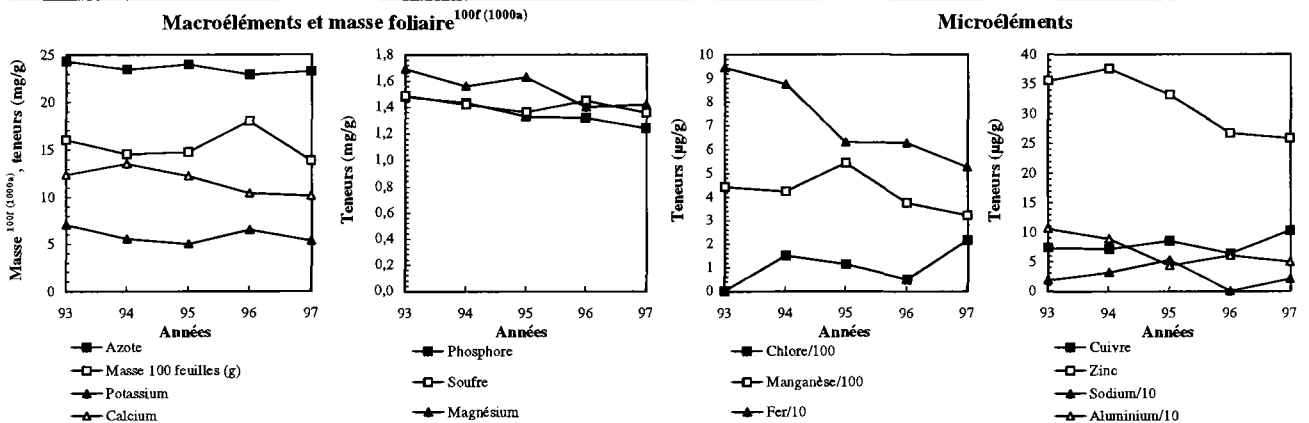


Végétation : *Daphno laureolae-Carpinienion betuli*

Humus : Eumull

Type de sol : Sol brun eutrophe, calcaire

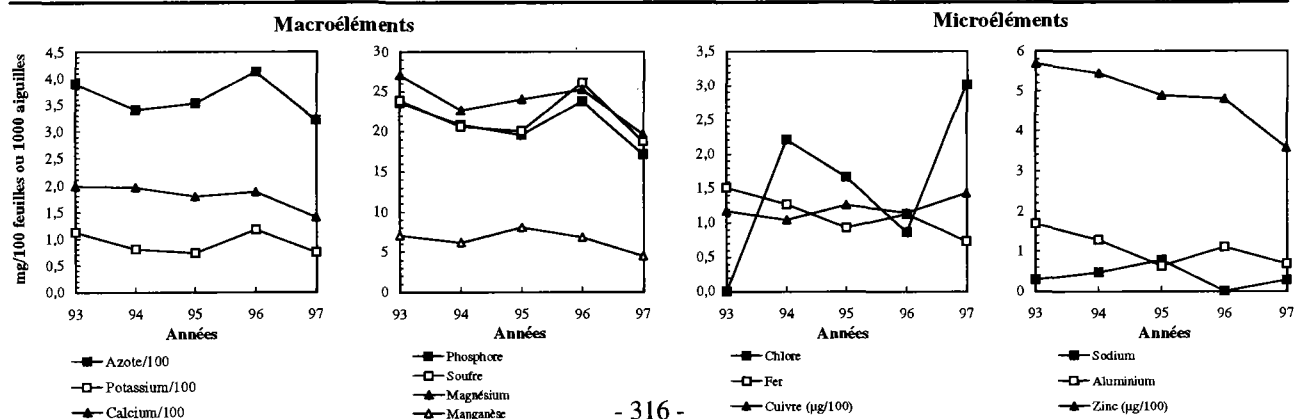
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



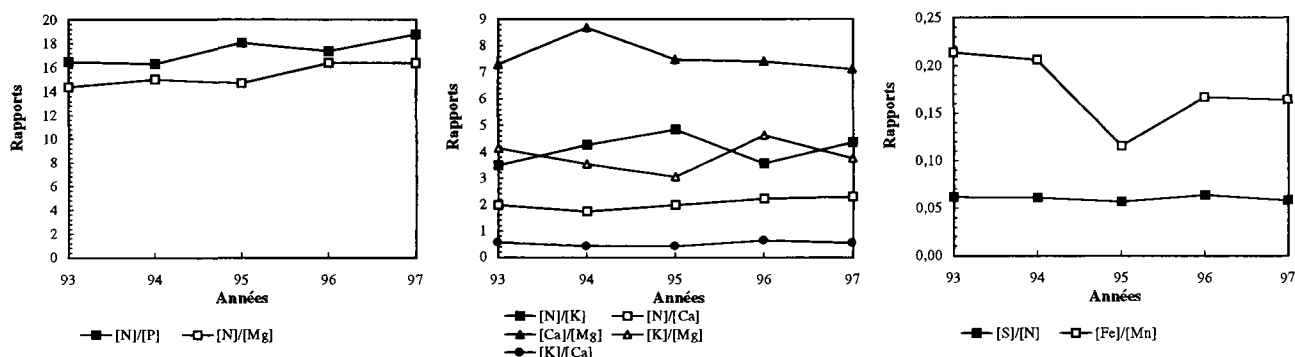
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	6	10	24	19	17	35	27	101	19	76	31	51	
Interannuel 93-97 (n=5)	2	6	4	13	11	7	22	18	17	15	70	72	34	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P, K			S, K		
				P		
				N, Mg		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Ca		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en potassium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en phosphore (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote et en magnésium. Les teneurs en potassium et en phosphore sont moyennes dans les couches minérales du sol et élevées pour le magnésium (0,4 à 0,9 cmolc/Kg). Les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Une diminution des teneurs foliaires en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est élevée. C'est le plus jeune peuplement de hêtre du réseau (41 ans à 1,30 m en 1994).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lente (P. 168)

Commune de Bouvante (Drôme)

Latitude: 44°55'04" N

Longitude: 5°17'46" E

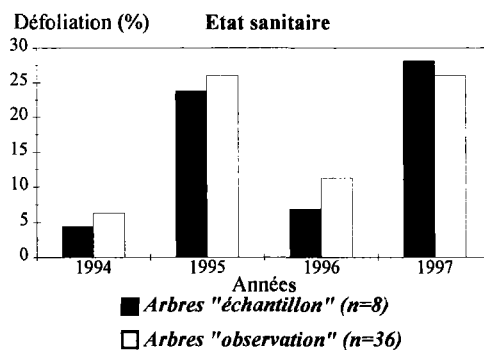
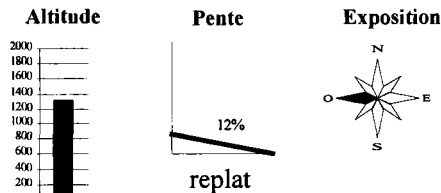
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 158 ± 5

Ho en 1995 (m) : 22,9 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.16



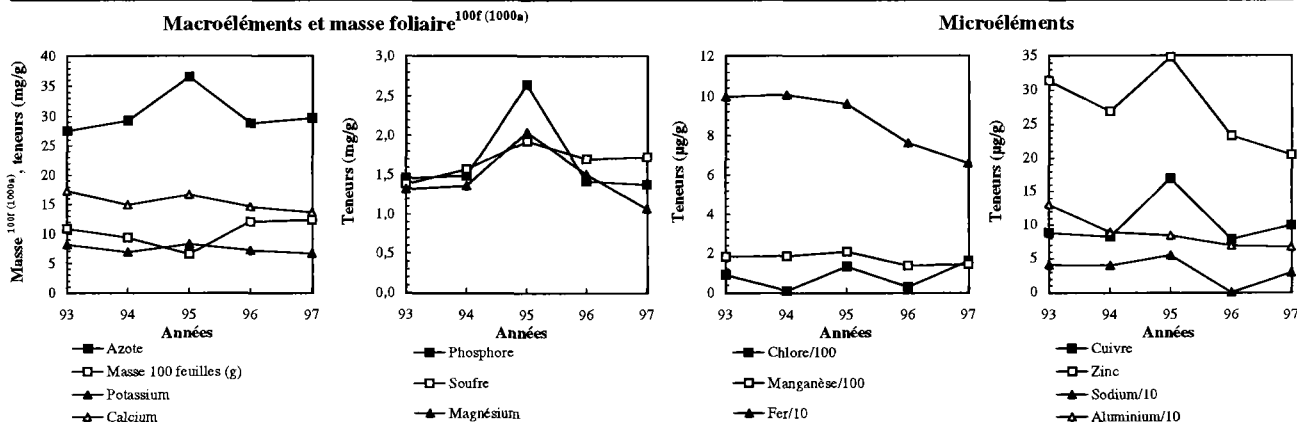
Végétation : *Geranio nodosi-Fagenion sylvaticae*

Humus : Mésomull

Type de sol : Rendzine

Rendzine colluviale

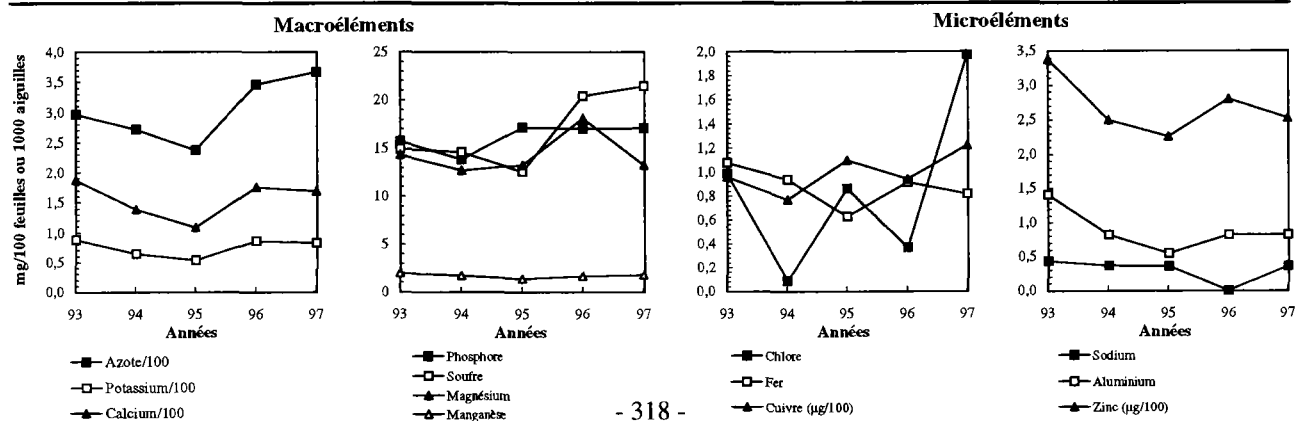
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



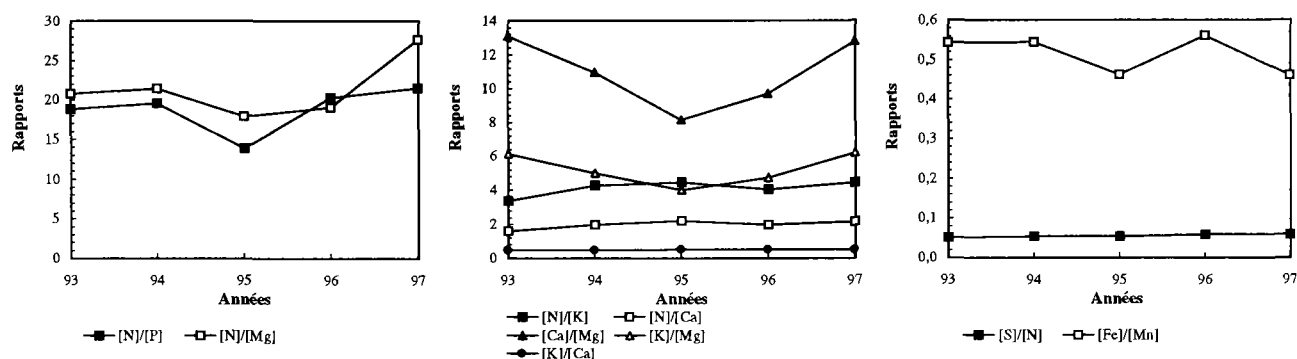
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	11	7	14	28	17	14	22	77	20	56	25	26
Interannuel 93-97 (n=5)	10	29	11	9	9	22	16	16	32	19	56	68	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Mg, K		N, Ca	P, Mg, K, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Zn			Cu		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en phosphore, en potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium et en phosphore sont moyennes dans les couches minérales du sol et élevées pour le magnésium (0,4 à 1,1 cmolc/Kg). Les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles. L'accroissement en surface terrière est faible (0,16 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %) en 1994 et 1996, ils sont plus élevés en 1995 et 1997 (entre 25 et 30 %). Aucune tendance claire n'est observée pour les teneurs foliaires; les teneurs en zinc ont toutefois tendance à diminuer mais la variabilité intraplacette est élevée. En 1995, on remarque que les teneurs sont particulièrement élevées.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Carnoet (P. 16)

Commune de Quimperlé (Finistère)

Latitude: 47°50'16" N

Longitude: 3°32'34" W

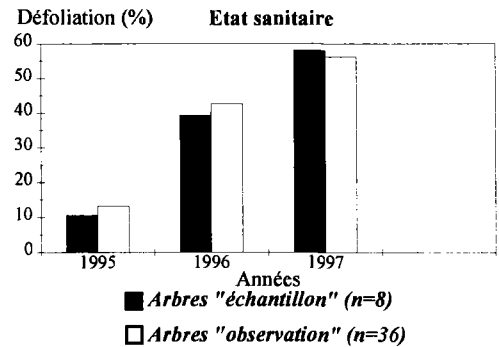
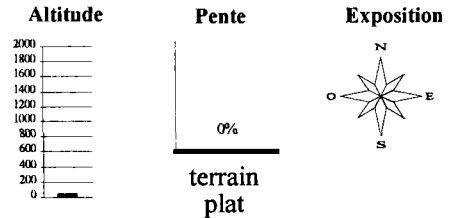
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 64 ± 4

Ho en 1995 (m) : 23,1 ± 1,8

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.03



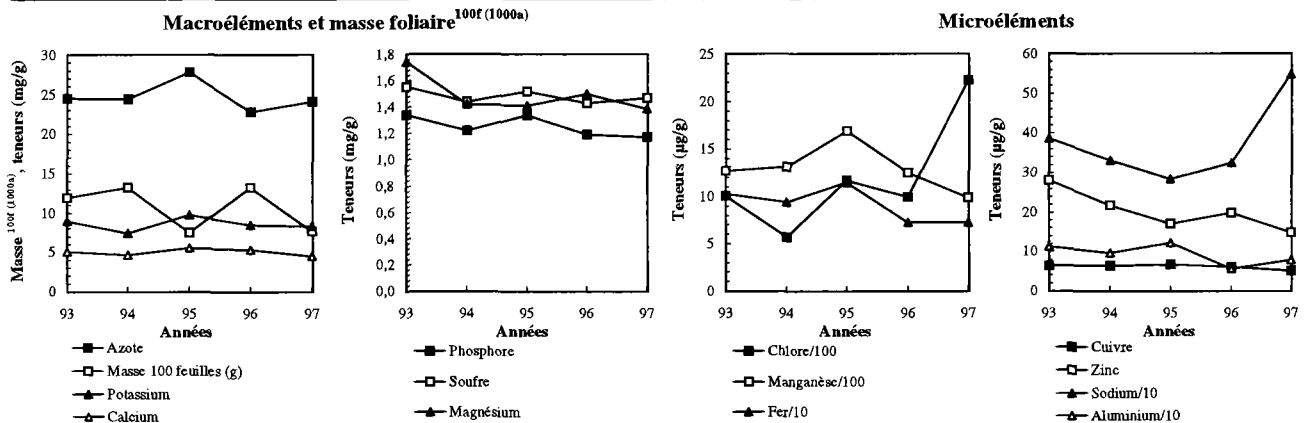
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé acide

Sol brun lessivé acide

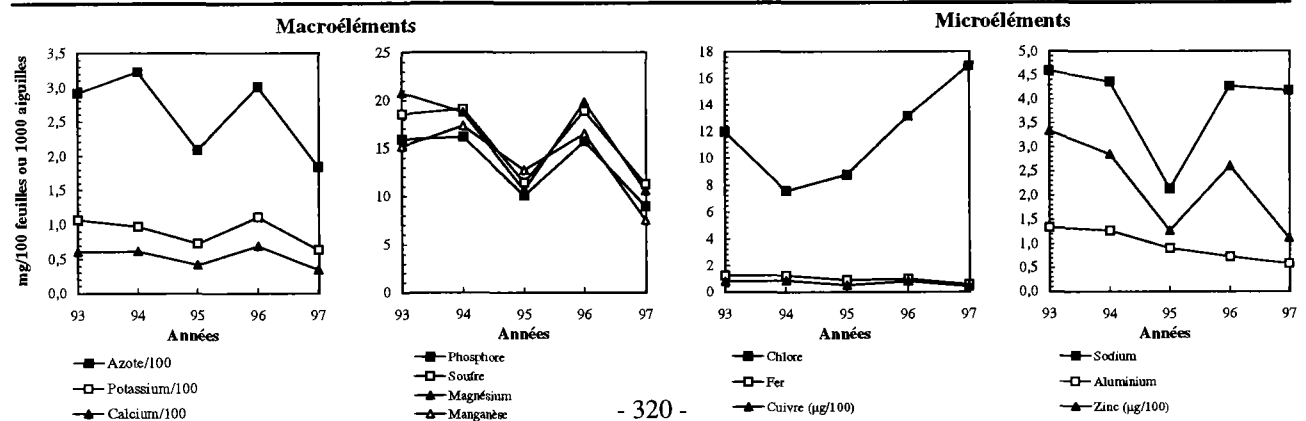
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



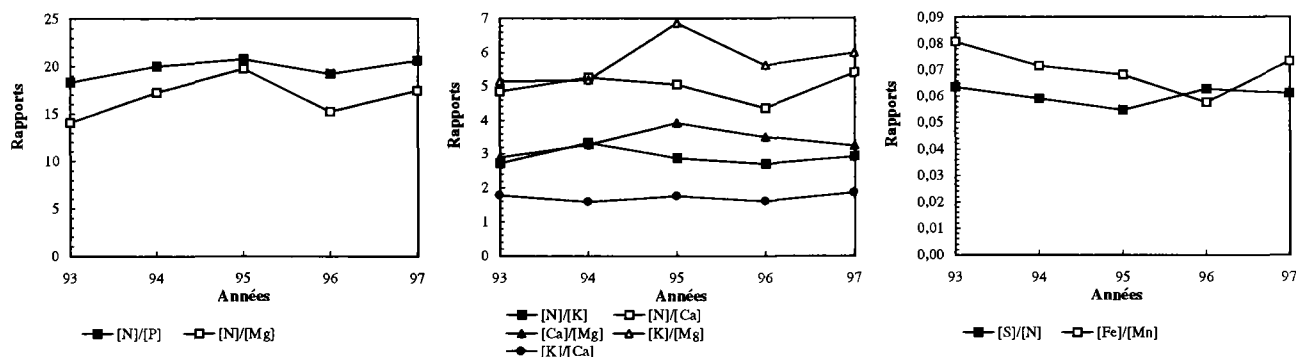
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	8	8	21	22	24	18	23	17	19	42	24	19
Interannuel 93-97 (n=5)	7	6	3	9	8	9	19	17	10	22	25	46	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P, Ca, Mg, K			S, Ca	K	N
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			P, Mg		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en calcium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs dans les couches minérales du sol sont moyennes à faibles. L'accroissement en surface terrière est le plus fort de tous les peuplements de hêtre (1,03 m²/ha/an), peut-être en réaction à l'éclaircie de 1992.

Les pourcentages de défoliation augmentent entre 1995 (10 %) et 1997 (55 %). Une partie de cette augmentation est peut-être due à des notations plus sévères après 1995. Une diminution des teneurs foliaires en zinc est observée.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de l'Aigoual (P. 122)

Commune de Valleraugue (Gard)

Latitude: 44°06'55" N

Longitude: 3°32'36" E

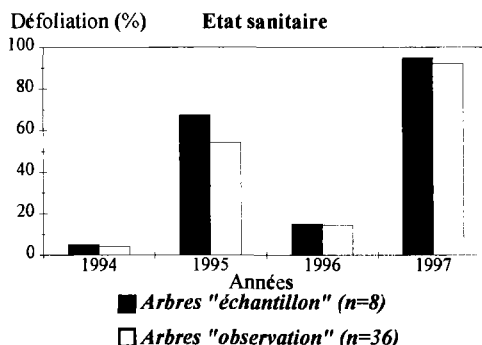
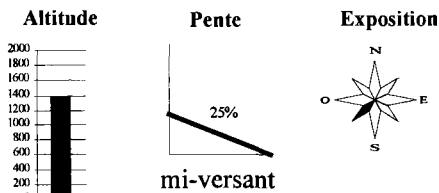
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Rejet sur souche

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 143 ± 11

Ho en 1995 (m) : 19,4 ± 1,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.62

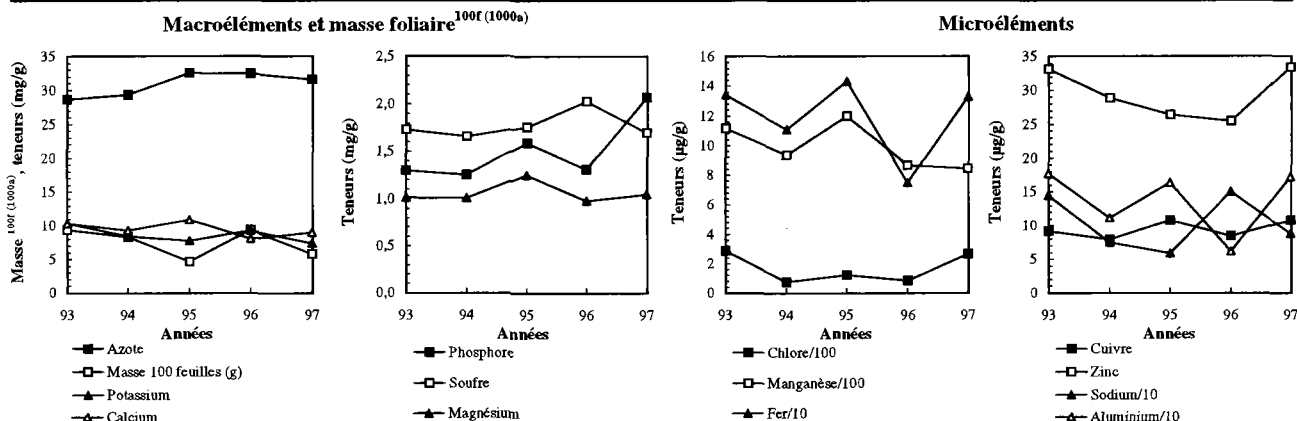


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Dysmoder - Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

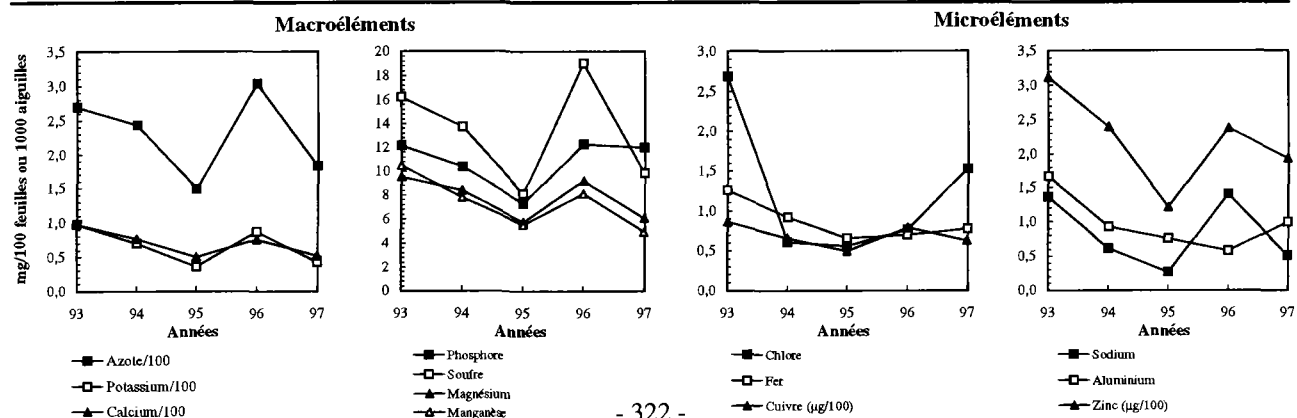
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



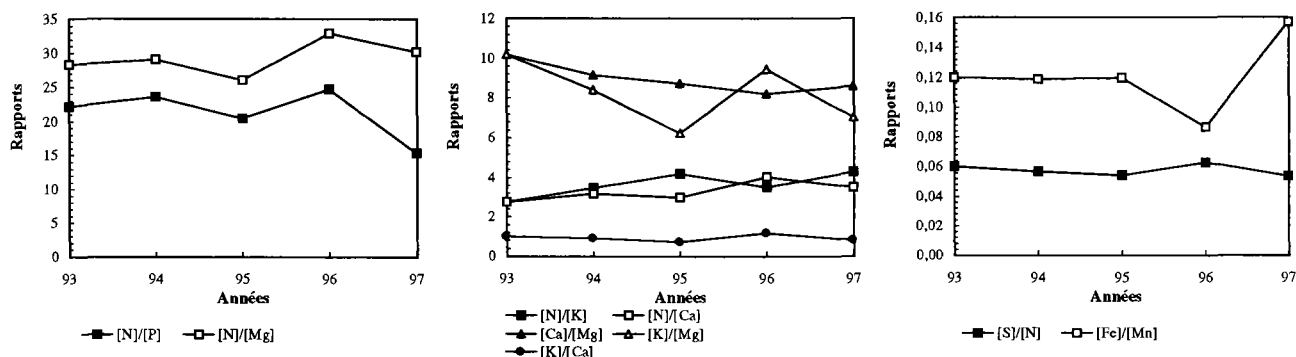
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	12	12	11	19	11	6	29	15	20	48	18	8
Interannuel 93-97 (n=5)	5	21	7	12	11	9	21	14	13	11	36	55	33

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Mg, K			K, N		
				P, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en phosphore, en potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et des teneurs élevées en azote. Les teneurs pour ces éléments sont moyennes dans les couches minérales du sol. Le rapport N/Mg est élevé (faible teneur foliaires en magnésium et teneurs élevées en azote). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,62 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %) en 1994 et 1996, ils sont élevés en 1995 (70 %) et surtout en 1997 (> 90 %) à la suite du gels tardifs au printemps. Aucune tendance claire n'est observée pour les teneurs foliaires. Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1996.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Auberive (P. 949)

Commune de Auberive (Haute Marne)

Latitude: 47°47'46" N

Longitude: 5°04'17" E

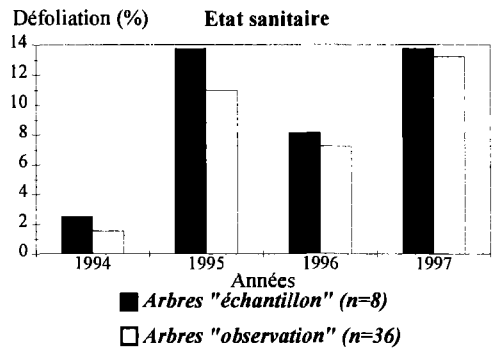
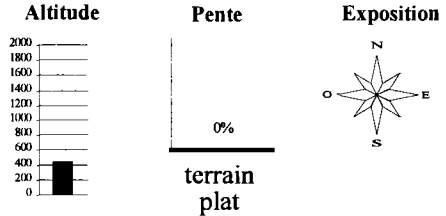
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 106 ± 4

Ho en 1995 (m) : 30,2 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.54

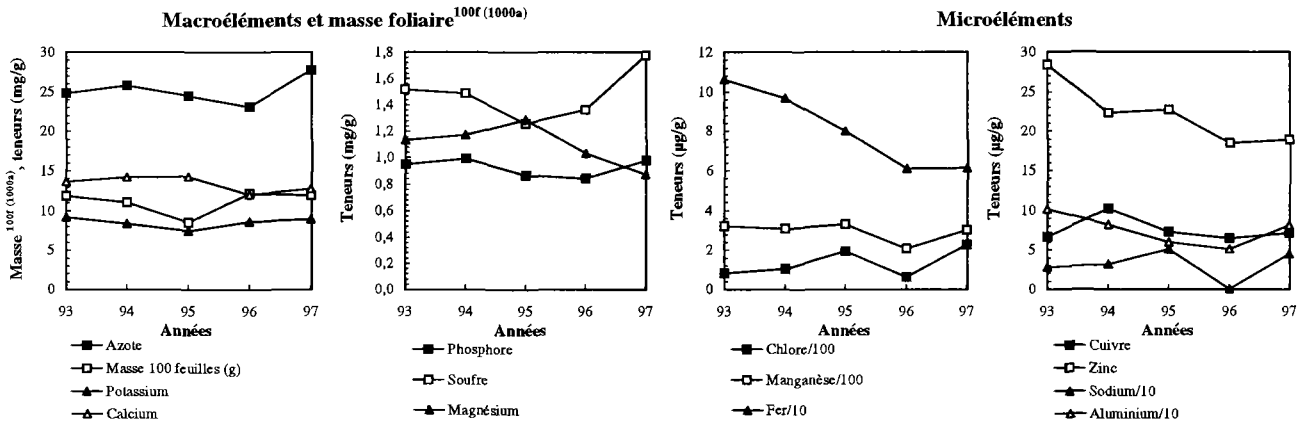


Végétation : *Cephalanthero-Fagion*

Humus : Eumull - Mésomull

Type de sol : Rendzine brunifiée

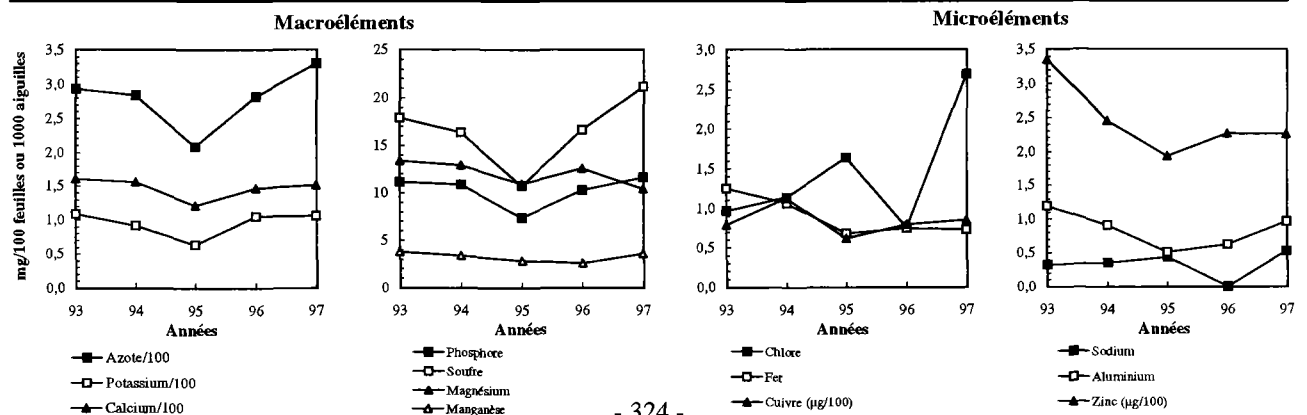
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



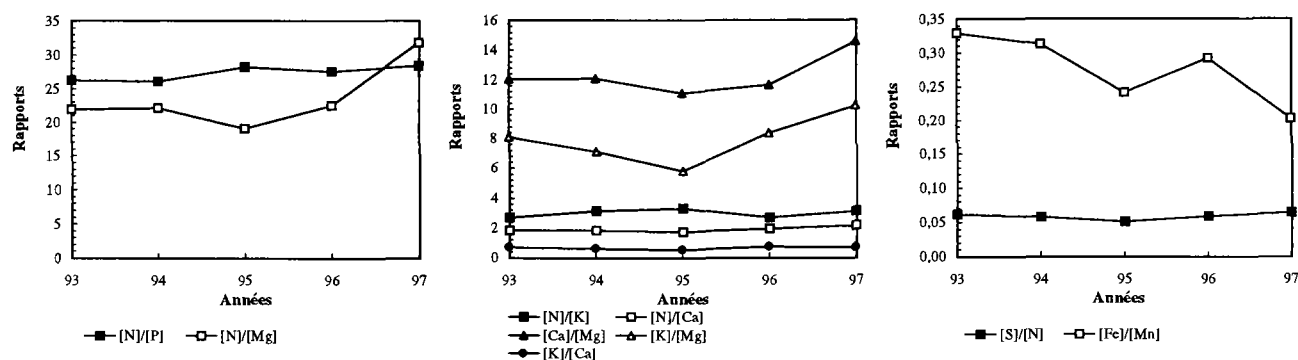
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	4	12	5	7	10	21	10	30	45	14	68	27	154	
Interannuel 93-97 (n=5)	6	6	12	7	7	13	23	15	18	16	57	49	24	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}											
Classes	I	II	III												
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé												
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal									
Macroéléments :	<table border="1"> <tr> <td>P</td> <td>S, Mg, K</td> <td>N, Ca</td> </tr> </table>			P	S, Mg, K	N, Ca	<table border="1"> <tr> <td>S</td> <td>K</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>P, Mg</td> <td></td> <td>Ca</td> </tr> </table>			S	K	N	P, Mg		Ca
P	S, Mg, K	N, Ca													
S	K	N													
P, Mg		Ca													
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn														

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote et en calcium. Les teneurs en potassium et magnésium dans les couches minérales du sol sont moyennes et les teneurs en phosphore sont faibles (entre 0 et 3 cmolc/Kg) alors que les teneurs en calcium sont fortes (environ 30 cmolc/Kg). Le rapport N/P est élevé (N abondant) et les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles (Ca en excès). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,52 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation restent faibles sur la période considérée (< 15 %). Une diminution des teneurs foliaires en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est du même ordre de grandeur que la variabilité interannuelle.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale des Hauts Bois (P. 7)

Commune de Azerailles (Meurthe et Moselle)

Latitude: 48°30'35" N

Longitude: 6°42'23" E

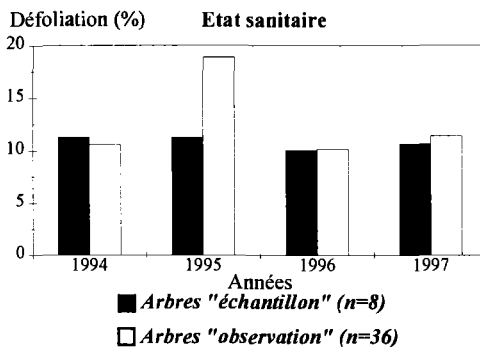
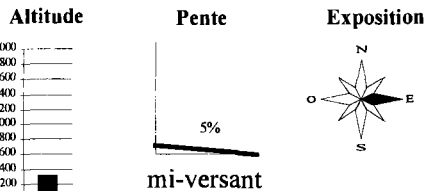
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 95 ± 12

Ho en 1995 (m) : 29,0 ± 1,8

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.01



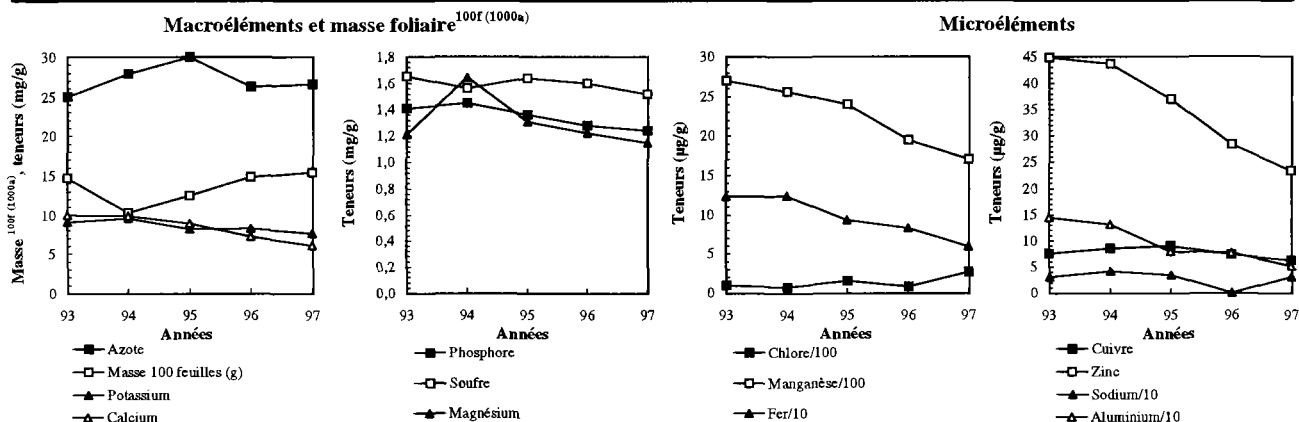
Végétation : *Lonicera periclymeni-Carpinienion betuli*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol brun acide à pseudogley

Sol brun lessivé à pseudogley

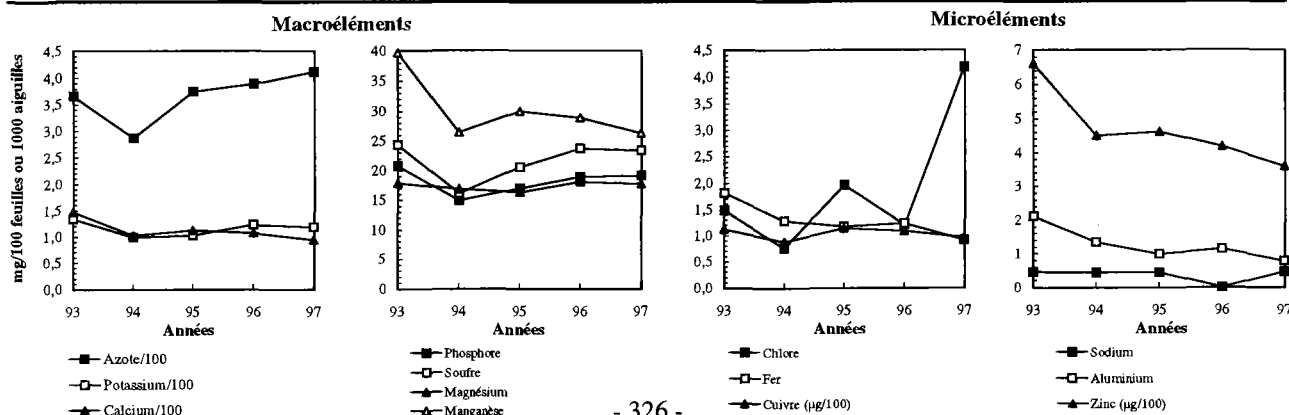
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



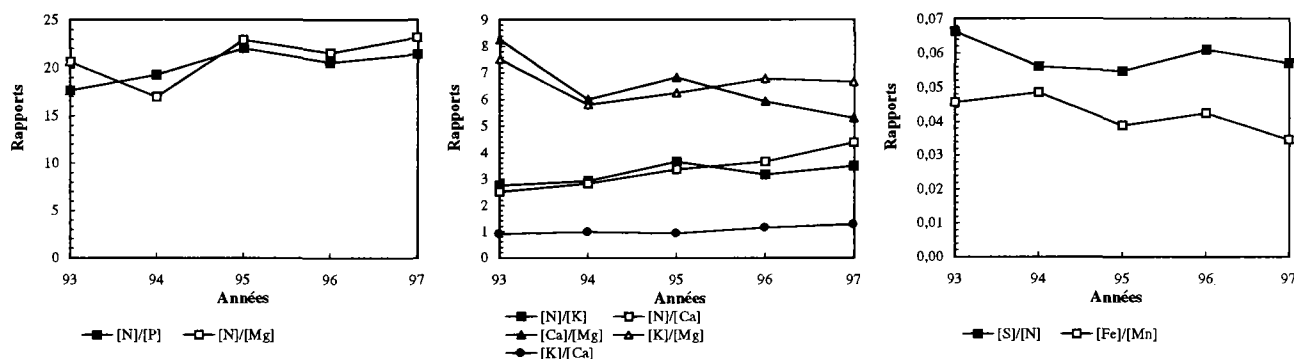
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	8	10	12	14	33	11	15	13	27	69	28	16
Interannuel 93-97 (n=5)	6	6	3	8	18	13	26	17	12	24	52	54	37

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Mg, K			K, N		
				P, Mg, S, Ca		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en phosphore, en potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et des teneurs élevées en azote. Les teneurs en phosphore, potassium et magnésium sont moyennes à faibles dans les couches minérales du sol. L'accroissement en surface terrière est élevé (1,01 m²/ha/an) mais le calcul d'accroissement en surface terrière est incertain car le nombre de tiges a diminué entre le premier inventaire et l'inventaire réalisé avant l'éclaircie de 1995. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Une diminution des teneurs foliaires en manganèse, en fer et en zinc est visible entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Haye (P. 423)

Commune de Maron (Meurthe et Moselle)

Latitude: 48°38'57" N

Longitude: 6°04'04" E

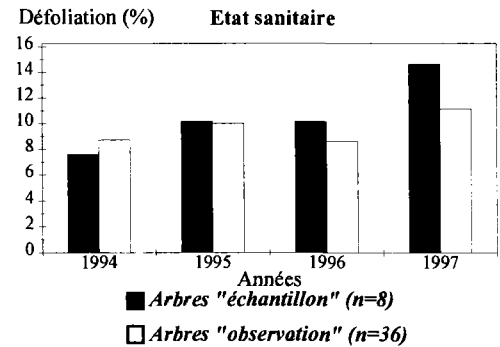
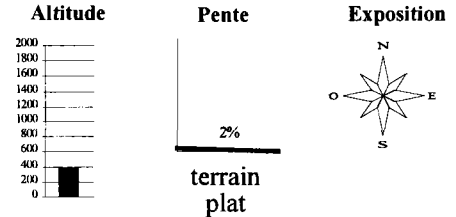
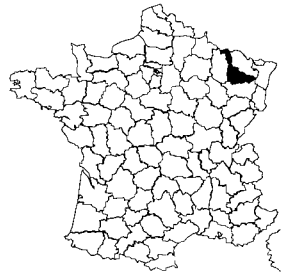
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 99 ± 15

Ho en 1995 (m) : 28,3 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.59

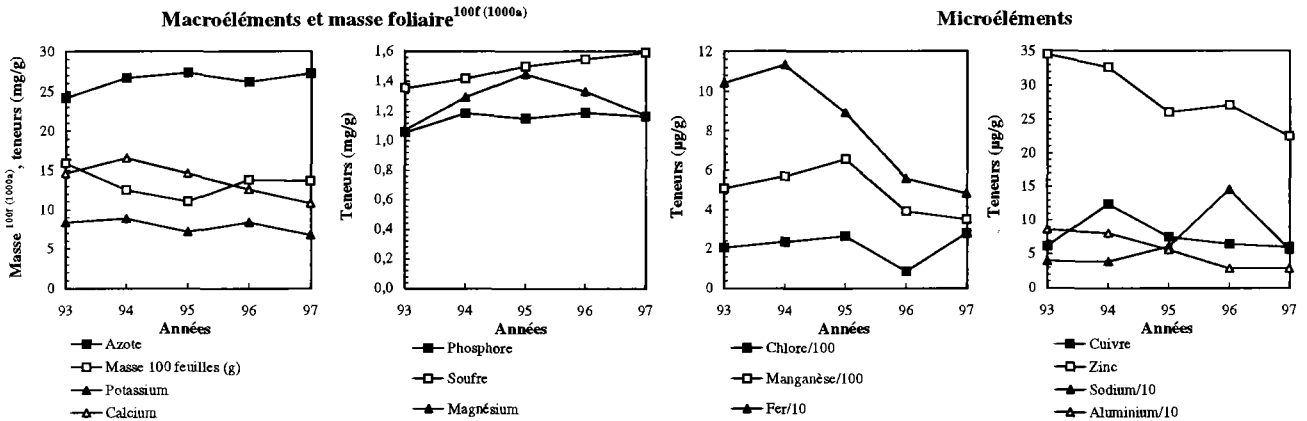


Végétation : *Daphno laureolae-Carpinionen betuli*

Humus : Mésomull

Type de sol : Rendzine brunifiée

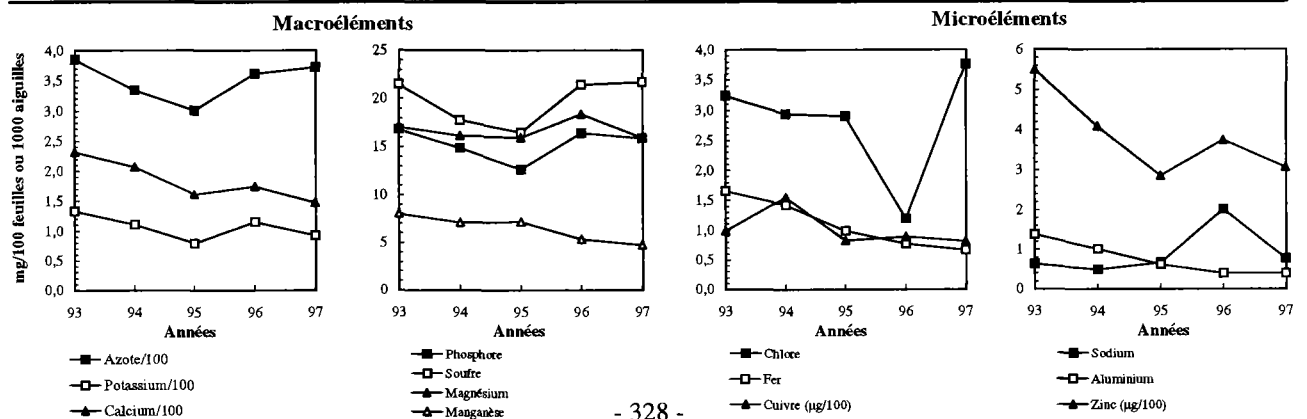
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



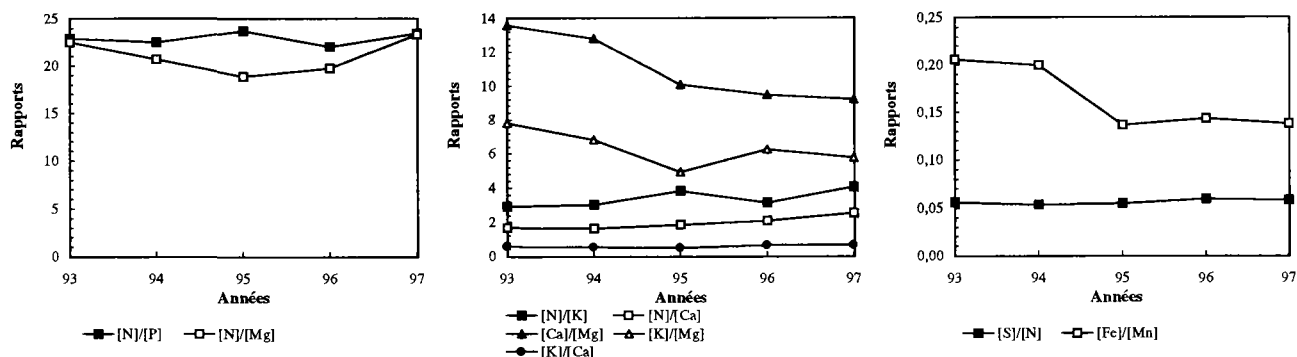
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	6	7	15	20	29	10	31	11	29	76	26	20	
Interannuel 93-97 (n=5)	4	4	6	10	14	10	32	23	31	16	59	32	44	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Mg, K			S	K	N
				P, Mg		Ca
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote et en calcium. Les teneurs en potassium, magnésium et phosphore dans les couches minérales du sol sont moyennes alors que les teneurs en calcium sont fortes (35 à 38 cmolc/Kg). Les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles (Ca en excès). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,59 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation restent faibles sur la période considérée (< 15 %). Une diminution des teneurs foliaires en zinc est observée mais la variabilité intraplacette est importante.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lachalade (P. 9)

Commune de Lachalade (Meuse)

Latitude: 49°10'15" N

Longitude: 5°00'17" E

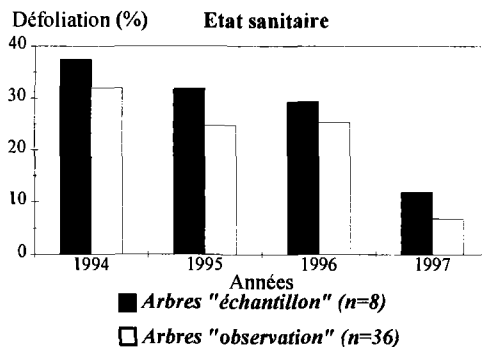
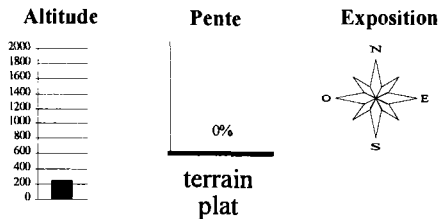
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 89 ± 8

Ho en 1995 (m) : 29,3 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.55

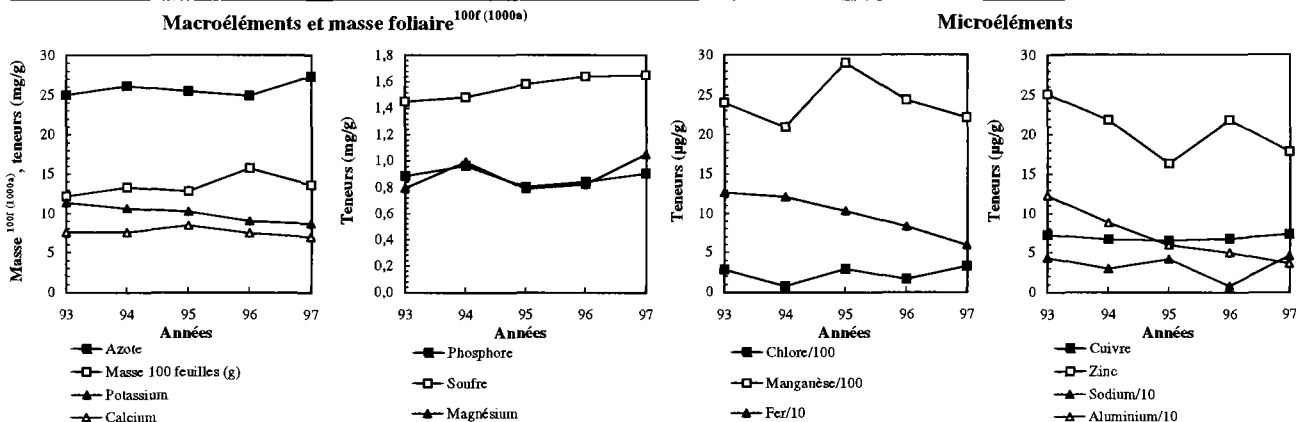


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinenion betuli*

Humus : Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

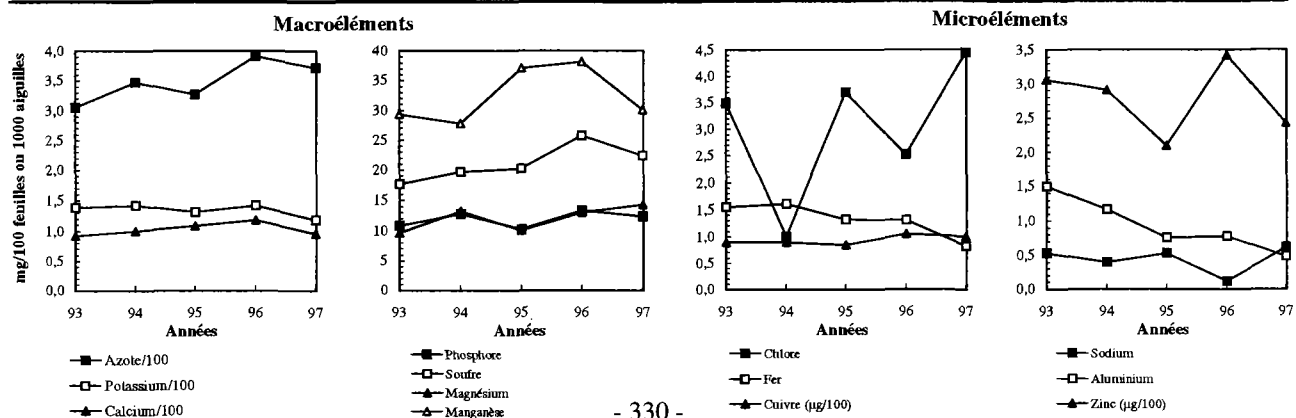
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



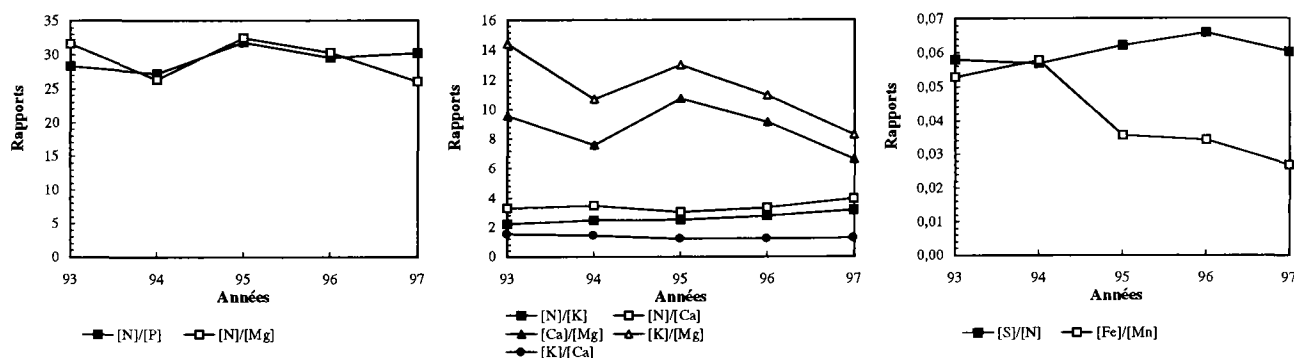
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	10	6	19	17	32	10	26	18	17	40	23	13
Interannuel 93-97 (n=5)	4	6	5	10	6	13	25	11	5	15	42	42	44

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	P, Mg		S, Ca, K			N, K
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires un peu faibles en phosphore, en magnésium (proche du seuil indicatif critique), et par des teneurs élevées en azote et en potassium. Les teneurs en magnésium dans les couches minérales du sol sont très faibles (0,04 à 0,07 cmolc/Kg) comme les teneurs en potassium (environ 0,08 cmolc/Kg) et les teneurs en phosphore sont faibles dans les couches 10-40 cm (entre 0,0 et 1,7 cmolc/Kg). Les rapports N/Mg et N/P sont élevés (faibles teneurs foliaires en Mg, en P et élevées en N). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,55 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation diminuent entre 1994 et 1997 (de 30-40 % à moins de 15 %). Une diminution des teneurs foliaires en fer et en zinc est observée.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Compiègne (P. 832)

Commune de Orrouy (Oise)

Latitude: 49°19'27" N

Longitude: 2°52'34" E

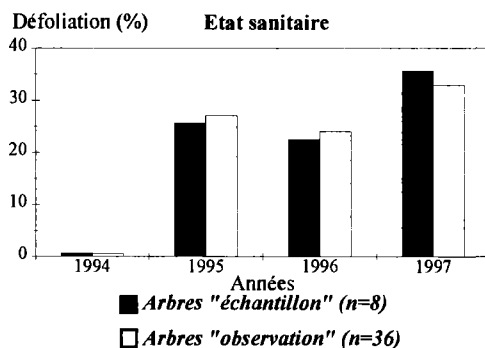
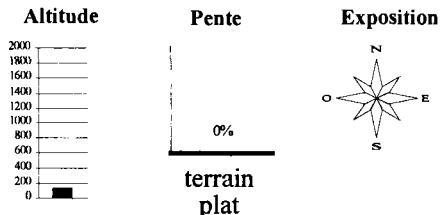
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 62 ± 3

Ho en 1995 (m) : 26,6 ± 1,2

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.94



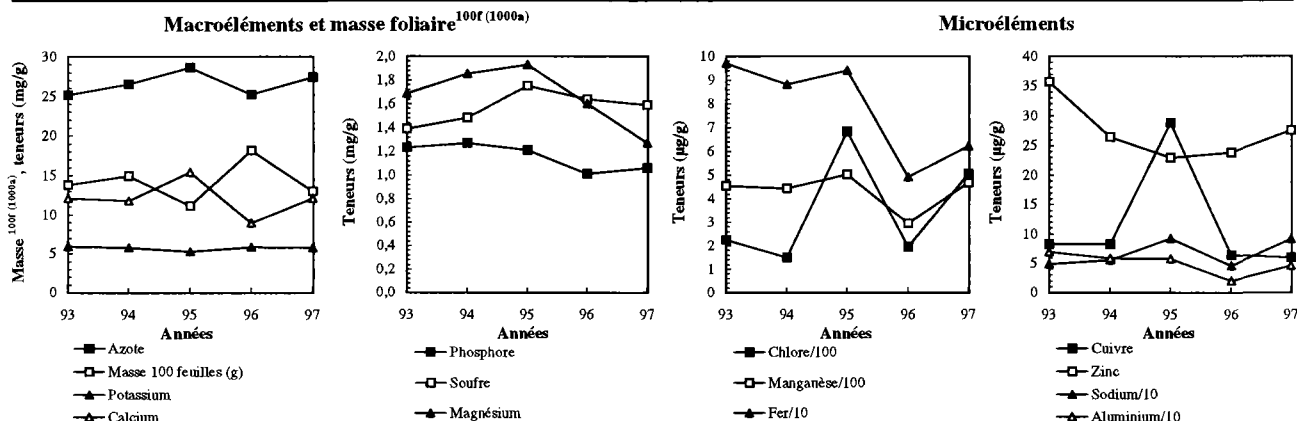
Végétation : Galio odorati-Fagenion

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun calcique hydromorphe

Sol brun calcique

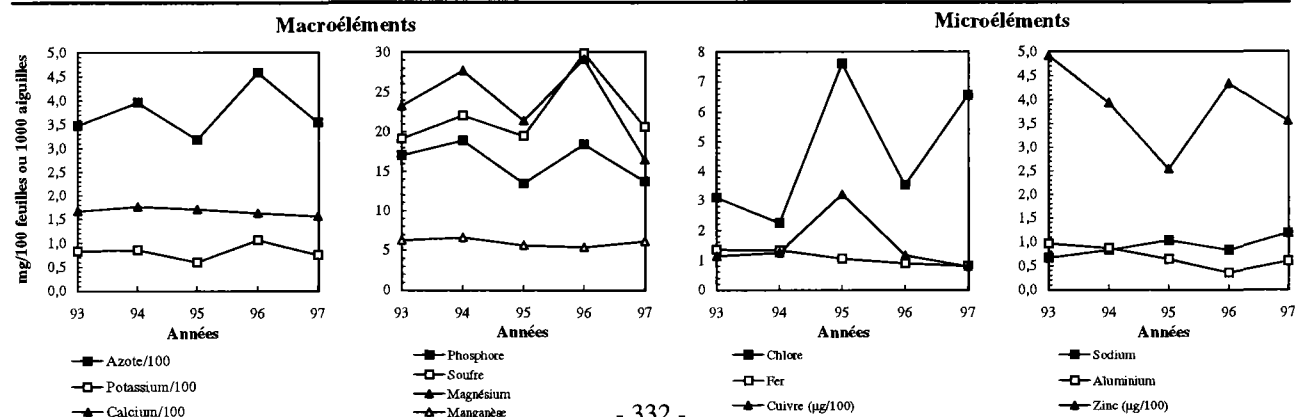
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



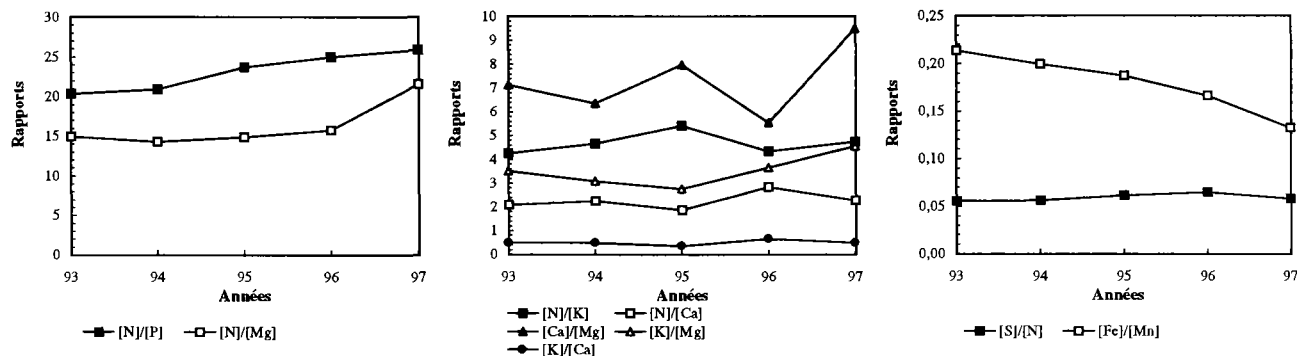
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	10	9	16	10	17	12	97	11	20	37	19	18
Interannuel 93-97 (n=5)	5	9	8	4	17	14	24	17	76	17	31	59	34

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, K		N, Ca, Mg	K, P, S, Ca, N, Mg		
Microéléments :	Fe, Mn, Zn			Cu		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en potassium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en phosphore (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote et en magnésium. Les teneurs en potassium dans les couches minérales du sol sont très faibles (0,06 à 0,09 cmolc/Kg), les teneurs en phosphore (Dyer) sont très faibles dans les couches 10-40 cm (Le phosphore Joret-Hebert conduit à des valeurs plus élevées: 1,3 à 3,5 cmolc/Kg). Les teneurs en magnésium sont élevées dans ces couches minérales (0,2 à 0,5 cmolc/Kg). Les rapports N/Ca et K/Ca sont faibles (Ca en excès). L'accroissement en surface terrière est élevé (0,94 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation étaient pratiquement nuls en 1994, ils ont ensuite augmenté jusqu'en 1997 (35 % en 97), mais cette augmentation pourrait être due en partie à des notations plus sévères à partir de 1995. Aucune tendance n'est observée pour les teneurs foliaires en nutriments.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 3

Forêt Communale d'Ance (P. 11)

Commune de Ance (Pyrénées Atlantiques)

Latitude: 43°09'01" N

Longitude: 0°39'29" W

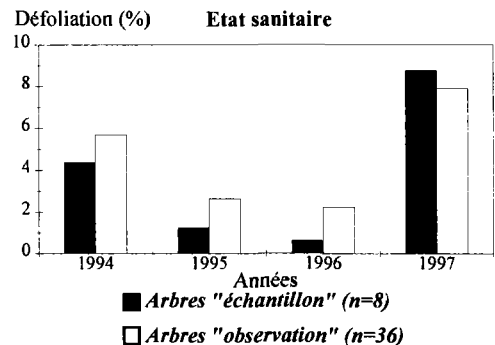
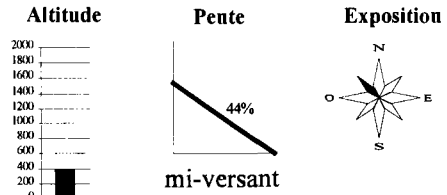
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 67 ± 7

Ho en 1995 (m) : 28,4 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.35

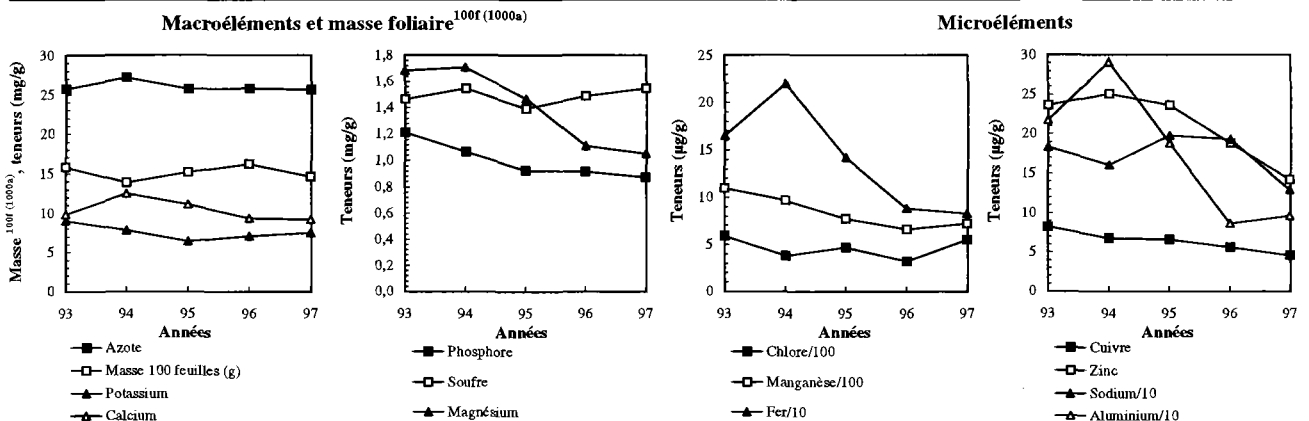


Végétation : *Fagion sylvaticae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun mésotrophe à eutrophe

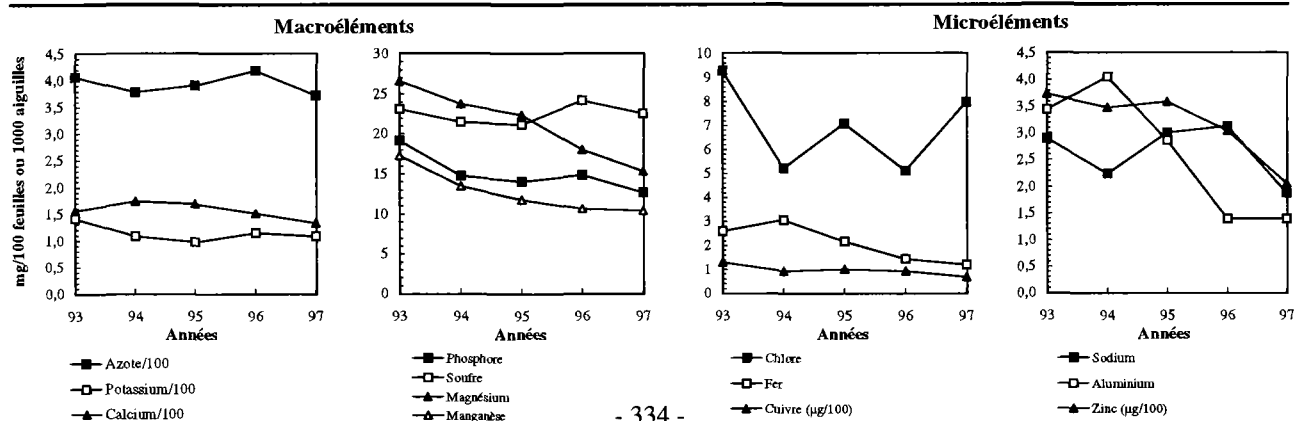
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



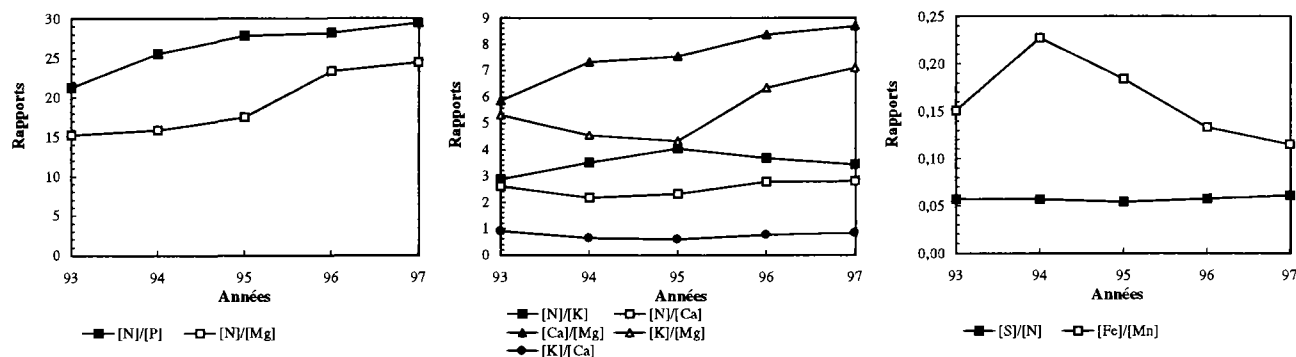
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	9	9	20	21	28	15	23	15	35	42	17	33	
Interannuel 93-97 (n=5)	2	13	4	11	12	20	37	19	19	19	15	22	44	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}											
Classes	I	II	III												
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé												
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal									
Macroéléments :	<table border="1"> <tr> <td>P</td> <td>S, Mg, K</td> <td>N, Ca</td> </tr> </table>			P	S, Mg, K	N, Ca	<table border="1"> <tr> <td>S</td> <td>K</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td colspan="2">P, Mg</td> <td>Ca</td> </tr> </table>			S	K	N	P, Mg		Ca
P	S, Mg, K	N, Ca													
S	K	N													
P, Mg		Ca													
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn														

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en phosphore, potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium et en phosphore (Dyer) dans les couches minérales du sol sont moyennes (0,09-0,19 et 4-6 cmolc/Kg) tandis que les teneurs en magnésium sont élevées (0,7 à 0,9 cmolc/Kg). Le rapport N/P est élevé (P faible et N élevé). L'accroissement en surface terrière est assez faible (0,35 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %). Une diminution des teneurs foliaires en fer et en aluminium est notée.

Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1994 et plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1993, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Bize (P. 13)

Commune de Bize (Hautes Pyrénées)

Latitude: 43°01'36" N

Longitude: 0°26'12" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Rejet sur Souche

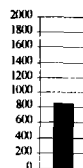
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 160 ± 4

Ho en 1995 (m) : 29,5 ± 1,9

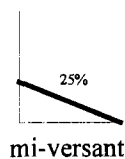
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.02



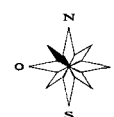
Altitude



Pente

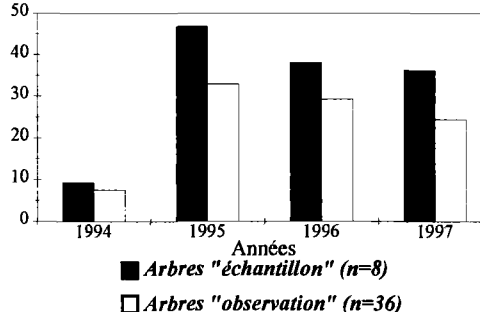


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

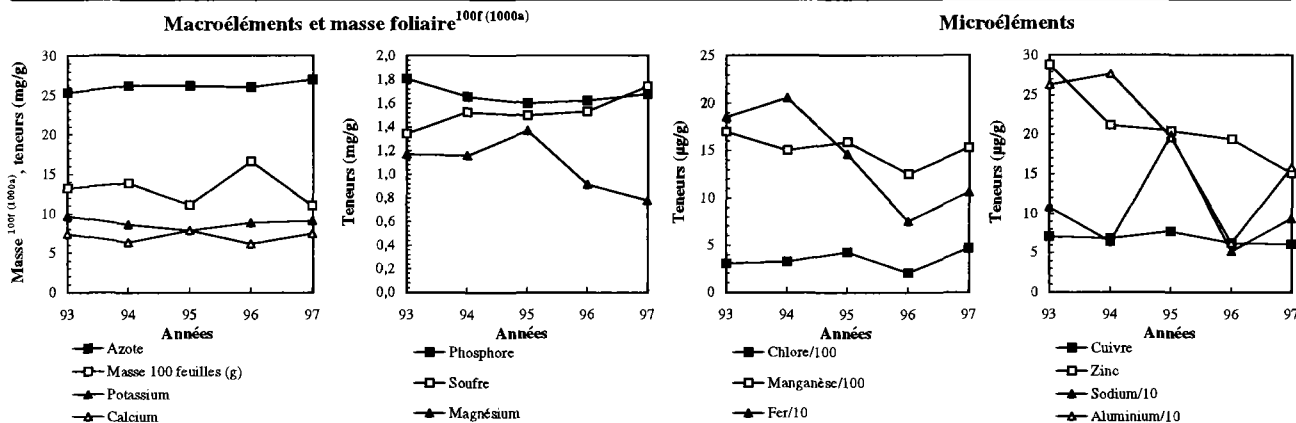


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Moder - Dysmoder

Type de sol : Sol brun acide

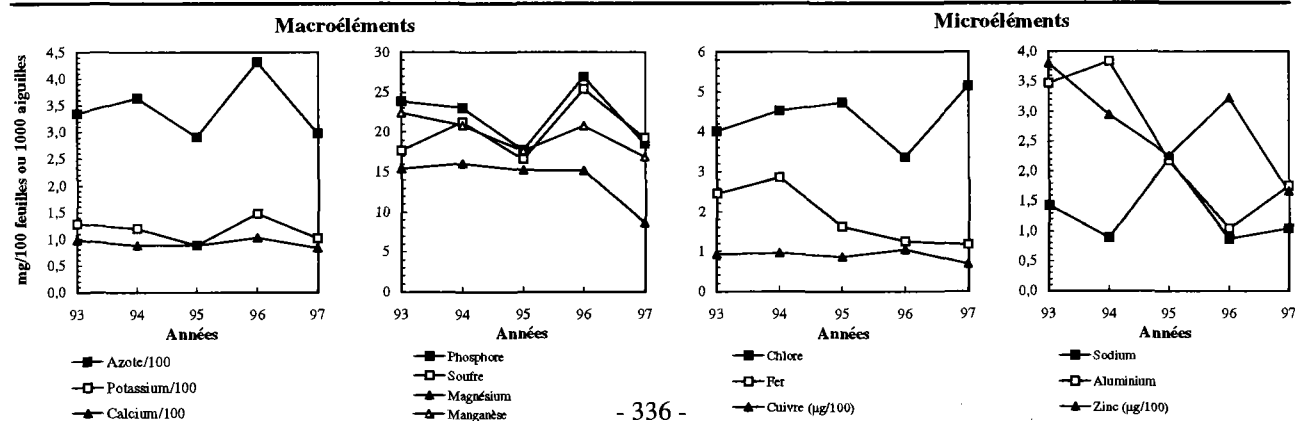
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



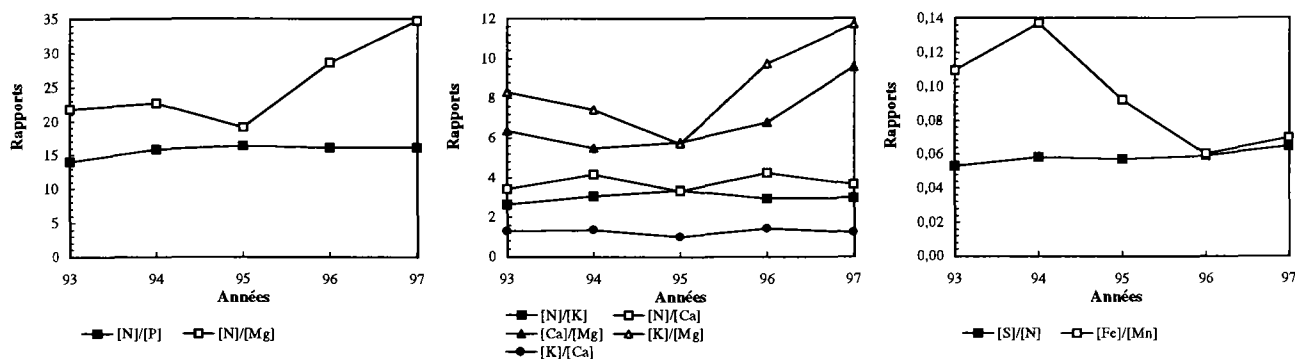
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intracette en 1997 (n=8)	6	19	10	18	32	41	13	26	22	13	74	25	15	
Interannuel 93-97 (n=5)	2	4	8	7	10	19	34	10	8	21	50	27	41	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Ca, Mg, K			P, Mg, K, N		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en phosphore, en potassium, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium et magnésium sont moyennes à faibles dans les couches minérales du sol tandis que les teneurs en phosphore (Dyer) sont fortes (14 à 42 cmolc/Kg). Le rapport N/Mg est élevé (faibles teneurs en magnésium). L'accroissement en surface terrière est faible (0,35 m²/ha/an) mais cette placette a été éclaircie en 1994 et c'est le peuplement de hêtre le plus âgé du réseau (environ 160 ans à 1,30 m en 1994).

Les pourcentages de défoliation faibles en 1994 (< 10 %) sont élevés ensuite (entre 30 et 50 %). Une diminution des teneurs foliaires en fer et en zinc est visible entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Eawy (P. 359)

Commune de Les Ventes St Rémy (Seine Maritime)

Latitude: 49°42'39" N

Longitude: 1°19'34" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle et complément plantation

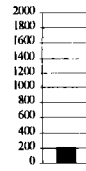
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 87 ± 6

Ho en 1995 (m) : 29,7 ± 1,4

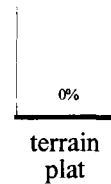
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.66



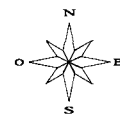
Altitude



Pente

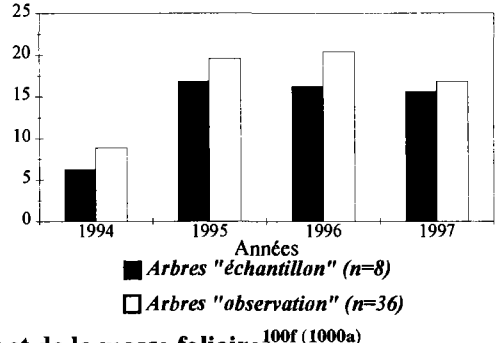


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

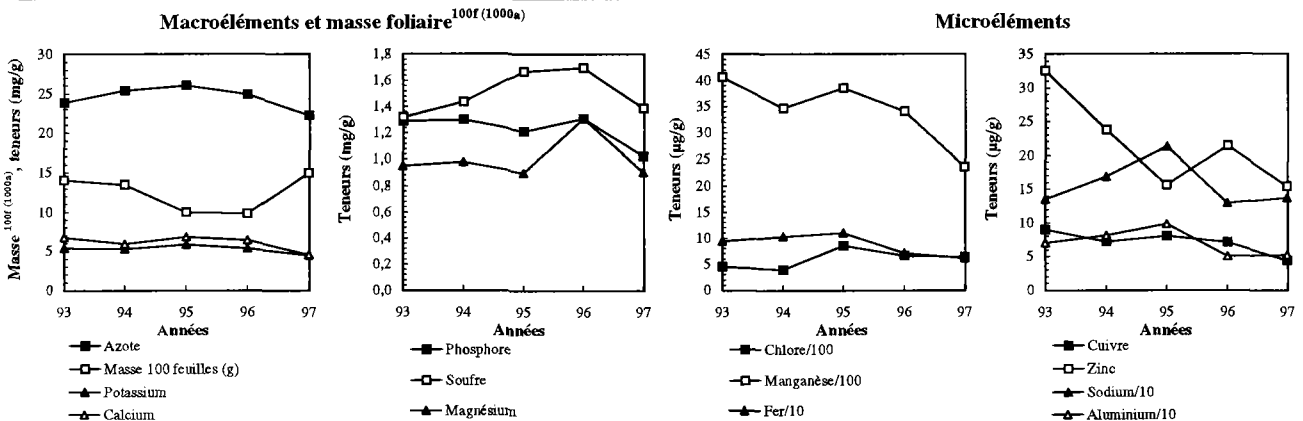


Végétation : *Lonicero periclymeni-Carpinionion betuli*

Humus : Moder

Type de sol : Sol brun lessivé hydromorphe

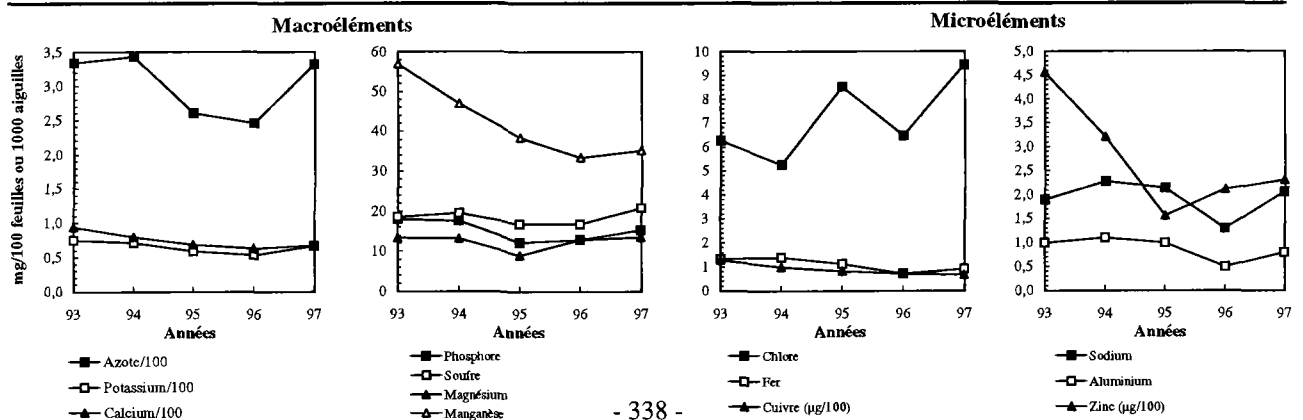
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



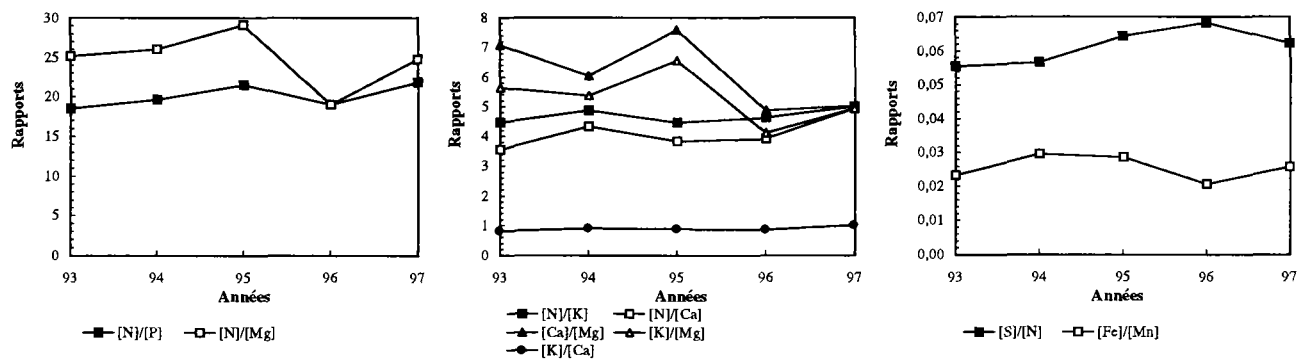
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	12	13	15	17	8	15	27	17	20	23	10	25
Interannuel 93-97 (n=5)	5	9	10	9	14	15	22	17	22	29	20	28	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P, Ca, Mg, K			K	P, Mg	S, Ca, N
Microéléments :	Fe, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en potassium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote. Les teneurs en potassium et en magnésium dans les couches minérales du sol sont faibles (0,04-0,11 et 0,03-0,12 cmolc/Kg) tandis que les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes (4 à 8 cmolc/Kg). La teneur en azote dans les couches minérales de sol est très faible (0,5 à 1,7 g/Kg). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,65 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation restent faibles (< 25 %). Une diminution des teneurs foliaires en manganèse et en zinc est notée mais la variabilité intraplacette est élevée.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de la Montagne Noire (P. 198)

Commune de Arfons (Tarn)

Latitude: 43°24'38" N

Longitude: 2°10'40" E

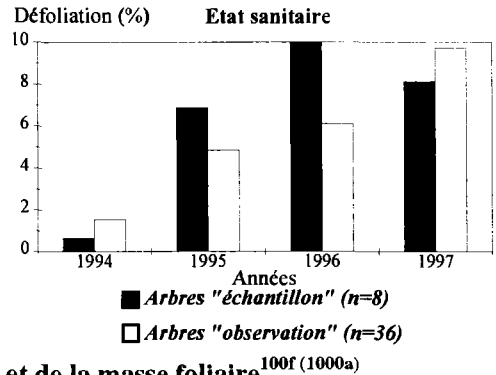
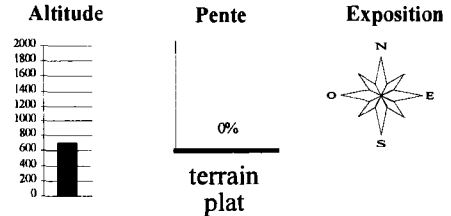
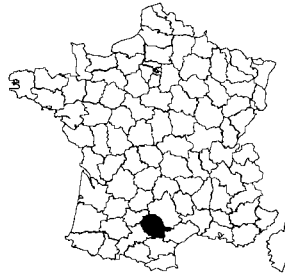
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 108 ± 8

Ho en 1995 (m) : 30,1 ± 1,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.53



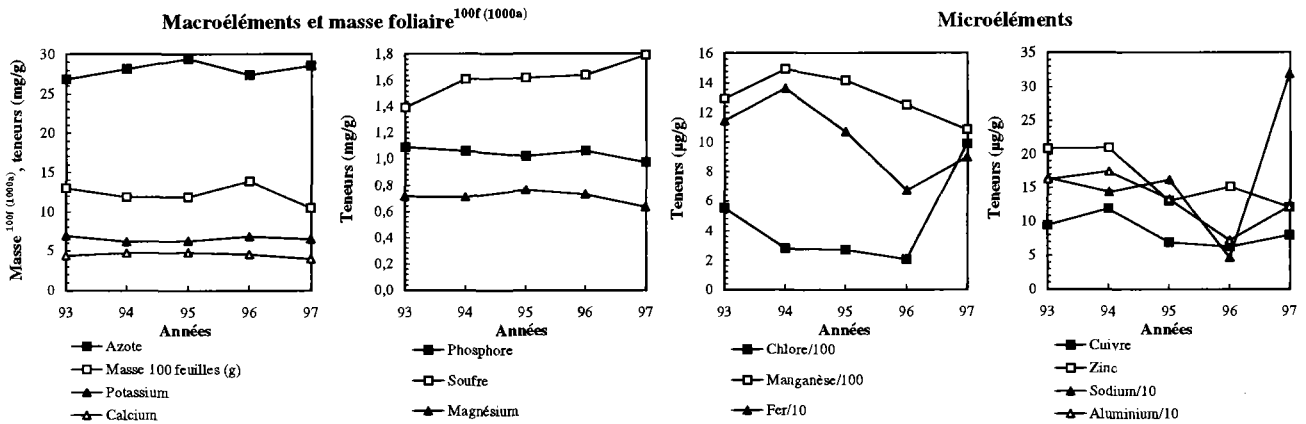
Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Hémimoder

Type de sol : Sol ocre podzolique sur sol lessivé

Sol ocre podzolique

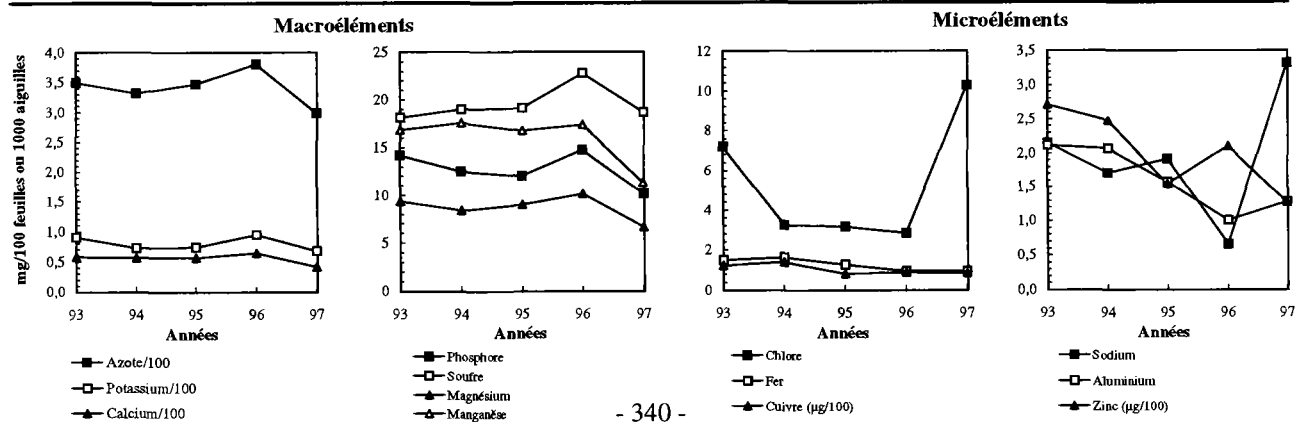
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



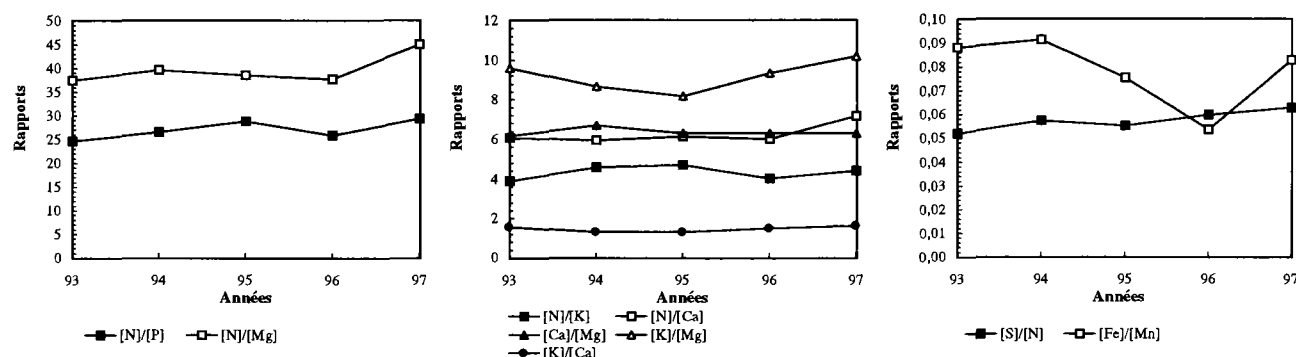
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	15	13	15	30	39	15	33	50	8	30	36	23	
Interannuel 93-97 (n=5)	3	4	8	4	6	6	23	11	24	23	52	64	27	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	Mg	S, P, Ca, K	N	Mg	K, Ca	N
Microéléments :	Zn	Fe, Mn, Cu			P	S

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en magnésium foliaire est mise en évidence pour cette placette. Les teneurs foliaires sont faibles pour le potassium, le calcium (entre le seuil indicatif de carence et critique), le phosphore (proche du seuil indicatif critique), et élevées pour l'azote. Les teneurs en magnésium et en potassium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles (0,06-022 et 0,06-020 cmolc/Kg). Les rapports N/P, N/Mg et N/Ca sont élevés (carence en magnésium et teneurs élevées en azote). Les hêtres de cette placette ont un accroissement en surface terrière moyen (0,53 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Aucune tendance claire se dégage du suivi des teneurs foliaires entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale du Ban d'Harol (P. 9)

Commune de Charmois-l'Orgueilleux (Vosges)

Latitude: 48°06'21" N

Longitude: 6°14'50" E

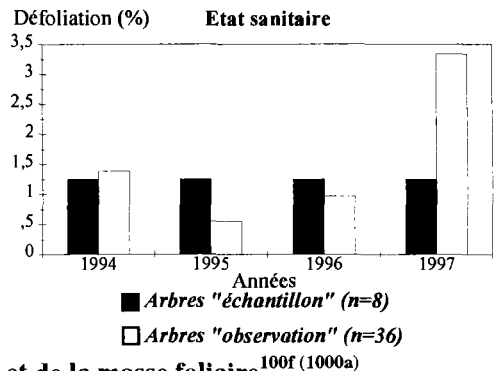
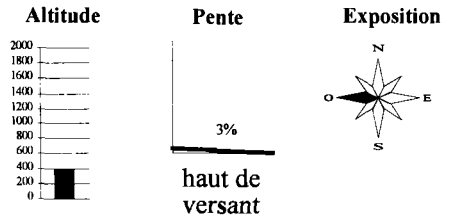
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 68 ± 7

Ho en 1995 (m) : 24,7 ± 2,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.66



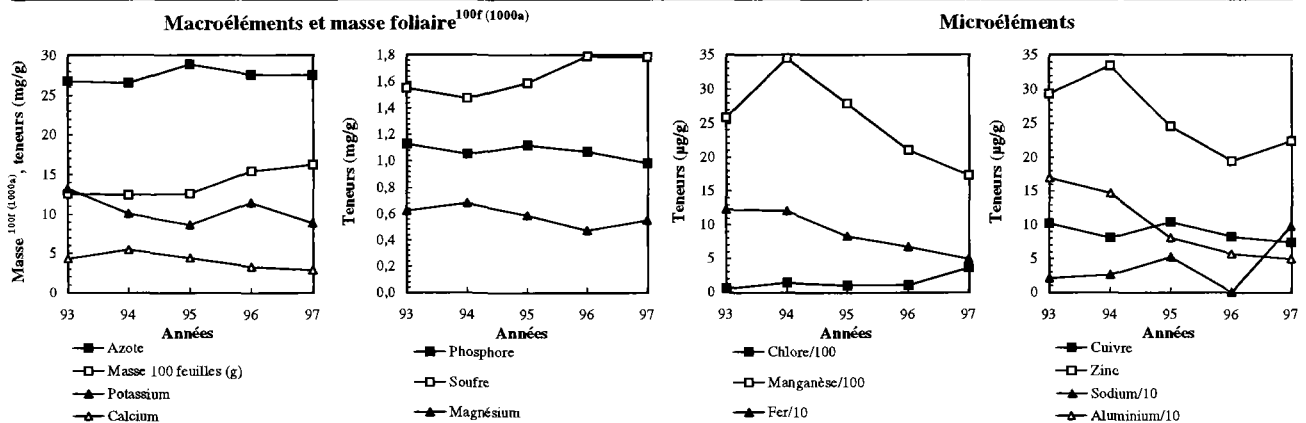
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé à pseudogley

Sol brun acide

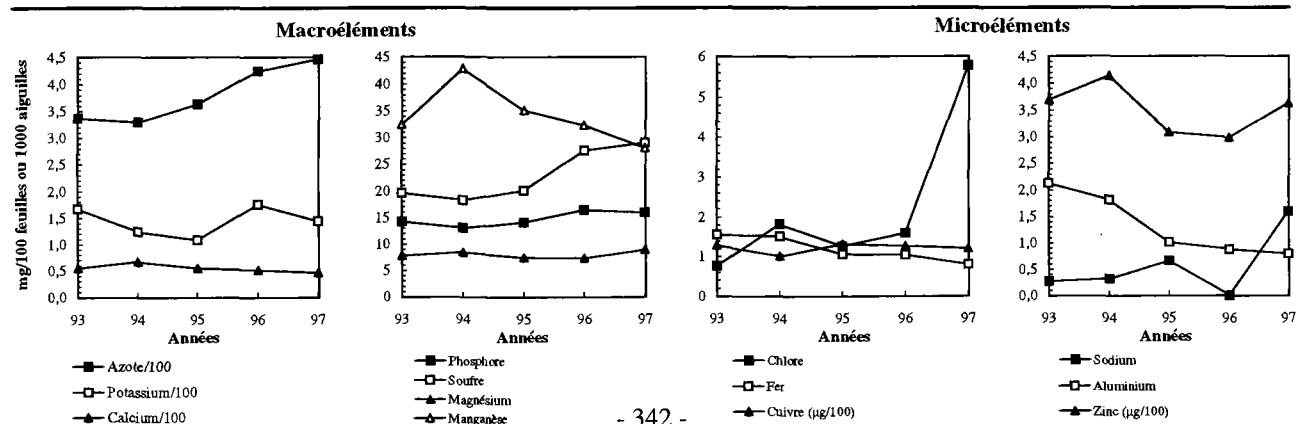
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



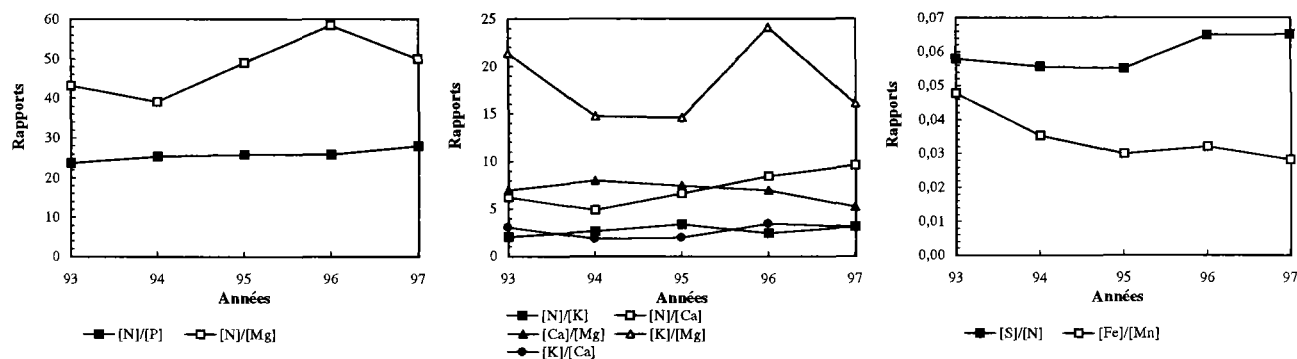
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	5	19	7	16	9	24	10	17	21	119	40	47	13
Interannuel 93-97 (n=5)	3	5	8	17	22	12	33	23	14	19	86	68	48

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	Mg	S, P, Ca	N, K	Mg	Ca P	N, K S
Microéléments :		Fe, Zn	Mn			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	15	0,8	1,3	5,0	3,0	0,8				
	Critique	20		1,5	7,0	5,0					
	Optimum	23	2,0		9,0		1,5				
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	18	1,0	1,3	5,0	4,0	1,0	60	60	5	20
	Borne supérieure (bs)	1,7	25	2,0	10,0	8,0	1,5	200	2500	10	50

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en magnésium foliaire est mise en évidence pour cette placette. Les teneurs foliaires sont faibles pour le calcium (entre le seuil indicatif de carence et critique), le phosphore (proche du seuil indicatif critique), et élevées pour l'azote et le potassium. Les teneurs en magnésium échangeable dans les couches minérales du sol sont très faibles (0,03-0,07 cmolc/Kg) les teneurs sont faibles en phosphore (0,0 à 4,9 mg/Kg) et en calcium (environ 0,35 cmolc/Kg). Les rapports N/P, N/Mg et N/Ca sont élevés (carence en magnésium et teneurs élevées d'azote). Les hêtres de cette placette ont un accroissement en surface terrière moyen (0,66 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont très faibles (< 5 %).

On observe une diminution des teneurs foliaires en fer et en aluminium entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Champcella (P. 28)

Commune de Champcella (Hautes Alpes)

Latitude: 44°42'18" N

Longitude: 6°33'42" E

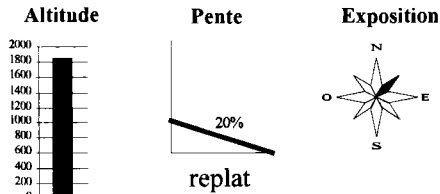
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 132 ± 3

Ho en 1995 (m) : 25,5 ± 2,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.38

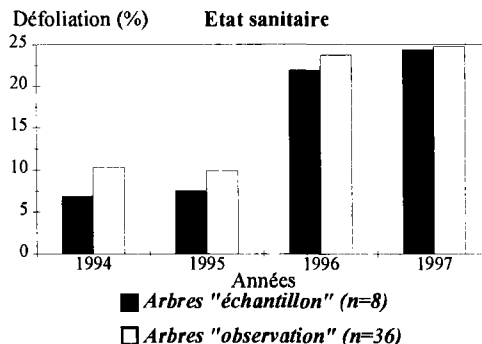


Végétation : *Rhododendro ferrugineae-Vaccinion*

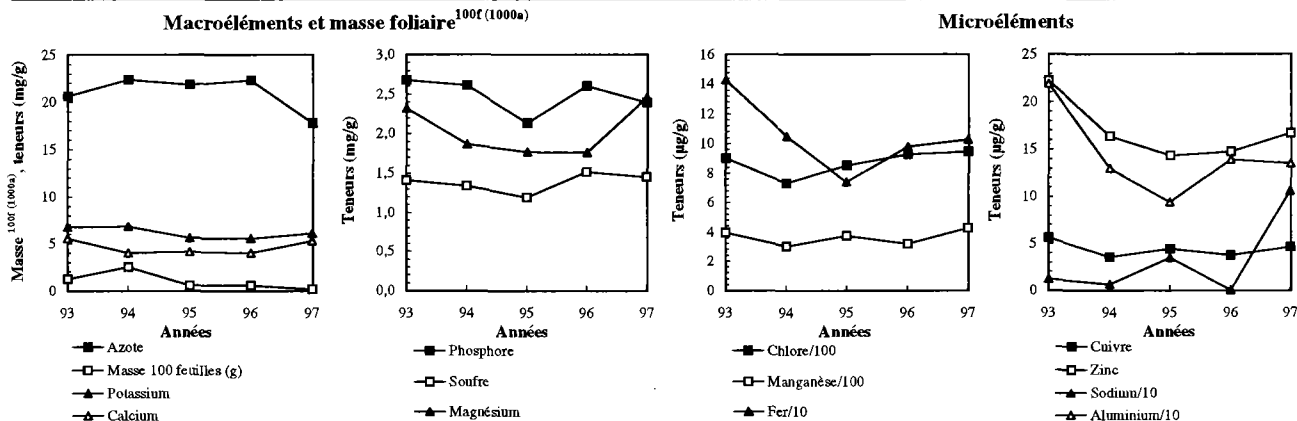
Humus : Dysmull - Oligomull

Type de sol : Sol brun superficiel

Rendzine brunifiée



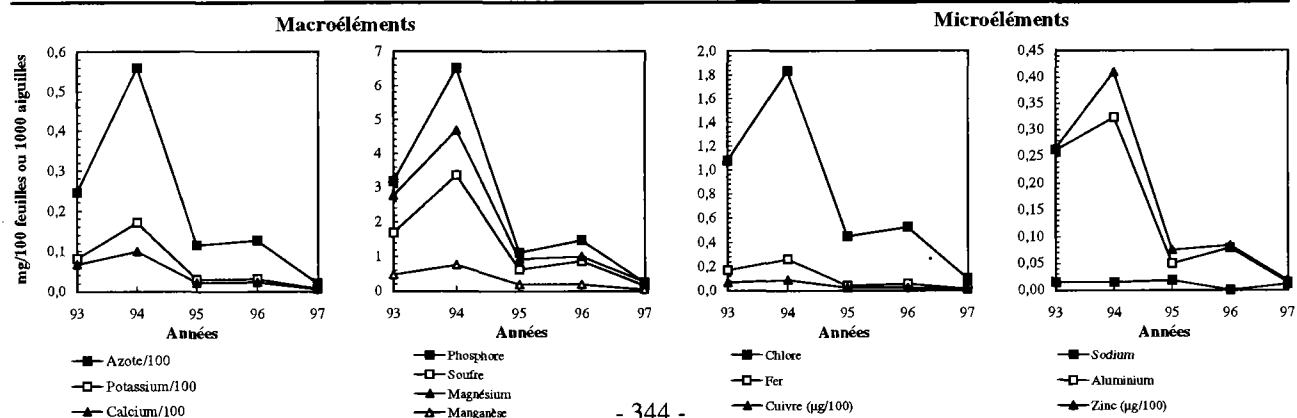
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



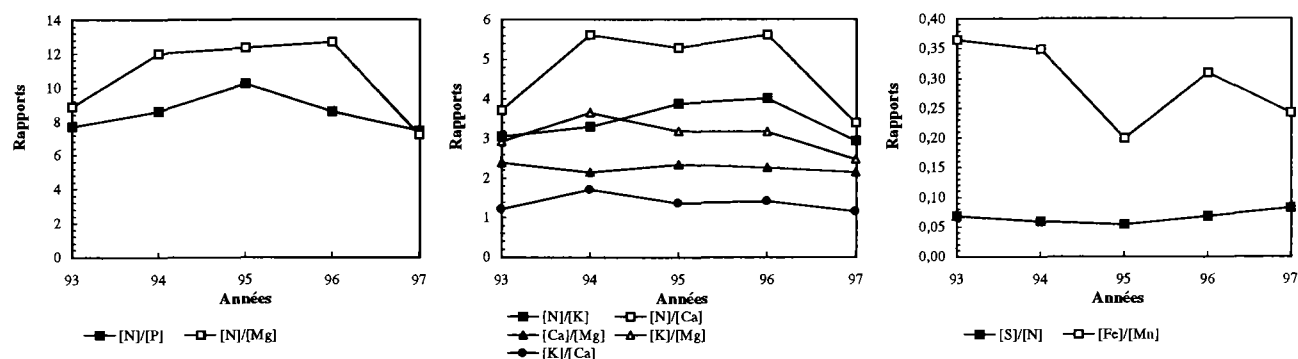
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	17	13	13	22	12	54	20	20	16	29	12	31
Interannuel 93-97 (n=5)	8	8	8	9	15	15	21	13	17	17	123	9	29

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III	Carence	Critique	Optimal
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.	borne sup.				
Macroéléments :	[Bar chart showing three empty boxes]			S	K, Ca	N, P
Microéléments :					Mg	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	14	1,0	1,3	5,0	2,5	0,5				
	Critique	18	1,4	1,5	6,0	4,0	1,0				
	Optimum	20	2,2		7,0	6,0					

Seuils^{Eu} Borne inférieure (bi)
Borne supérieure (bs)

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en potassium, en calcium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en azote et en phosphore. Les teneurs en éléments dans les couches minérales du sol sont moyennes. L'accroissement en surface terrière est moyen à faible (0,38 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles en 1994 et 1995 (< 10 %) et plus importants ensuite (environ 25 %). A noter une attaque généralisée de tordeuse du mélèze avec jaunissement important des aiguilles en 1996 et des houppiers très clairs en 1997. Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est visible entre 1993 et 1997.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1996 et 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses ces années là.

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale d'Aitone (P. 4)

Commune de Evisa (Corse du Sud)

Latitude: 42°15'56" N

Longitude: 8°50'49" E

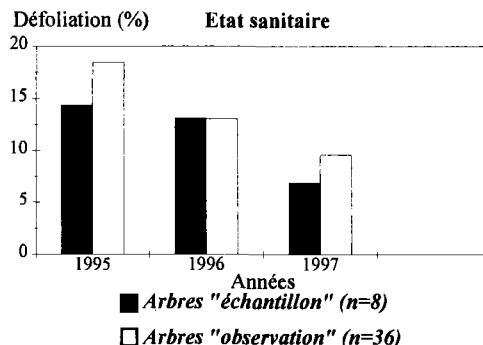
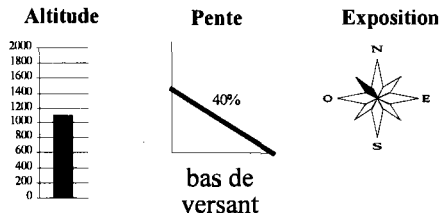
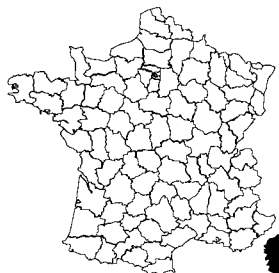
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 173 ± 20

Ho en 1995 (m) : 38,0 ± 2,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.48

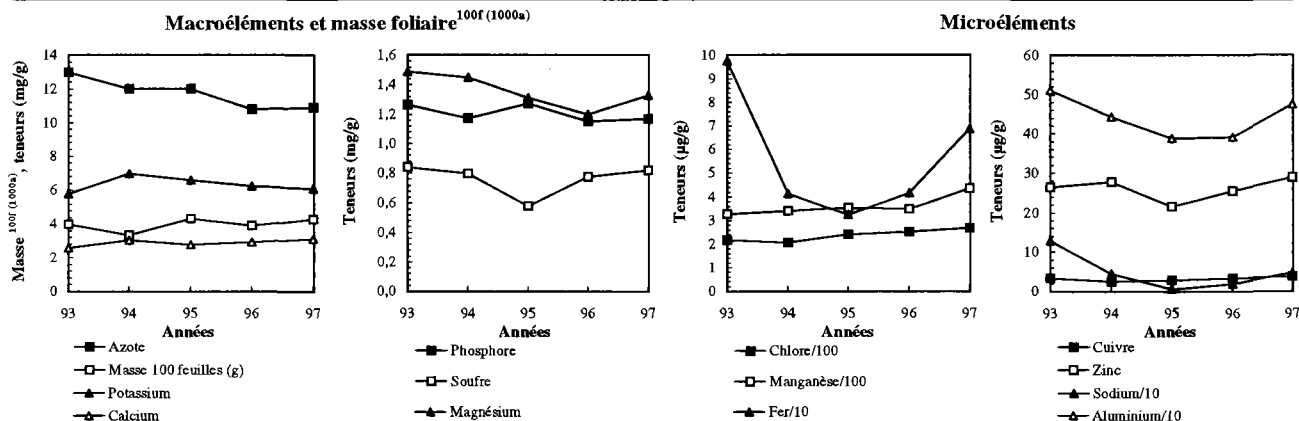


Végétation : *Galio-Pinetum laricii*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol brun acide humifère

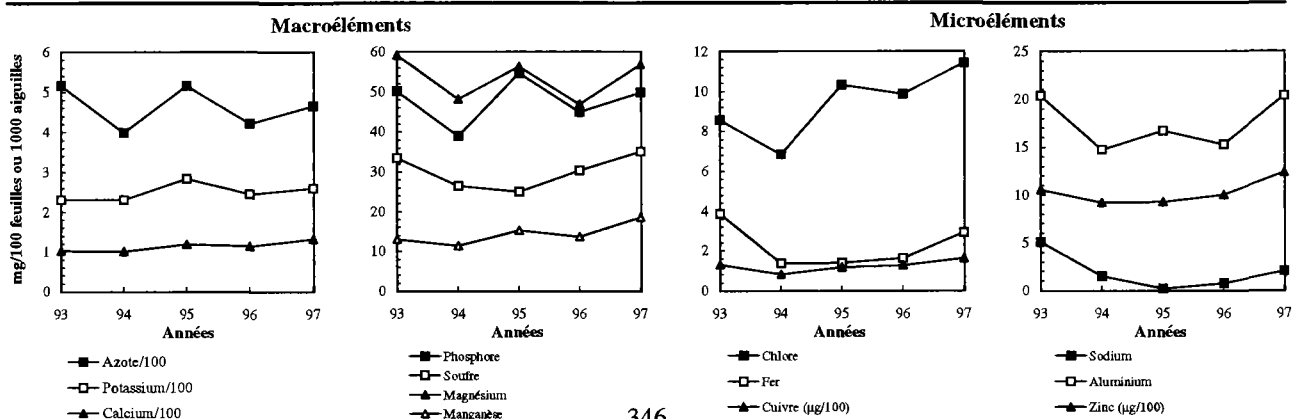
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



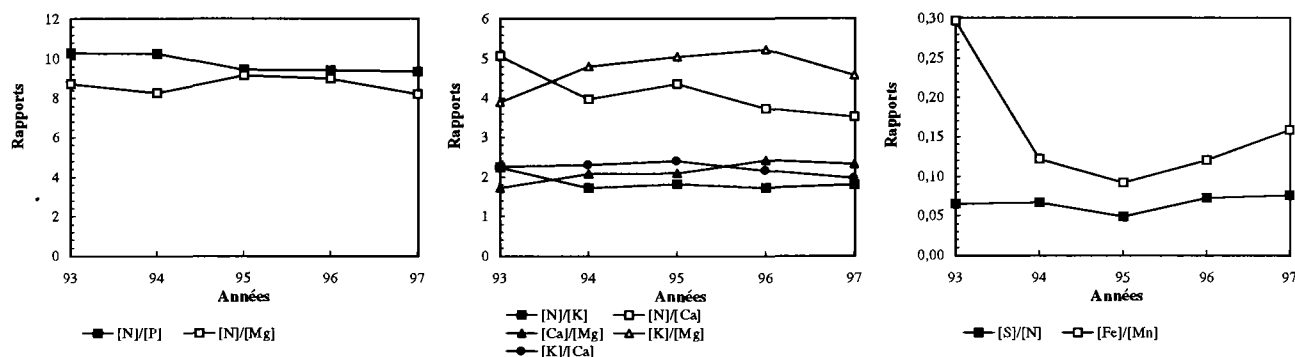
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	11	14	15	36	9	62	20	28	18	91	18	18
Interannuel 93-97 (n=5)	7	4	12	6	7	8	42	10	15	10	89	10	11

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S		P, Ca, Mg, K	S	N	P, K, Ca Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn					

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	8	0,6	0,7	3,5	0,8	0,7				
	Critique	10	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0				
	Optimum		1,2	1,0	5,0	1,9		200			
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), en azote (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en phosphore, en potassium et en calcium. Les teneurs en éléments dans les couches minérales du sol sont moyennes à faible (en particulier pour le phosphore dans la couche 20-40 cm). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,48 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %) et diminuent depuis 1995. Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est visible au cours du temps.

Depuis le début du siècle la forêt sert de pâturage pour des cochons semi sauvages.

Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1995 car il n'était pas possible de changer de direction de prélèvement d'une année sur l'autre.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau I

Forêt Domaniale de Lamotte-Beuvron (P. 71)

Commune de Vouzon (Loir et Cher)

Latitude: 47°39'36" N

Longitude: 2°05'58" E

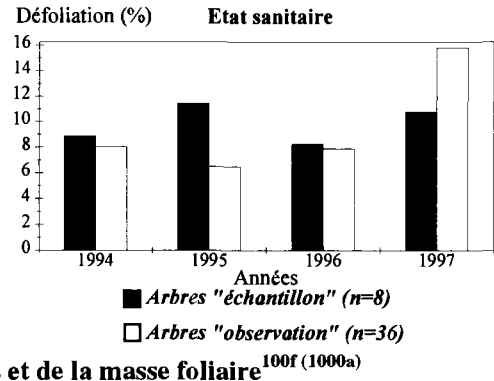
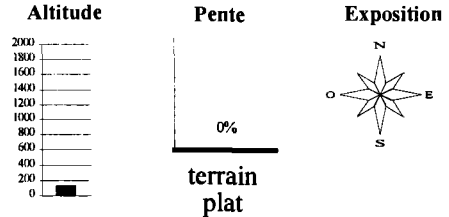
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 45 ± 3

Ho en 1995 (m) : 23,3 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.63



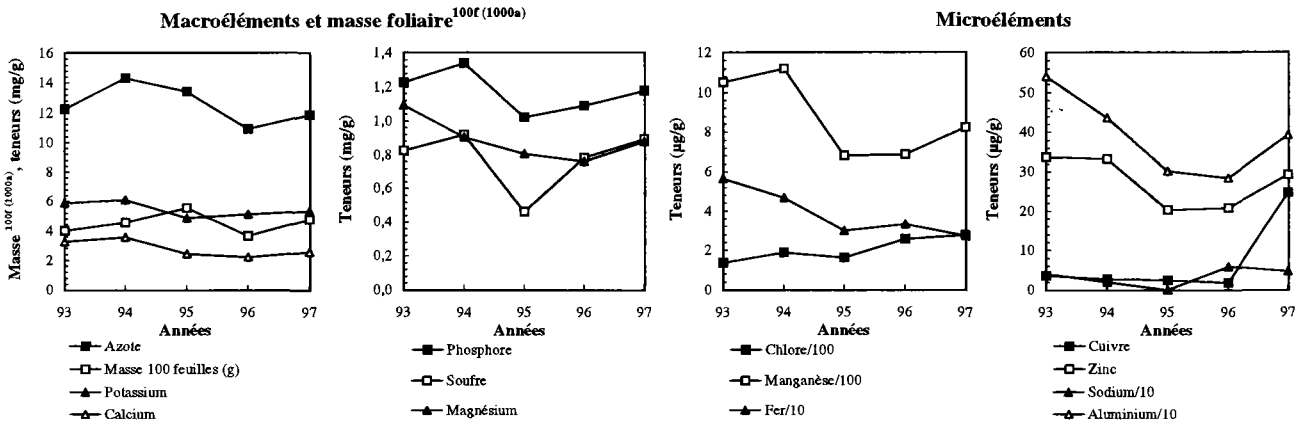
Végétation : *Quercenion robori-pyrenaicae*

Humus : Moder - Dysmoder

Type de sol : Sol podzolique humifère

Sol brun acide à micropodzol

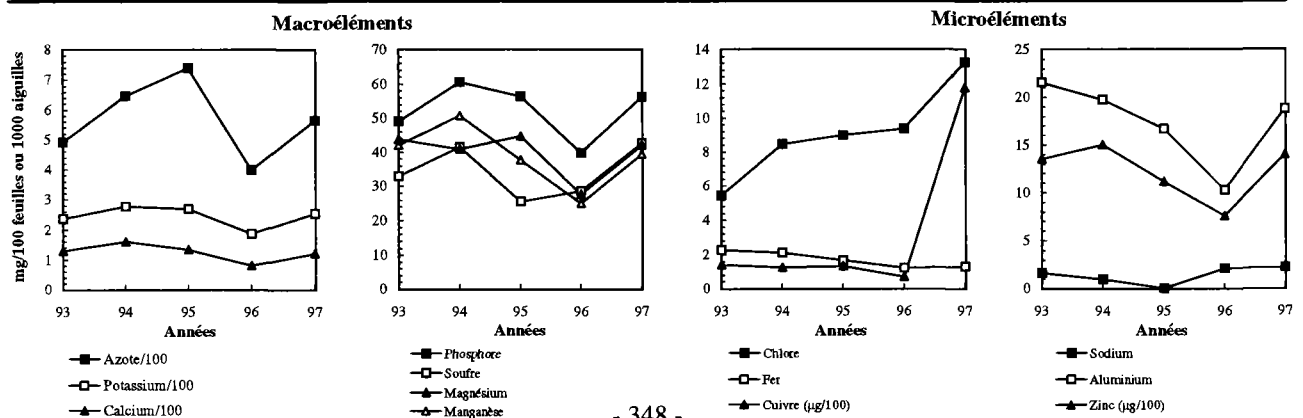
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



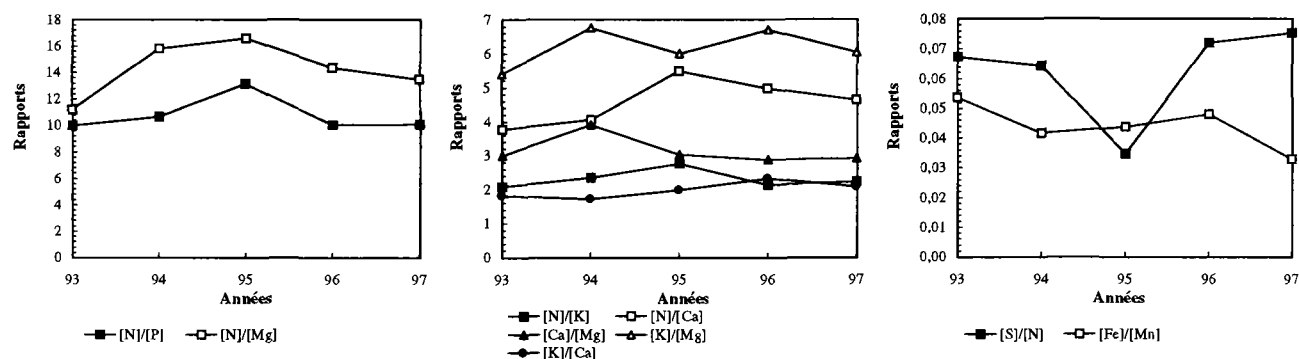
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	17	10	15	13	25	19	12	39	168	20	71	48	36	
Interannuel 93-97 (n=5)	10	9	21	9	18	13	29	21	125	21	62	27	24	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		S, Mg	N, P	K, Ca
Microéléments :		Fe, Cu, Zn	Mn			

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	8	0,6	0,7	3,5	0,8	0,7				
	Critique	10	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0				
	Optimum		1,2	1,0	5,0	1,9		200			
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre, en magnésium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en azote, en phosphore (entre le seuil indicatif critique et l'optimum), et par des teneurs élevées en potassium et en calcium. Les teneurs en magnésium et en potassium échangeable et en azote dans les couches minérales du sol sont faibles alors que les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes. Le rapport S/N est faible. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,63 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Les teneurs foliaires en aluminium et en zinc diminuent entre 1993 et 1996, mais on note pour ces éléments une variabilité intraplacette importante.

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 96-97 (89 jours). Cela pourrait expliquer l'augmentation des teneurs foliaires en Al, Zn et Cu en 1997.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale des Saumonards (P. 14)
Commune de St Georges d'Oléron (Charente Maritime)

Latitude: 45°58'59" N
Longitude: 1°16'25" W

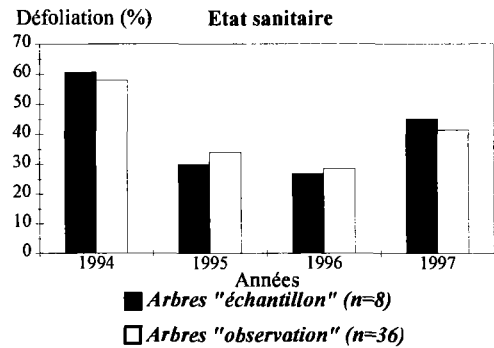
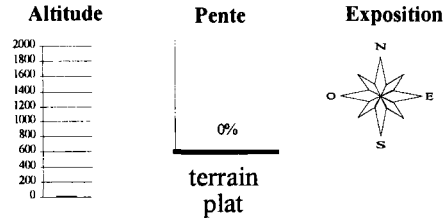
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 23 ± 1

Ho en 1995 (m) : 11,2 ± 1,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : -1.64



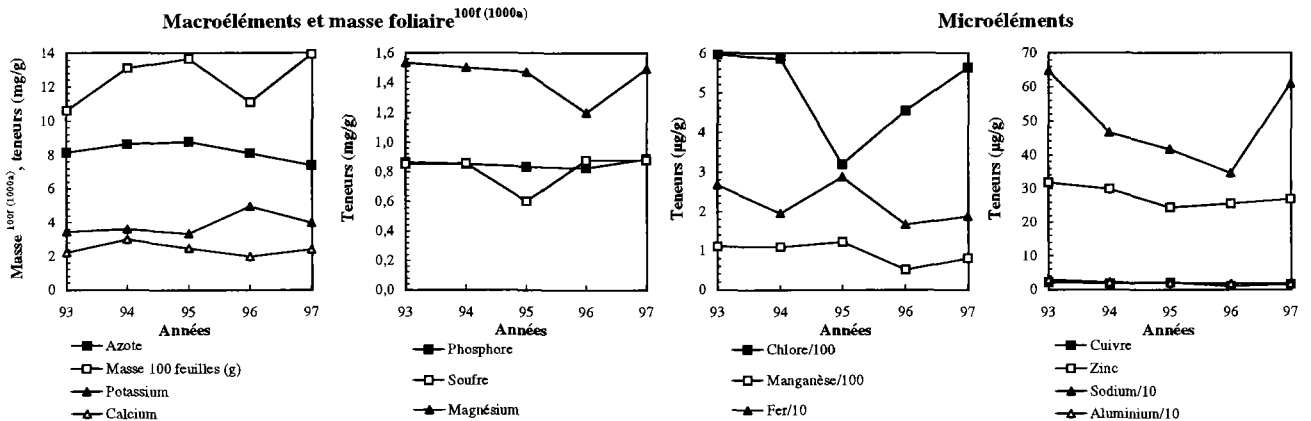
Végétation : *Quercus ilicis-Pinenion maritimi*

Humus : Mor - Amphimull

Type de sol : Sol brun calcaire acidifié en surface, hydromorphe

Sol peu évolué d'apport carbonaté

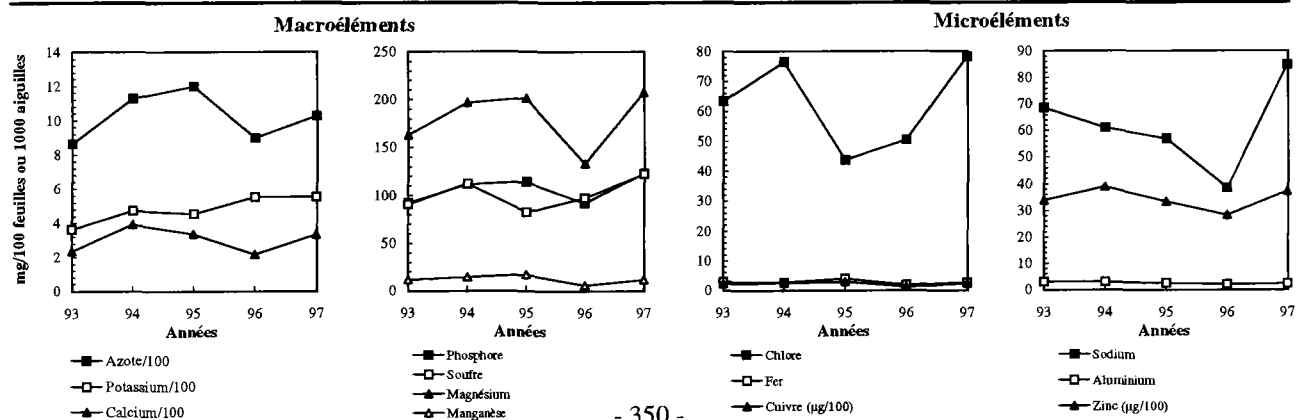
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire 100f (1000a)



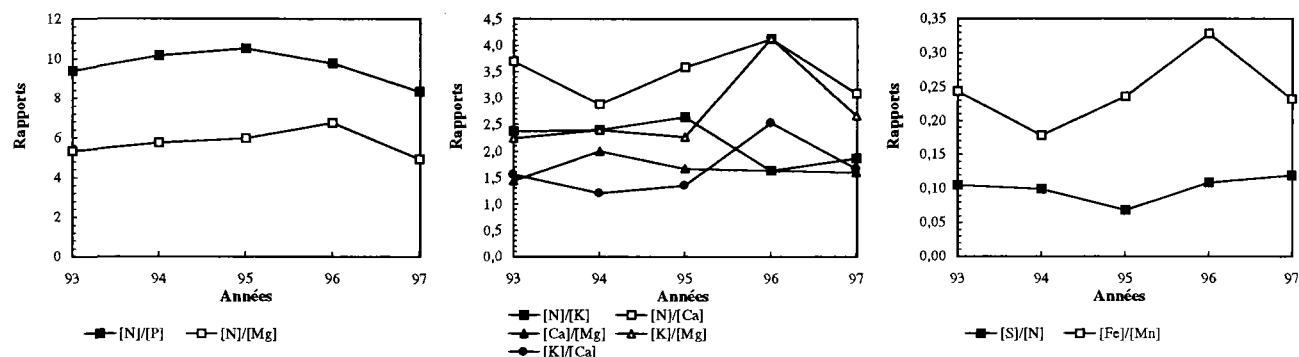
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	14	9	11	17	11	11	23	45	17	18	34	23	47
Interannuel 93-97 (n=5)	6	2	13	15	14	8	22	28	25	10	23	21	21

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires 100f (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P		Ca, Mg, K	N, P, K		
				S		
				Ca, Mg		
Microéléments :	Cu		Fe, Mn, Zn	Mn		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore, potassium (entre le seuil indicatif de carence et critique), en soufre et en manganèse (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs en azote et en potassium échangeable dans les couches minérales du sol sont faibles à très faibles alors que les teneurs en phosphore (J-H) sont moyennes à faibles. Le rapport N/Mg est faible (faibles teneurs en azote). Ces problèmes de nutrition minérale et azotée liée à un humus de type mull carbonaté avaient été pressentis lors de la caractérisation pédologique des sols du réseau (Brêthes et Ulrich, 1997).

Les pourcentages de défoliation élevés en 1994 (environ 60 %) ont diminué en 1995 et 1996 (30 %) puis augmenté en 1997 (45-50 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs en nutriments foliaires.

Des tests de lavage d'aiguilles réalisés sur cette placette en 1996 et 1997 ont montré aucun effet significatif du lavage mis à part pour l'azote en 1996 et 1997 et pour le cuivre en 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Zonza (P. 11)

Commune de Zonza (Corse du Sud)

Latitude: 41°45'08" N

Longitude: 9°12'23" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

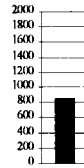
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 42 ± 2

Ho en 1995 (m) : 23,5 ± 1,6

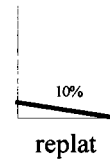
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.96



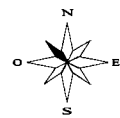
Altitude



Pente

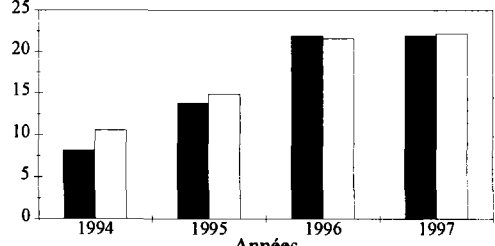


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

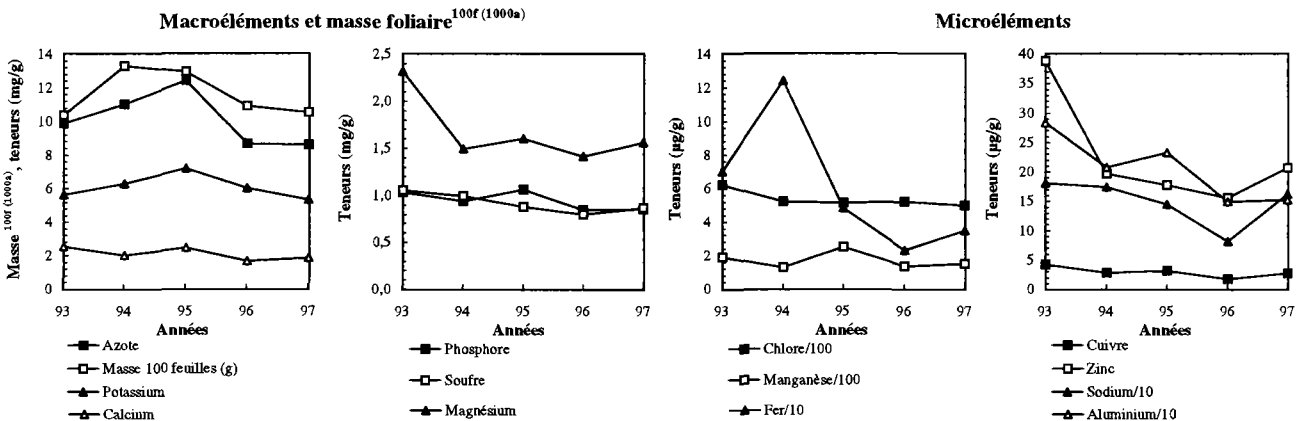


Végétation : *Galio-Pinetum laricii*

Humus : Amphimull

Type de sol : Sol brun humifère

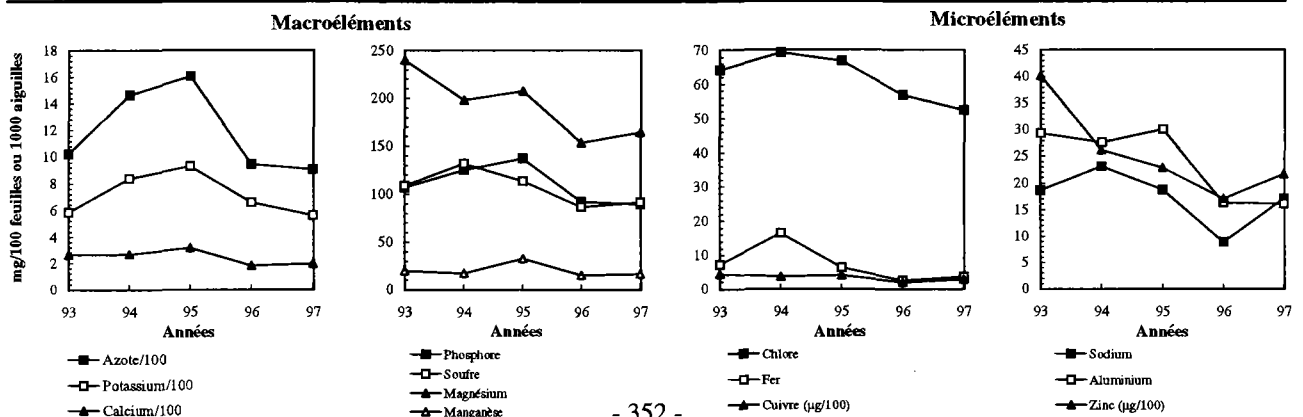
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



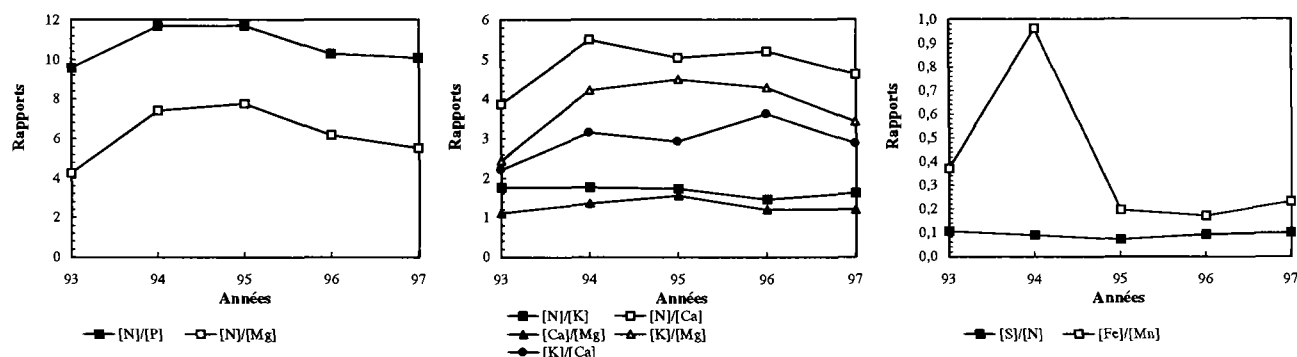
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	16	12	12	21	24	21	24	39	18	17	37	32	13
Interannuel 93-97 (n=5)	14	9	10	10	16	20	59	26	28	37	24	8	25

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P		Ca, K	N, P, S K, Ca, Mg		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en azote, en phosphore, en soufre et en manganèse (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). La teneur foliaire en magnésium est la plus forte pour les placettes de pin maritime, la plus forte teneur en Mg échangeable dans le sol est relevée pour cette placette. Les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes dans les couches minérales du sol. Le rapport N/Mg est faible (teneurs un peu faibles en azote). L'accroissement en surface terrière est moyen à fort (0,96 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation restent faibles (< 25 %) même s'ils augmentent légèrement en 96 et 97 (augmentation peut-être liée à des notations plus sévères). Une diminution des teneurs foliaires en aluminium et en zinc est visible entre 1993 et 1997.

Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1996. Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1994, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Vielle Saint Girons (P. 29)

Commune de Vielle Saint Girons (Landes)

Latitude: 43°56'37" N

Longitude: 1°20'54" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

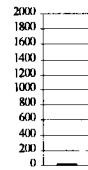
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 29 ± 2

Ho en 1995 (m) : 17,4 ± 1,1

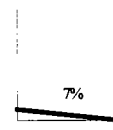
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.26



Altitude

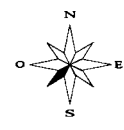


Pente



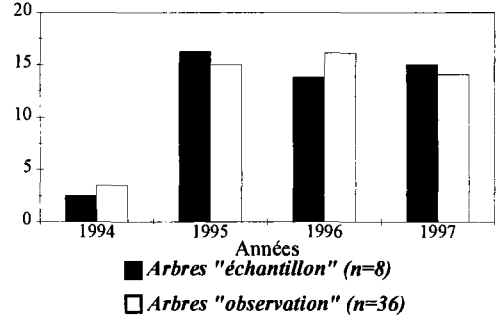
sommet arrondi

Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

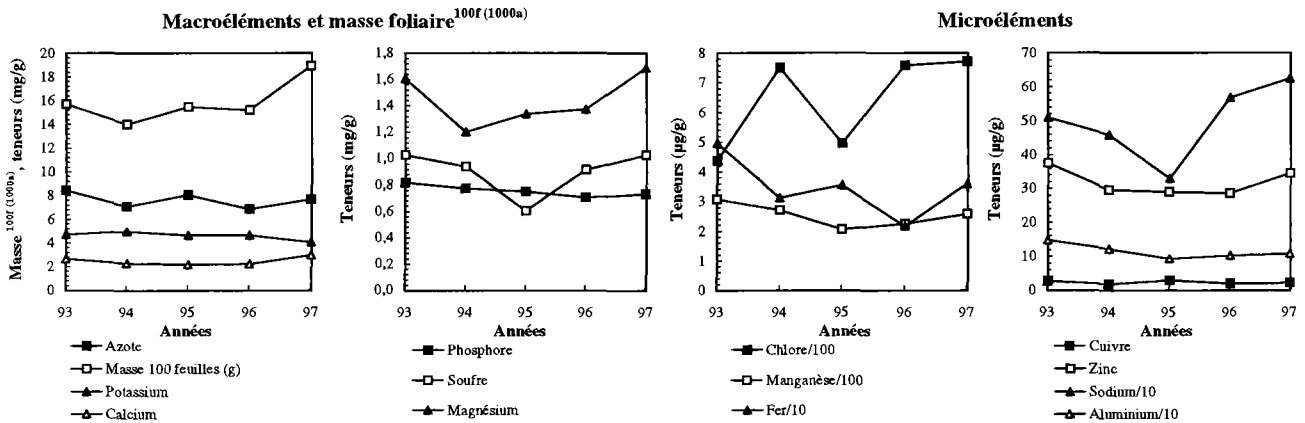


Végétation : *Festuco juncofoliae-Ericetum cinerae*

Humus : Mor

Type de sol : Sol podzolique humifère

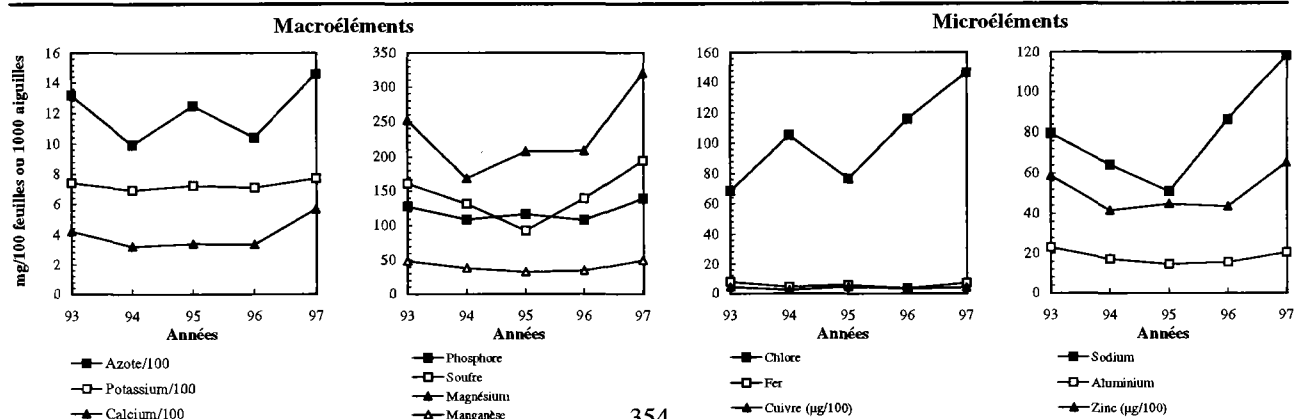
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



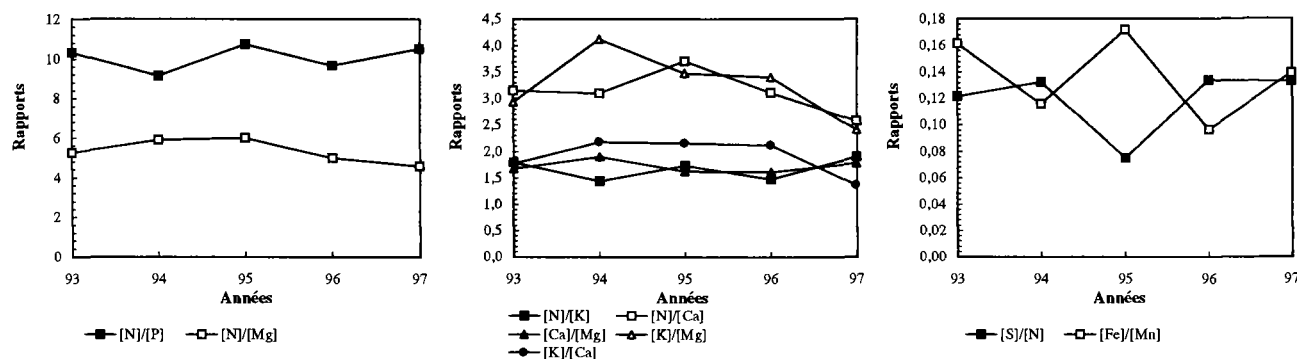
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	13	12	22	18	8	14	17	20	21	19	37	15
Interannuel 93-97 (n=5)	8	5	17	6	13	12	26	14	21	11	20	23	16

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé	Carence	Critique	Optimal
Seuils	borne inf.		borne sup.			
Macroéléments :	N, S, P		Ca, Mg, K	N, P		
				S		
				K, Ca, Mg		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore (entre le seuil indicatif de carence et critique), en soufre et en manganèse (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs en azote et en phosphore (Dyer) dans les couches minérales du sol sont faibles à très faibles (respectivement 0,1-0,2 g/Kg et 0,0-3,0 mg/Kg). Le rapport N/Mg est faible (faibles teneurs en azote). L'accroissement en surface terrière est fort (1,26 m²/ha/an), ce peuplement est jeune (29 ans à 1,30 en 1994).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs en nutriments foliaires, les teneurs foliaires en sodium sont très variables entre années d'analyse.

Les prélèvements foliaires ont été réalisés en alternance d'une année sur l'autre sur les deux groupes de 8 arbres échantillons à cause de la taille réduite des houppiers. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (83 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Communale d'Arx (P. 12)

Commune de Arx (Landes)

Latitude: 44°06'23" N

Longitude: 0°06'34" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis sur labours

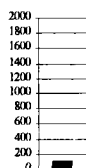
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 17 ± 1

Ho en 1995 (m) : 15,4 ± 1,0

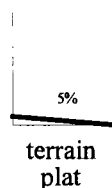
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 3.19



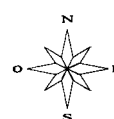
Altitude



Pente

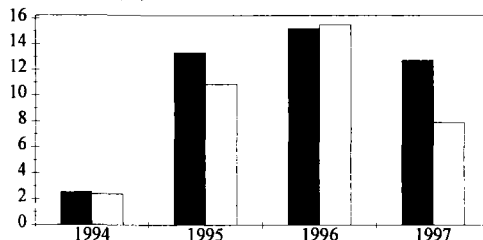


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



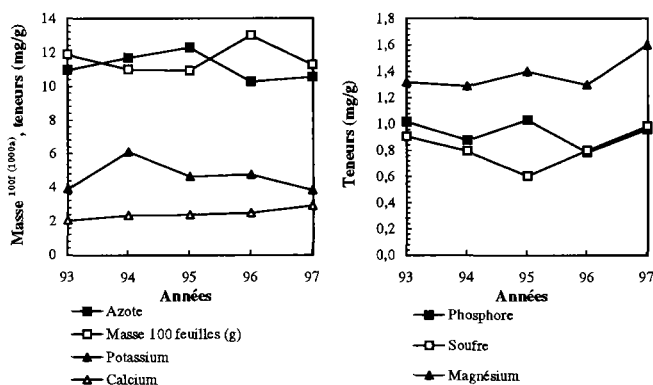
Végétation : *Ericenion ciliaro-tetralicis*

Humus : Mor

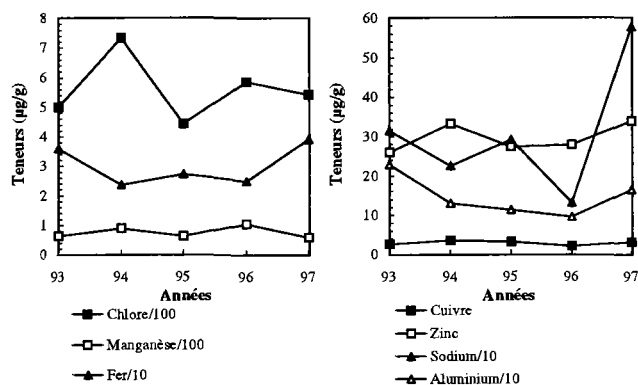
Type de sol : Podzol humique

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire^{100f (1000a)}



Microéléments

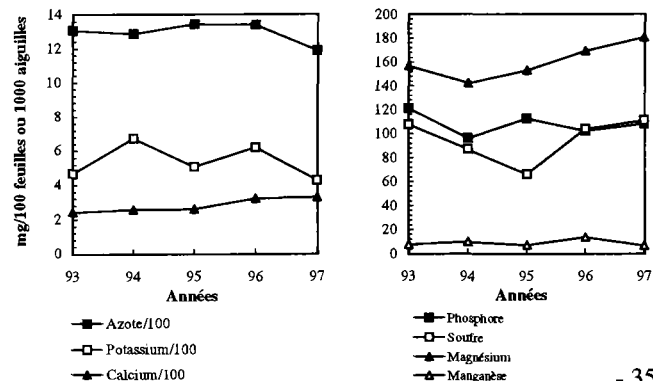


Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

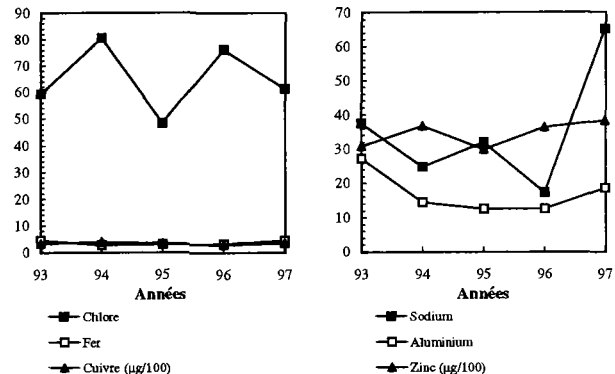
	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	15	10	17	19	15	11	46	15	15	15	53	21	24
Interannuel 93-97 (n=5)	7	10	16	18	12	8	21	24	18	11	48	18	32

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}

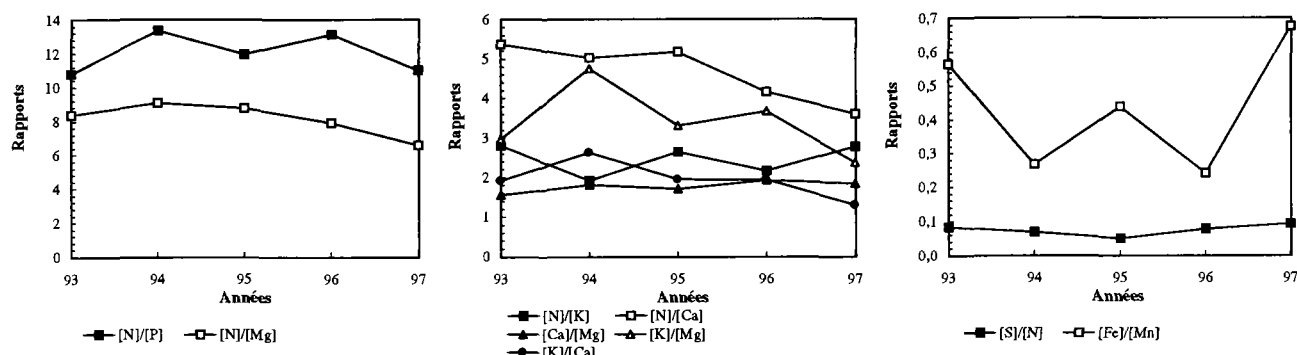
Macroéléments



Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P		Ca, Mg, K		N, P, S	K, Ca, Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn				Mn	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en azote, en phosphore, en soufre et en manganèse (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont faibles dans les couches minérales du sol (10-40 cm). L'accroissement en surface terrière est fort (3,19 m²/ha/an) pour ce jeune peuplement (17 ans à 1,30 m en 1994).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires au cours du temps n'est visible actuellement (noter cependant la variabilité interannuelle importante pour le sodium).

Les prélèvements foliaires ont été réalisés en alternance d'une année sur l'autre sur les deux groupes de 8 arbres "échantillon" à cause de la taille réduite des houppiers.

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (91 jours) sans entraîner d'écarts sensibles entre ces deux années pour les teneurs foliaires en nutriments.

Placette de niveau 2

Forêt Communale de Losse (P. 41)

Commune de Losse (Landes)

Latitude: 44°02'46" N

Longitude: 0°00'02" W

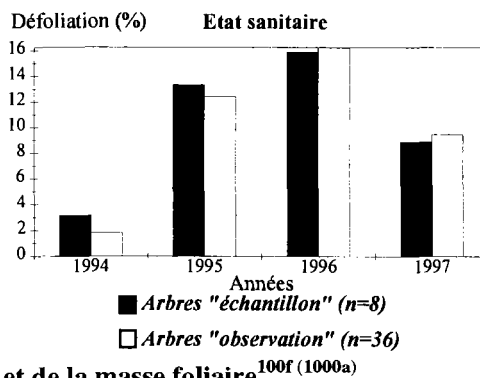
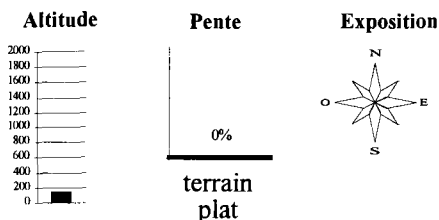
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis en ligniculture

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 15 ± 1

Ho en 1995 (m) : 14,0 ± 0,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.69



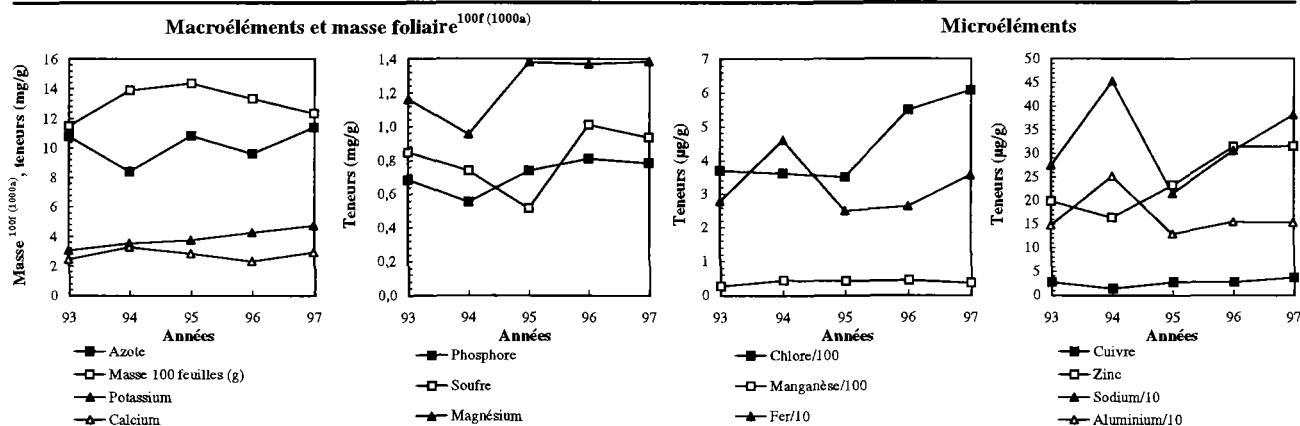
Végétation : *Ericenion ciliaro-tetralicis*

Humus : Mor

Type de sol : Podzol humique à gley

Podzol humo-ferrugineux à gley profond

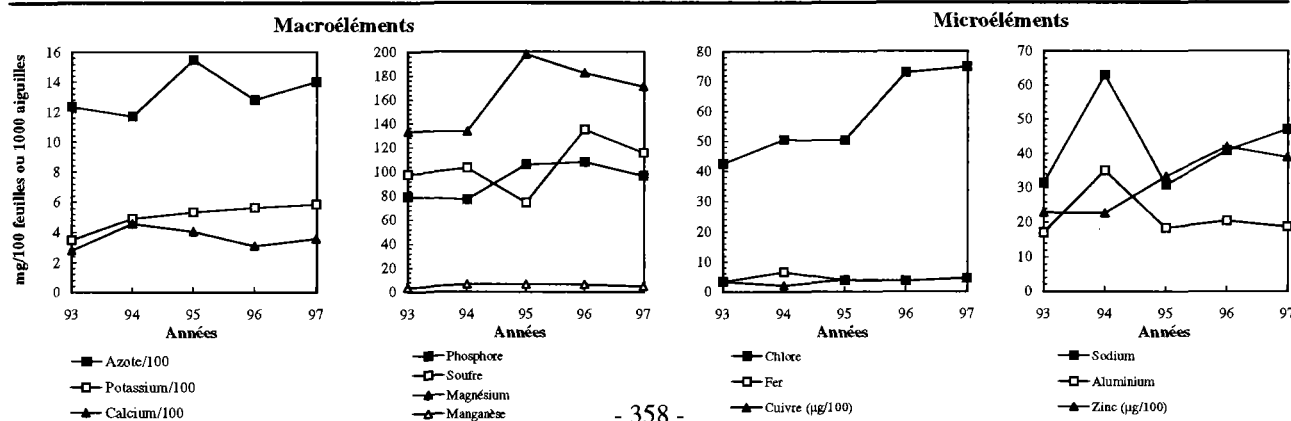
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



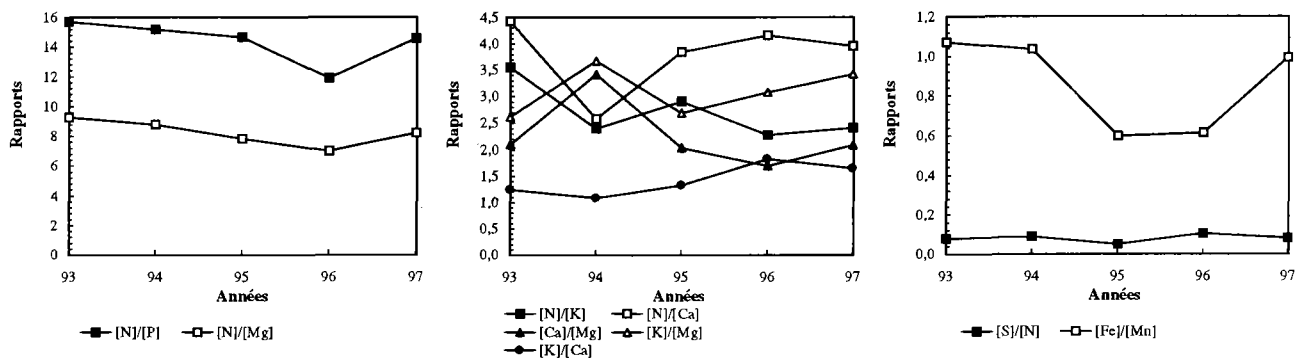
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	14	13	37	27	20	29	29	26	18	26	33	11
Interannuel 93-97 (n=5)	10	13	21	15	12	14	24	18	28	25	25	24	26

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P		Ca, Mg, K	P, K		N, S Ca, Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en manganèse (proche du seuil indicatif de carence), en phosphore, en potassium (entre le seuil indicatif de carence et critique) en azote et en soufre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs en azote et en phosphore (Dyer) dans les couches minérales du sol sont moyennes, par contre, les teneurs en potassium échangeable sont très faibles (entre 0,03 et 0,06 cmolc/Kg). L'accoissement en surface terrière est moyen à fort (1,69 m²/ha/an), ce peuplement est le plus jeune des peuplements de pin maritime du réseau (15 ans à 1,30 en 1994). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Les teneurs foliaires en zinc ont tendance à augmenter entre 1993 et 1997.

Les prélèvements foliaires ont été réalisés en alternance d'une année sur l'autre sur les deux groupes de 8 arbres "échantillon" à cause de la taille réduite des houppiers.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1993, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (91 jours).

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale de Bercé (P. 88 p)

Commune de Lavernat (Sarthe)

Latitude: 47°44'53" N

Longitude: 0°20'04" E

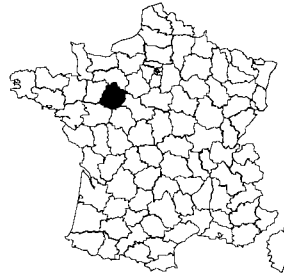
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis

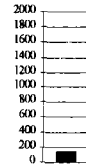
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 26 ± 1

Ho en 1995 (m) : 17,8 ± 0,9

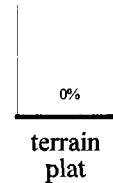
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.03



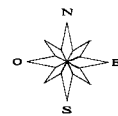
Altitude



Pente

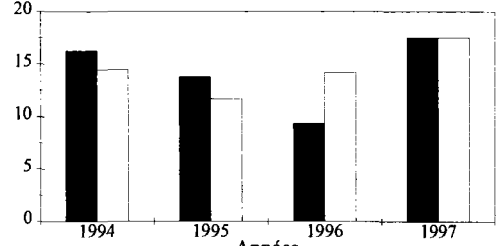


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



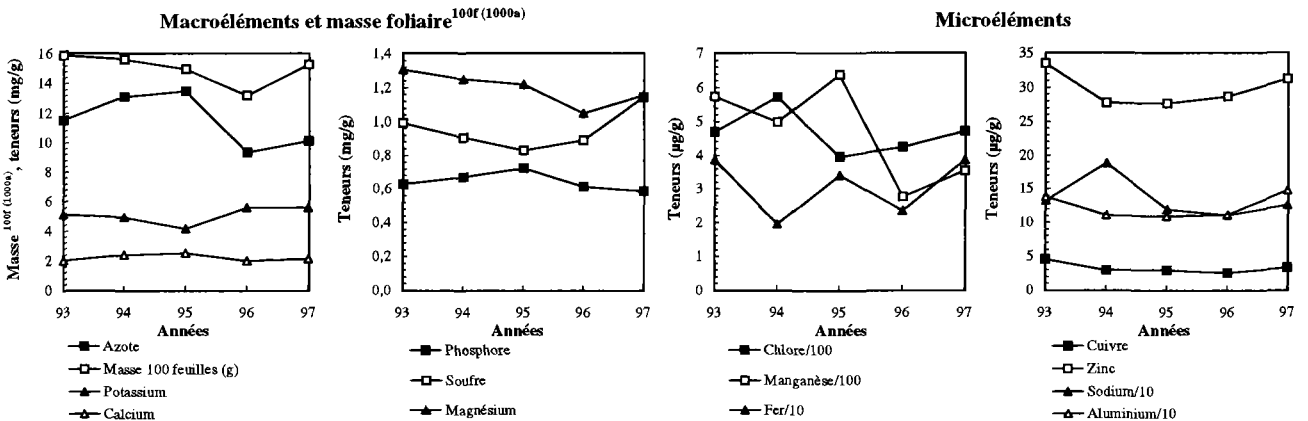
■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Sol podzolique hydromorphe

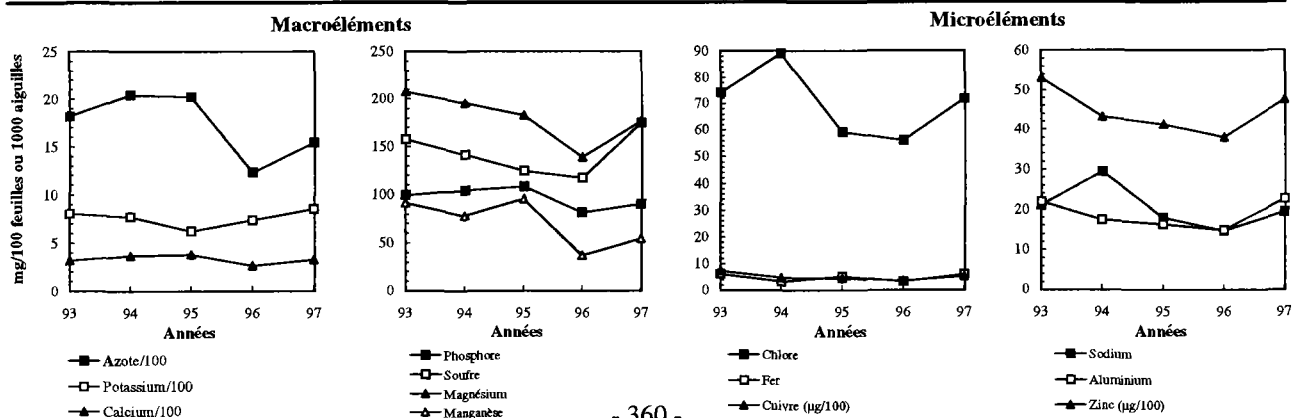
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



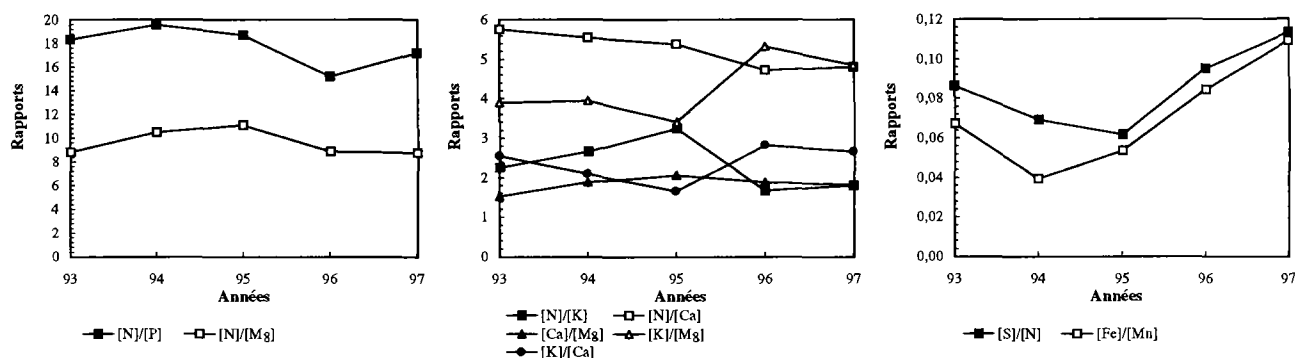
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	16	6	8	10	19	9	19	82	13	17	39	28	22
Interannuel 93-97 (n=5)	14	7	11	10	10	7	26	29	21	8	20	13	13

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P		Ca, Mg, K	P, N, S, K, Ca, Mg		
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0		50		
	Optimum	12	1,2	1,2					400		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore (entre le seuil indicatif de carence et critique) en azote et en soufre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en manganèse (supérieur à l'optimum). Les teneurs en azote et en phosphore (Dyer) dans les couches minérales du sol sont moyennes, par contre, les teneurs en potassium échangeable sont très faibles (entre 0,03 et 0,07 cmolc/Kg). Le rapport N/P est élevé (faibles teneurs en phosphore). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs foliaires.

Des tests de lavage d'aiguilles réalisés sur cette placette en 1996 et 1997 ont montré un effet significatif du lavage uniquement pour le sodium en 1997, pour le fer en 1996 et pour le cuivre les deux années.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Notre Dame de Monts (P. 25)

Commune de Notre Dame de Monts (Vendée)

Latitude: 46°52'37" N

Longitude: 2°08'18" W

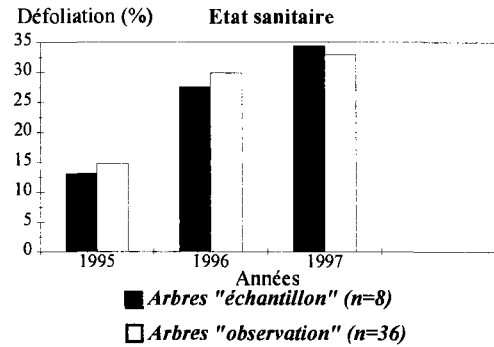
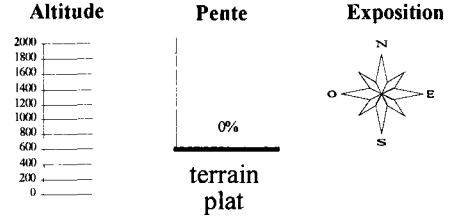
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis en ligniculture

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 62 ± 6

Ho en 1995 (m) : 12,3 ± 1,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.20

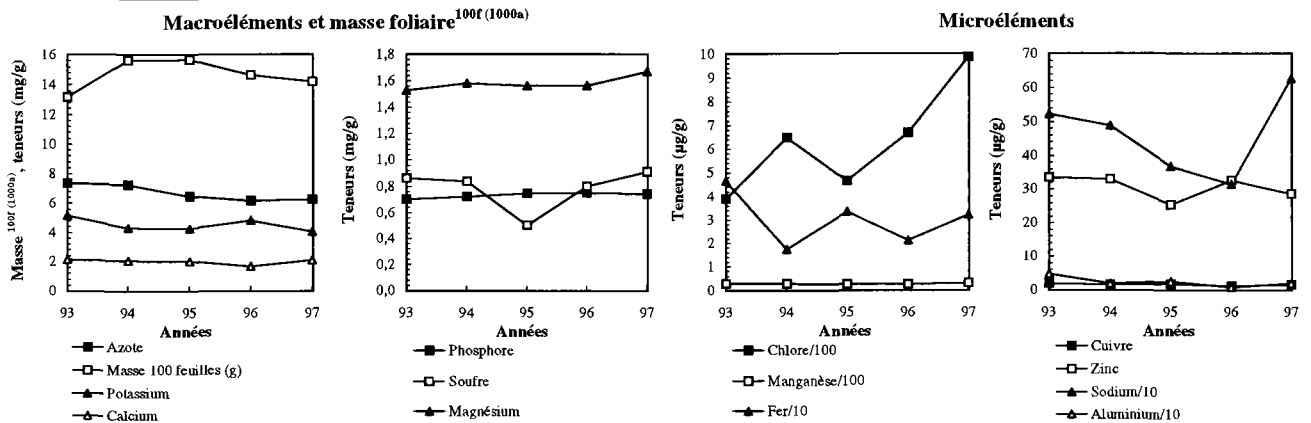


Végétation : *Rubio-Prunion spinosae*

Humus : Amphimull

Type de sol : Sol peu évolué d'apport

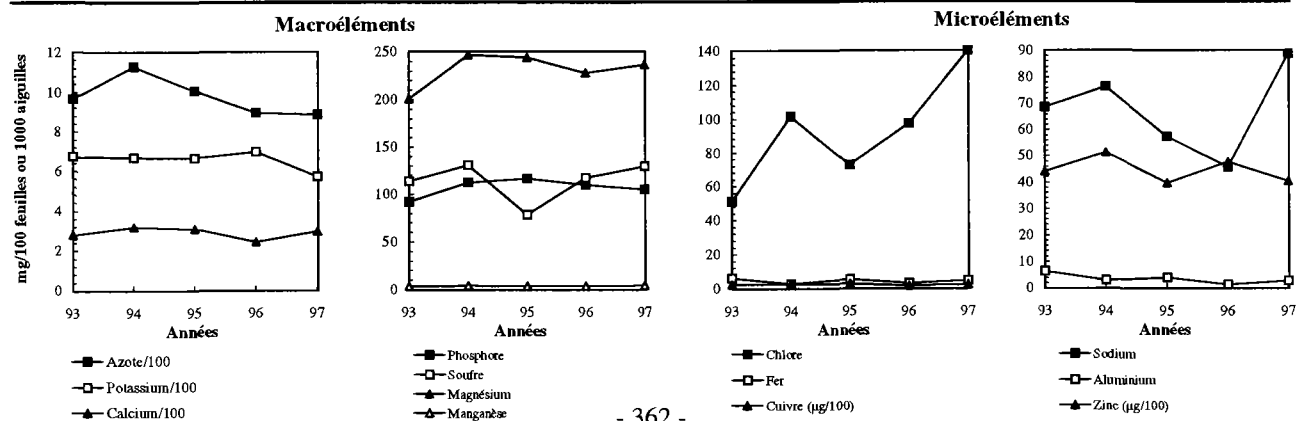
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



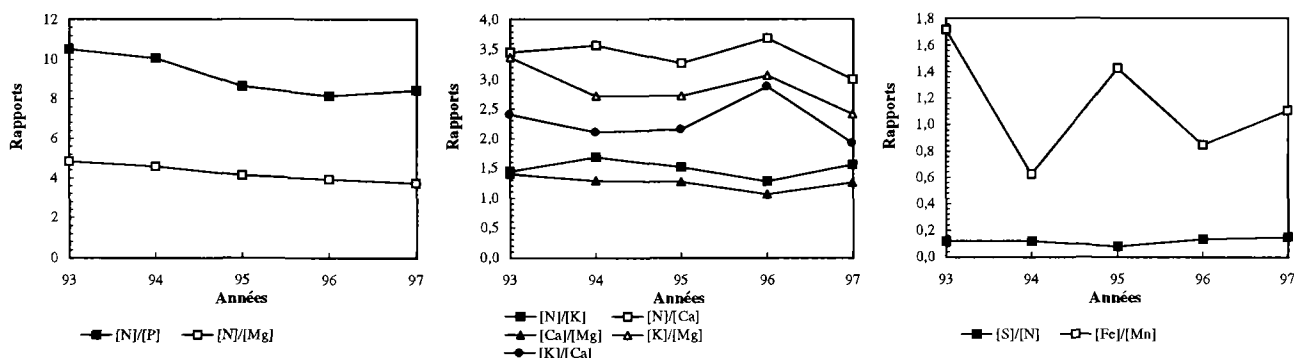
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	16	11	10	19	17	14	17	34	22	20	33	34	35	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	3	19	9	8	3	34	8	17	10	24	33	56	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P	Ca, K	Mg	N	P, S, K	Ca, Mg
Microéléments :	Cu	Fe, Mn, Zn		Mn		

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	7	0,6	0,7	3,0	0,8	0,6				
	Critique	9	0,9	0,8	4,5	1,0	1,0	50			
	Optimum	12	1,2	1,2				400			
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en azote foliaire est mise en évidence pour cette placette. Les teneurs foliaires sont faibles pour le phosphore, le soufre, le potassium et le manganèse (entre le seuil indicatif de carence et critique). Les teneurs en azote dans les couches minérales du sol sont faibles (0,1 à 1,1 g/Kg) et concordent avec un faible indice de richesse en azote d'Ellenberg (3,1 pour une moyenne de 4,2 pour l'ensemble des 102 placettes du réseau, Dobremez et al., 1997). Les teneurs en phosphore (J-H) sont moyennes à faibles (1,6 à 3,9 mg/Kg) tandis que les teneurs en potassium sont très faibles (de 0,01 à 0,04 cmolc/Kg). Le rapport N/Mg est faible (carence en azote et valeurs fortes pour le magnésium foliaire). C'est le peuplement de pin maritime le plus âgé (environ 62 ans à 1,30 m en 1994). L'accroissement en surface terrière moyen est faible (0,20 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation ont augmenté de 12 à 35 % entre 1995 et 1997 (augmentation peut-être dûe en partie à des notations plus sévères à partir de 1995).

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est visible entre 1993 et 1997.

Des tests de lavage d'aiguilles réalisés sur cette placette en 1996 et 1997 ont montré un effet significatif du lavage pour beaucoup de nutriments en 1996 (P, K, Mg, S, Na, Cl et Fe) et uniquement pour le chlore en 1997.

Placette de niveau 1

Forêt Communale du Fugeret (P. 20)
Commune de Le Fugeret (Alpes de Haute Provence)

Latitude: 44°01'30" N
Longitude: 6°40'16" E

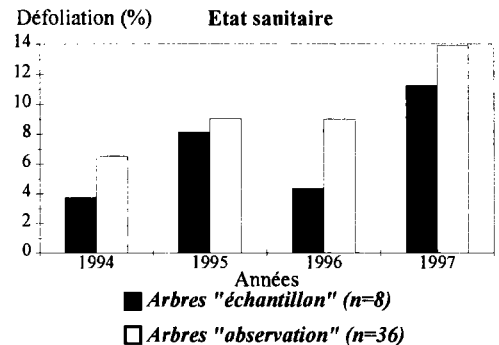
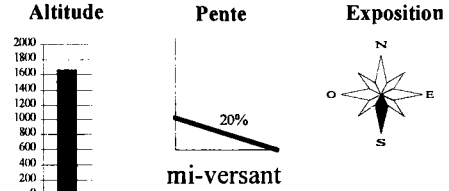
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 69 ± 17

Ho en 1995 (m) : 17,0 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.25



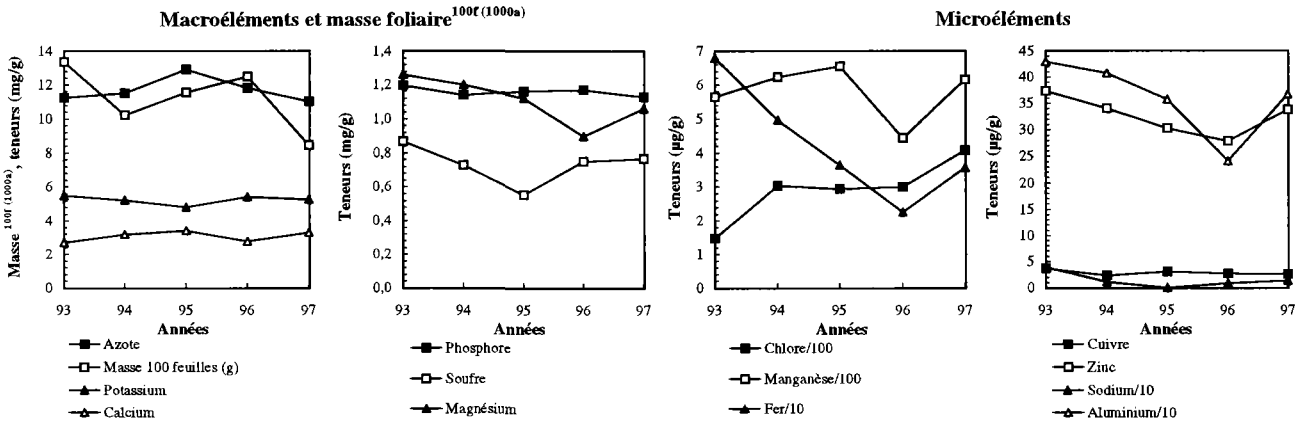
Végétation : *Deschampsia flexuosae-Pinon sylvestris*

Humus : Dysmoder - Amphimull

Type de sol : Ranker

Sol brun acide

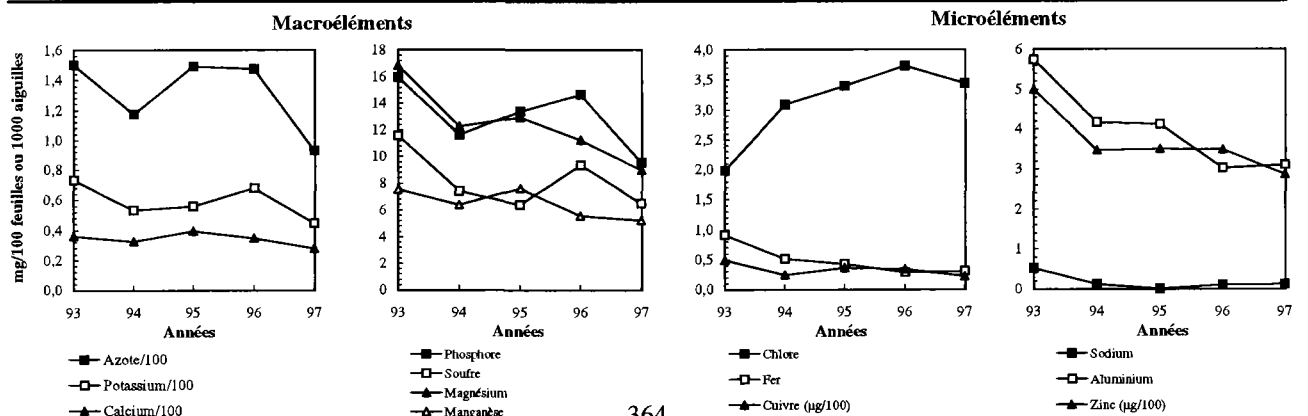
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



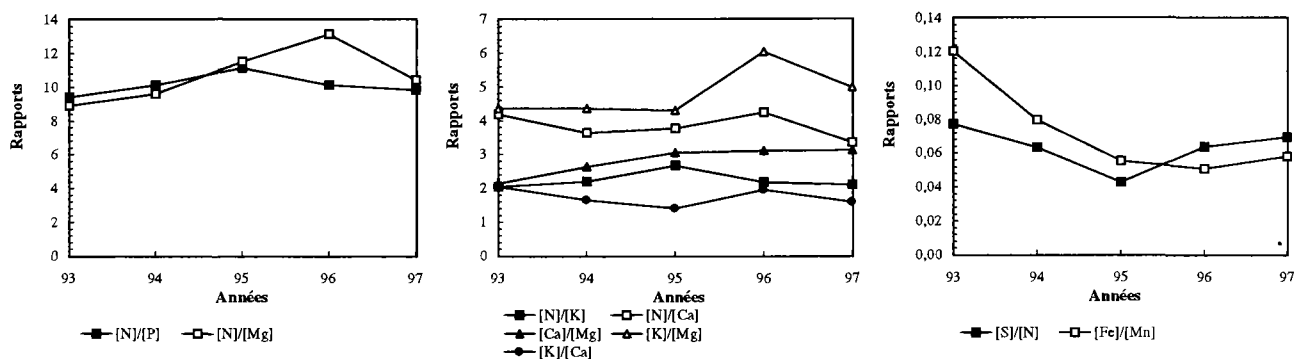
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	15	8	17	18	24	18	29	68	26	93	27	26
Interannuel 93-97 (n=5)	6	2	14	4	9	11	36	13	17	10	92	29	18

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}			
Classes	I	II	III				
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé				
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal	
Macroéléments :	N, S		P, Ca, Mg, K	N	P, S	K	Ca, Mg
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu		Mn, Zn	

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en azote foliaire est mise en évidence pour cette placette mais on peut se demander si le seuil de carence est adapté pour ce peuplement d'altitude. Les teneurs foliaires sont faibles pour le phosphore, le soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), le potassium, le cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs foliaires sont élevées pour Ca, Mg, Mn et Zn (teneurs supérieures à l'optimum). Les teneurs en azote dans les couches minérales du sol sont faibles (0,4 à 0,7 g/Kg) ainsi que les teneurs en potassium (0,10 à 0,12 cmolc/Kg), mais les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes (4,4 à 6,0 mg/Kg) par rapport aux valeurs observées sur le réseau. Les rapports étudiés ne montrent pas de déséquilibre nutritionnel sur cette placette sauf pour S/N qui est faible. L'accroissement en surface terrière moyen est faible (0,25 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %).

Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est visible entre 1993 et 1997 malgré une diminution de la teneur foliaire en aluminium jusqu'en 1996 (mais la variabilité intraplacette est élevée). Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1996. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 95-96 (62 jours) et en 96-97 (59 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Sectionale de Paulhac (P. 6)

Commune de Chaudes-Aigues (Cantal)

Latitude: 44°51'40" N

Longitude: 3°03'30" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation et semis

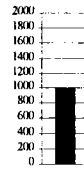
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 60 ± 2

Ho en 1995 (m) : 22,0 ± 1,2

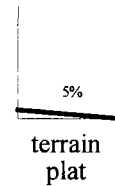
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.52



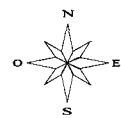
Altitude



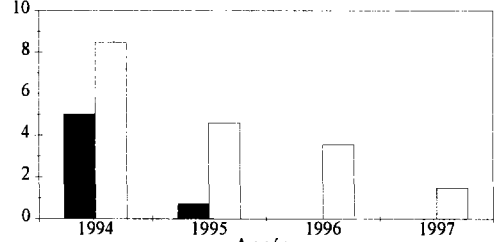
Pente



Exposition



Défoliation (%)



Etat sanitaire

Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

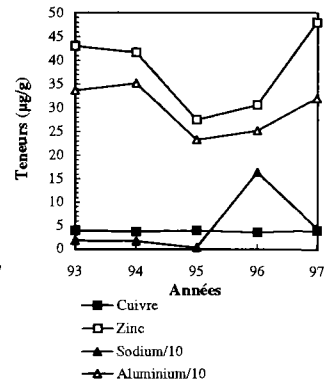
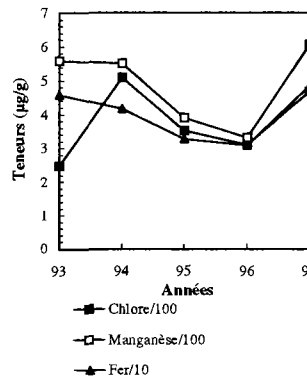
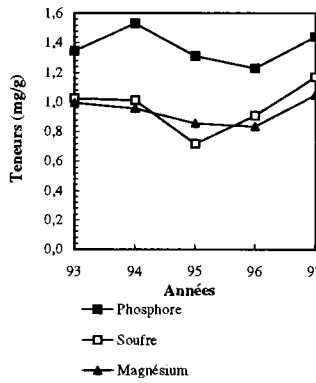
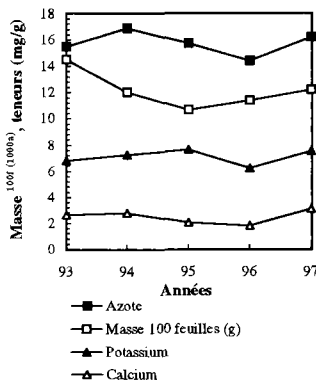
Humus : Moder

Type de sol : Sol brun acide

Sol brun ocreux humifère

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire ^{100f (1000a)}

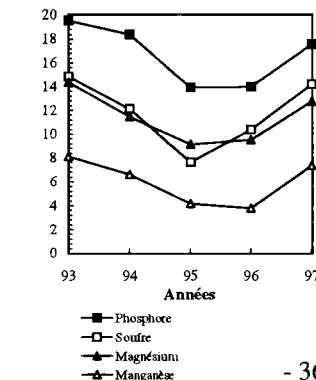
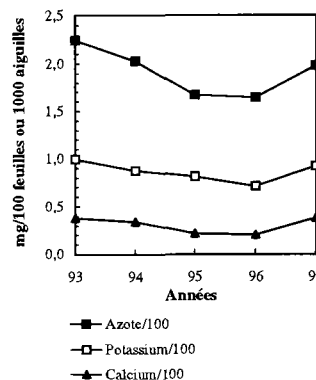


Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

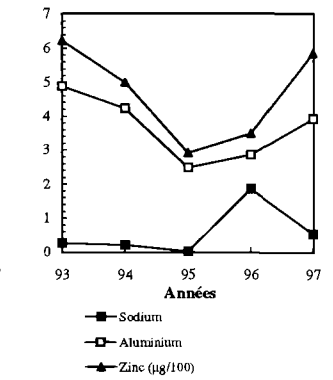
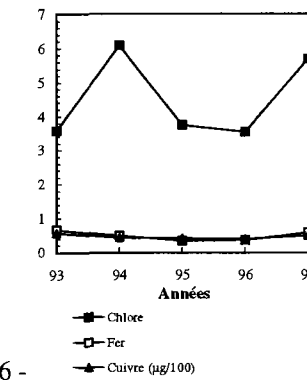
	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	6	8	9	14	19	15	19	12	14	18	86	14	26
Interannuel 93-97 (n=5)	5	8	15	7	20	9	17	22	5	20	120	26	16

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}

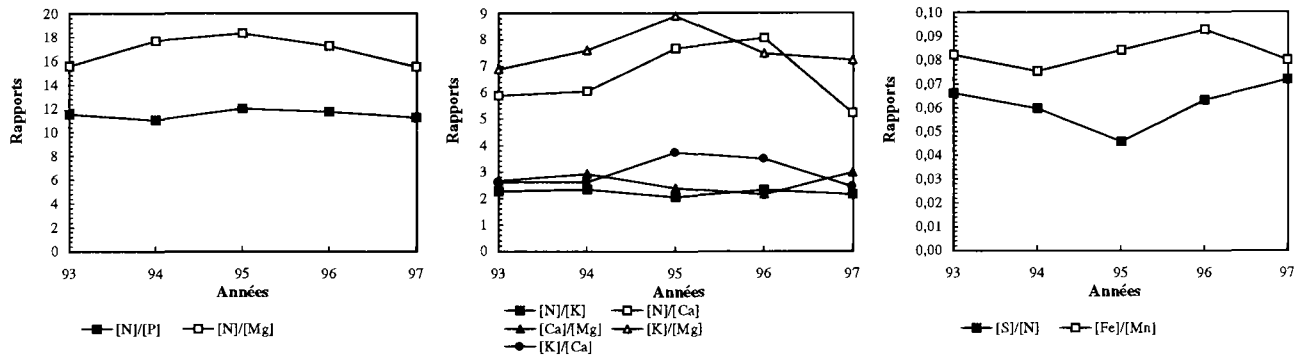
Macroéléments



Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		P, S	K, Mg	Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en éléments (P, K, Mg, Ca) dans les couches minérales du sol sont moyennes. Le rapport S/N est faible. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,52 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %), on remarque que la défoliation est sous-estimée sur les 8 arbres "échantillon" par rapport aux 36 arbres "observation". Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs foliaires entre 1993 et 1997.

Un arbre "échantillon" exploité par erreur a été remplacé en 1995.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Rennes (P. 57)

Commune de Liffre (Ile et Vilaine)

Latitude: 48°12'04" N

Longitude: 1°33'17" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation - Régénération naturelle

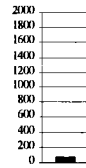
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 41 ± 10

Ho en 1995 (m) : 17,2 ± 1,9

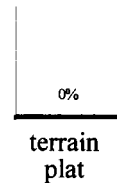
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.19



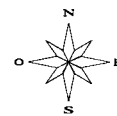
Altitude



Pente

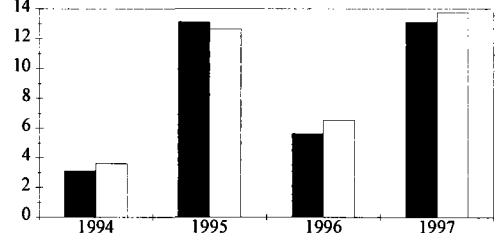


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

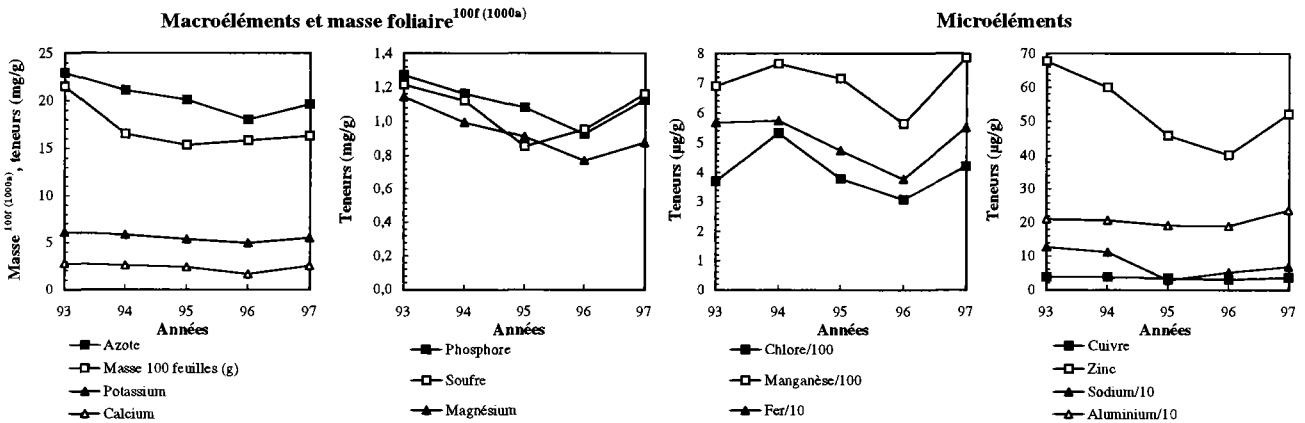


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Pseudogley podzolique

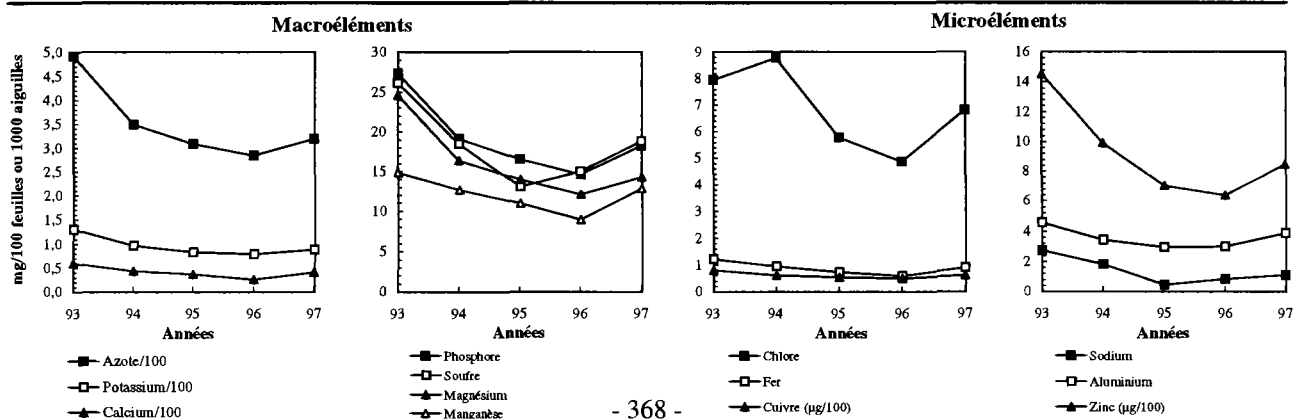
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



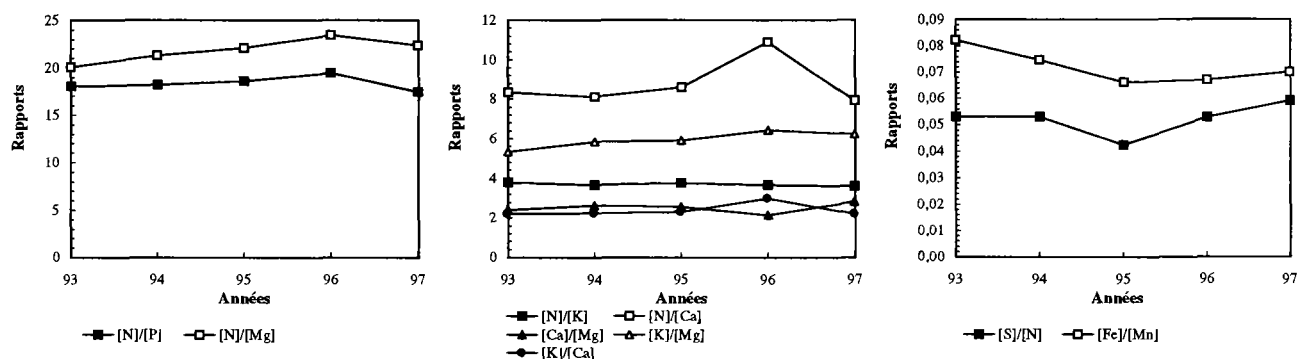
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	13	9	10	15	34	14	17	24	19	15	71	14	23
Interannuel 93-97 (n=5)	8	10	13	7	16	13	15	11	7	18	47	19	8

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	P, Ca, Mg, K	N	P	K, Mg	Ca
					N, S	
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont faibles en profondeur dans les couches minérales du sol, de même que le potassium et le calcium. Par contre les teneurs en magnésium sont moyennes. Les rapports N/P et N/Mg sont élevés (faibles teneurs foliaires en phosphore et moyenne en azote) et le rapport S/N est faible. L'accroissement en surface terrière est fort (1,19 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs foliaires entre 1993 et 1997 à l'exception du zinc qui a diminué jusqu'à 1996 (mais la variabilité intraplacette est du même ordre de grandeur que la variabilité interannuelle).

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 96-97 (50 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lamotte Beuvron (P. 75)

Commune de Vouzon (Loir et Cher)

Latitude: 47°39'14" N

Longitude: 2°05'41" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

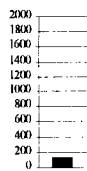
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 39 ± 1

Ho en 1995 (m) : 20,3 ± 1,0

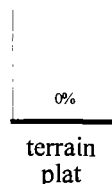
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.67



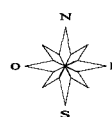
Altitude



Pente

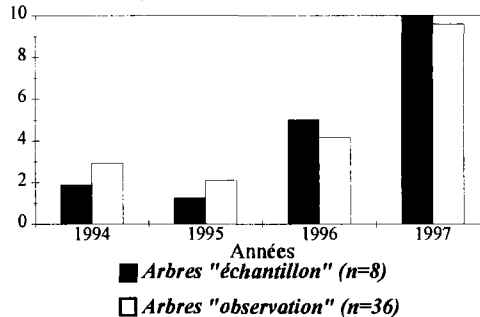


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



Végétation : *Quercenion robori-pyrenaicae*

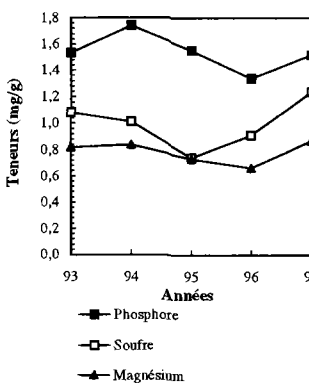
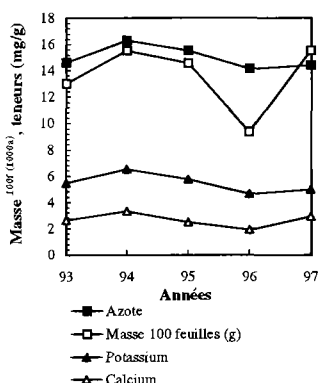
Humus : Mor

Type de sol : Sol brun acide à micropodzol

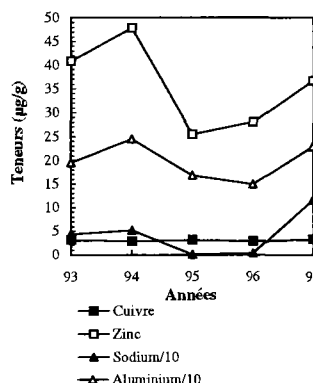
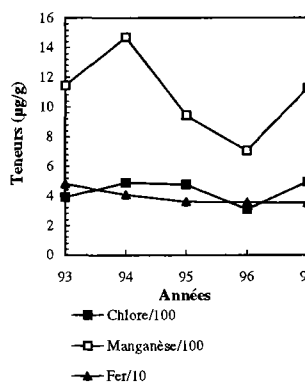
Sol ocre podzolique

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire^{100f (1000a)}



Microéléments

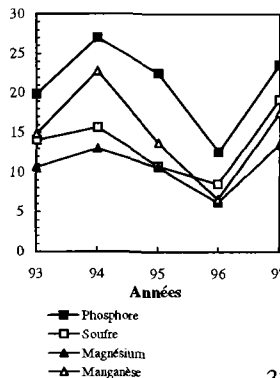
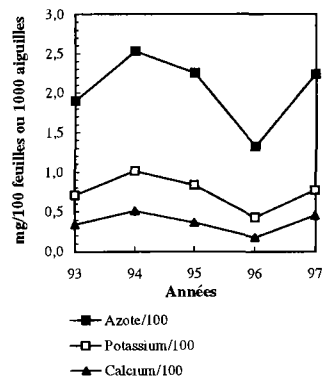


Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

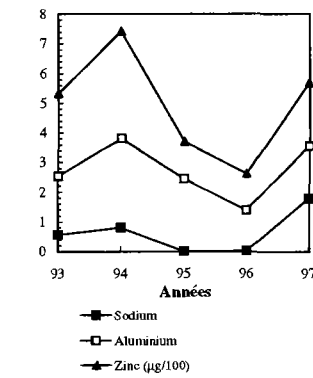
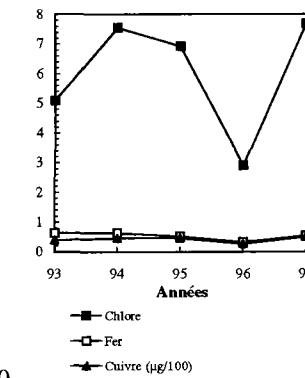
	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	5	54	16	20	22	16	22	59	22	60	17	35
Interannuel 93-97 (n=5)	5	8	17	12	18	10	13	23	5	23	99	17	18

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}

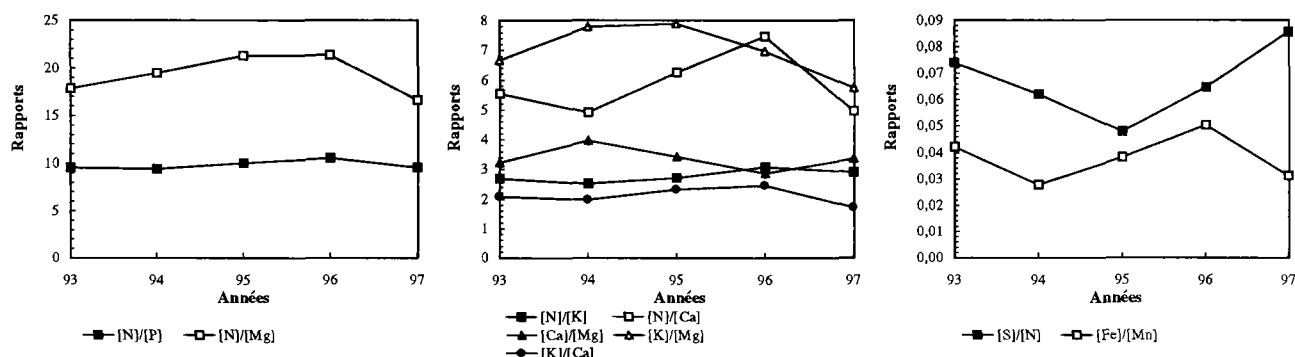
Macroéléments



Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		N	P, K, Mg	Ca
Microéléments :		Fe, Cu, Zn	Mn		Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote (entre le seuil indicatif de carence et critique) en phosphore, en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont très fortes dans les couches minérales du sol tandis que les teneurs en Ca, Mg, K échangeables sont très faibles. L'accroissement en surface terrière est assez faible (0,67 m²/ha/an) pour ce peuplement qui est le plus jeune peuplement de pin sylvestre du réseau (39 ans à 1,30 en 1994). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 12 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs foliaires entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale du Gavre (P. 90)

Commune de Le Gavre (Loire Atlantique)

Latitude: 47°32'24" N

Longitude: 1°48'05" W

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

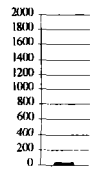
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 56 ± 3

Ho en 1995 (m) : 19,9 ± 1,5

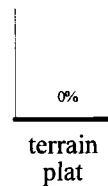
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.98



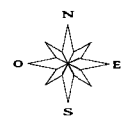
Altitude



Pente

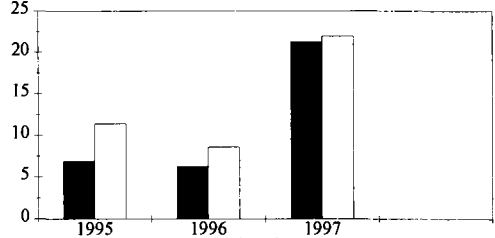


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

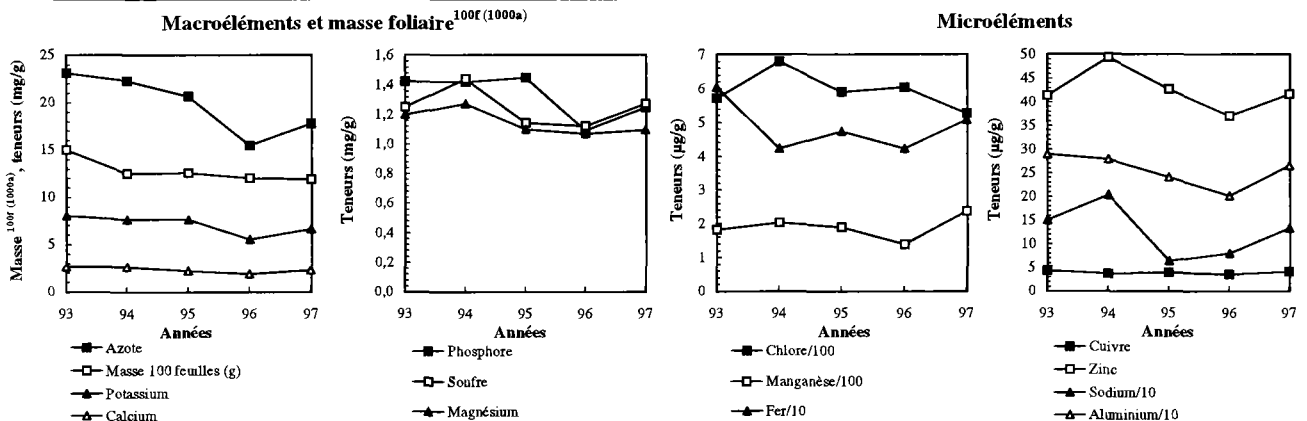


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Pseudogley podzolique

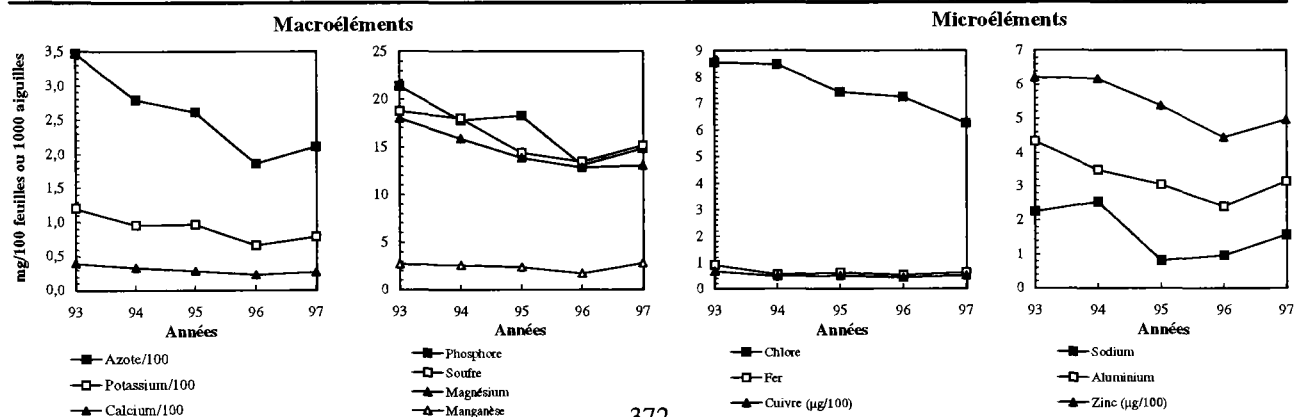
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f} (1000a)



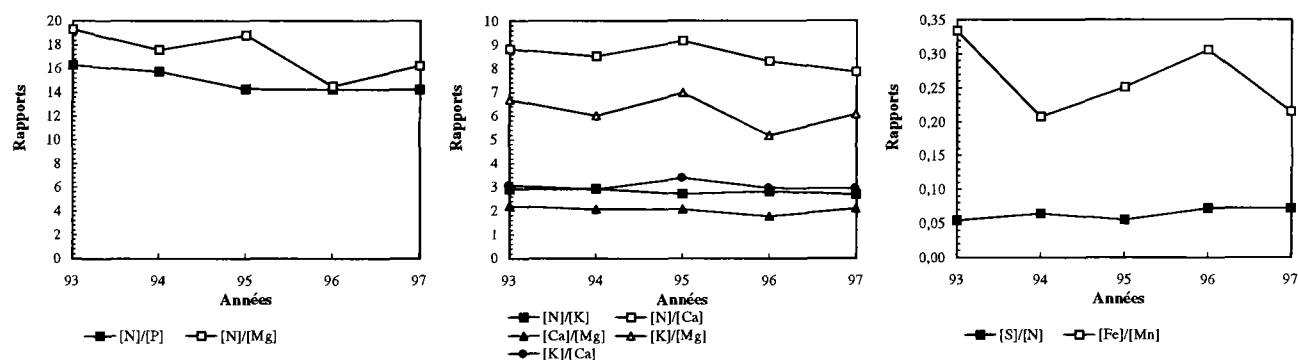
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	11	11	13	25	17	34	29	15	18	37	17	34
Interannuel 93-97 (n=5)	14	10	9	13	12	7	14	17	7	9	40	8	12

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f} (1000a)



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, P, Ca, Mg, K			P	K	Ca, Mg, N, S
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu		Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en magnésium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer), Ca et Mg sont moyennes dans les couches minérales du sol tandis que les teneurs en potassium échangeables sont faibles. Le rapport S/N est faible et le rapport N/P est fort (teneur foliaire en phosphore faible). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,98 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %) en 1995 et 1996 mais augmentent en 1997 (environ 25 %). Aucune tendance claire n'est visible pour les teneurs foliaires entre 1993 et 1997.

Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 96-97 (52 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Orléans (P. 255)

Commune de Les Bordes (Loiret)

Latitude: 47°49'12" N

Longitude: 2°26'04" E

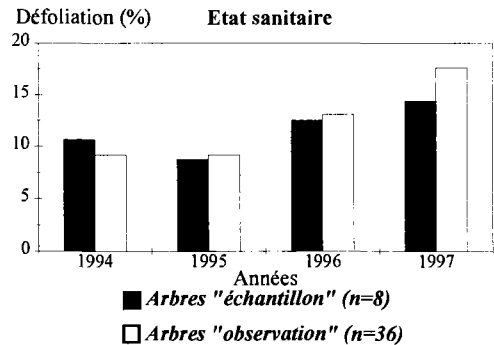
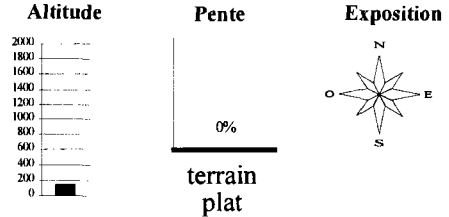
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 54 ± 3

Ho en 1995 (m) : 20,7 ± 0,9

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.09

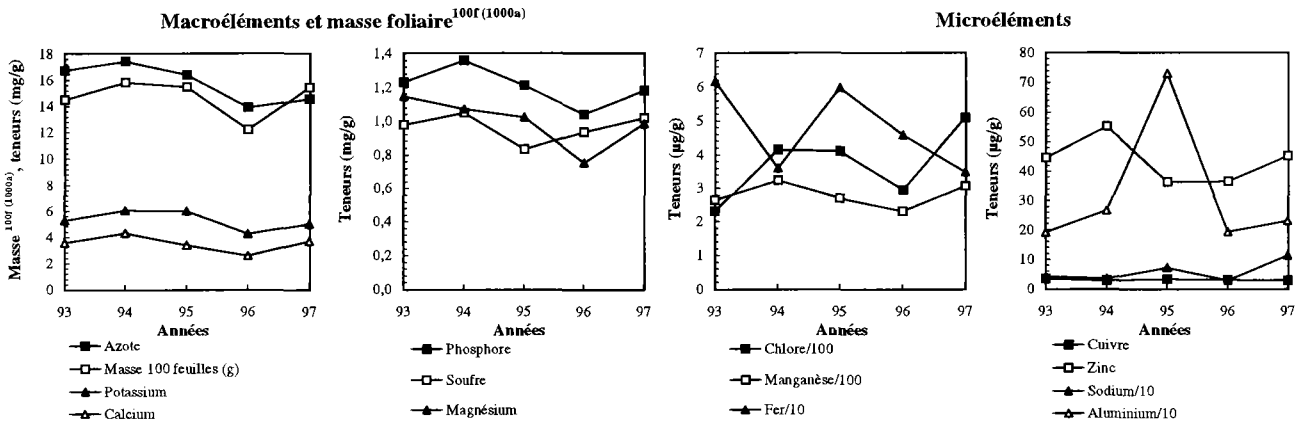


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Pseudogley primaire

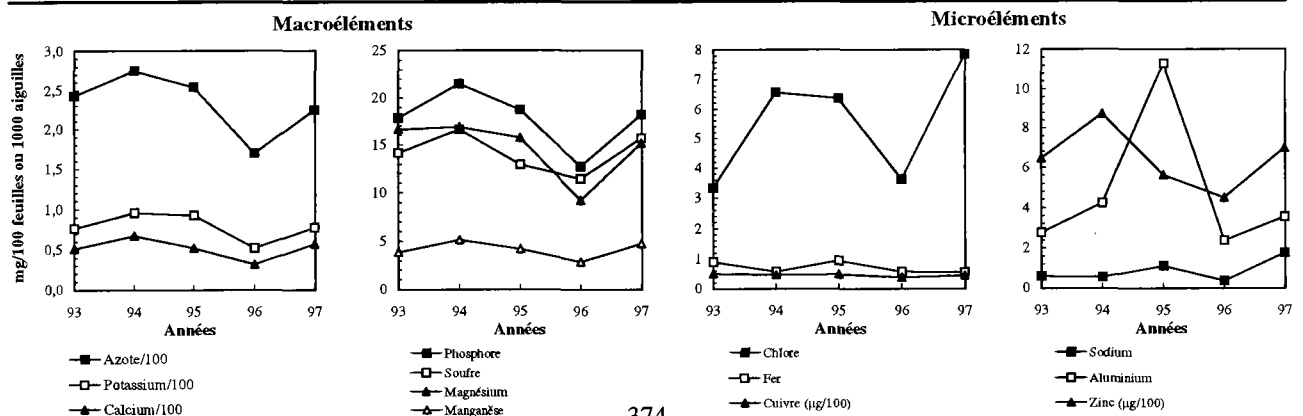
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



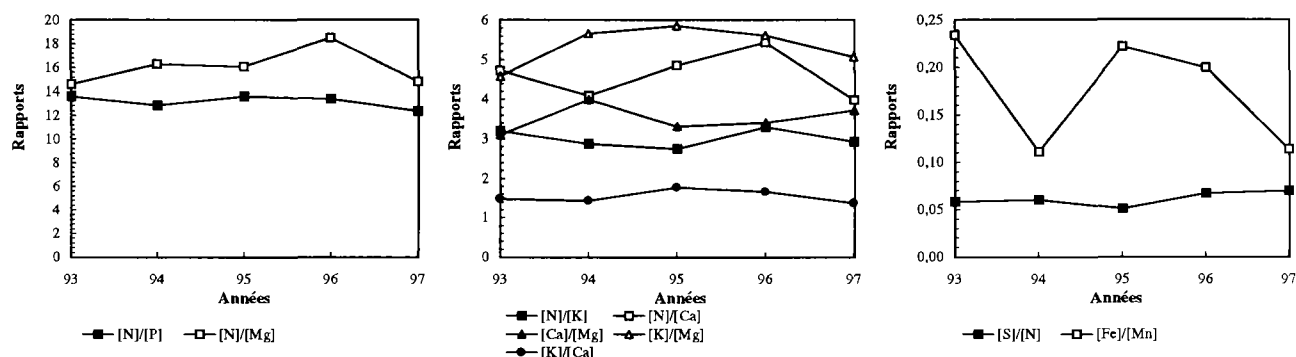
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	11	9	15	20	15	31	22	20	14	66	21	28	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	9	8	13	16	13	24	12	7	16	54	26	64	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		P, S	K, Mg	Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer), Ca et Mg sont moyennes dans les couches minérales du sol tandis que les teneurs en potassium échangeables sont faibles. Le rapport S/N est faible et le rapport N/P est fort (teneur foliaire en phosphore faible). L'accroissement en surface terrière est élevé (1,09 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 20 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires, on note d'autre part que la teneur foliaire en aluminium est très forte en 1995. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 95-96 (50 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Andaines (P. 296)

Commune de Champsecret (Orne)

Latitude: 48°36'54" N

Longitude: 0°30'25" W

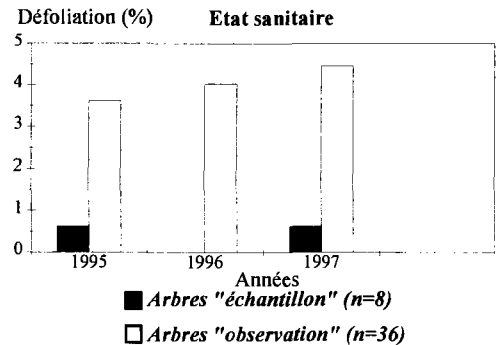
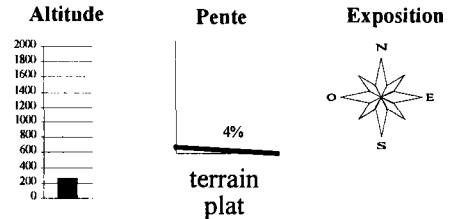
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis en potets

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 43 ± 2

Ho en 1995 (m) : 22,6 ± 1,6

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 2.77

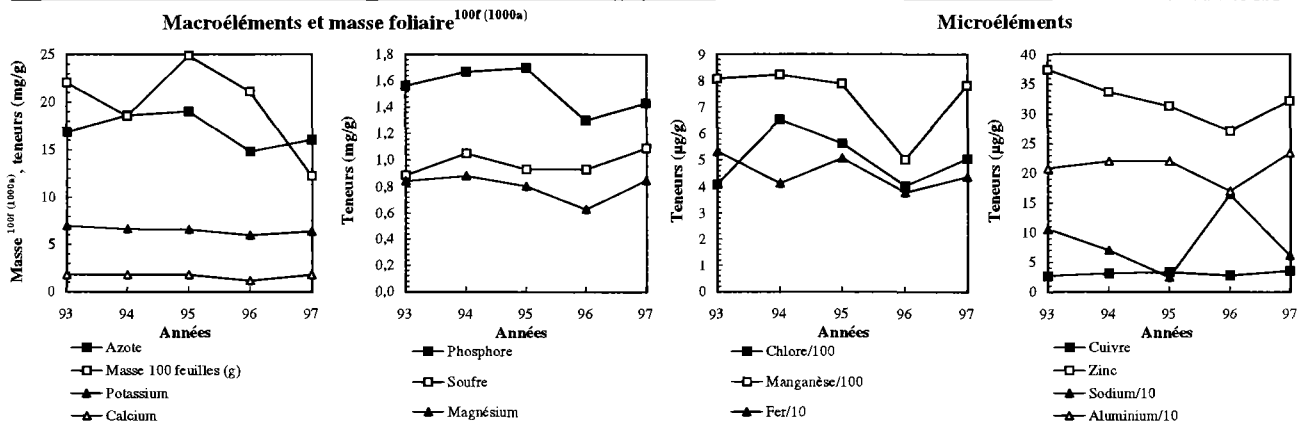


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Sol brun faiblement lessivé acide

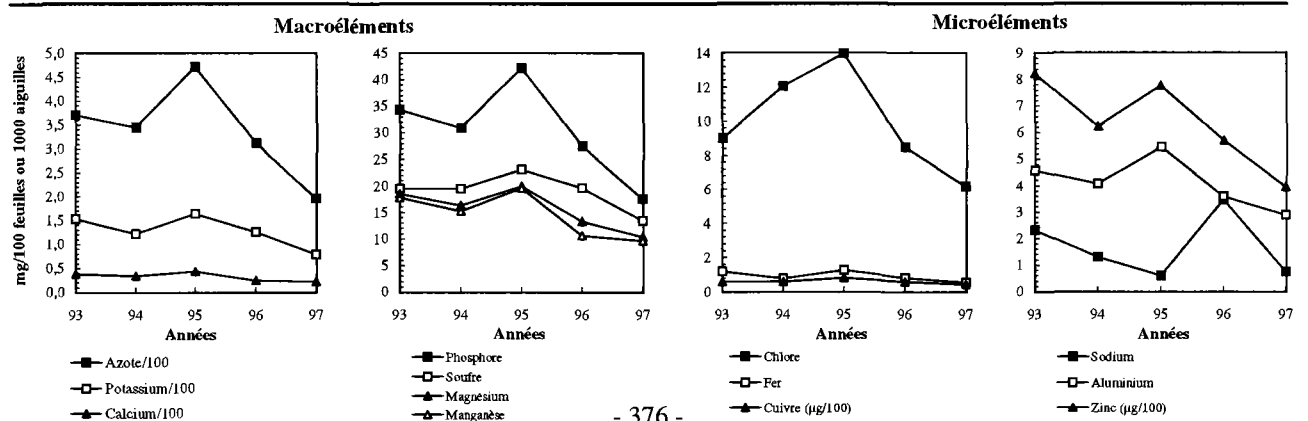
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



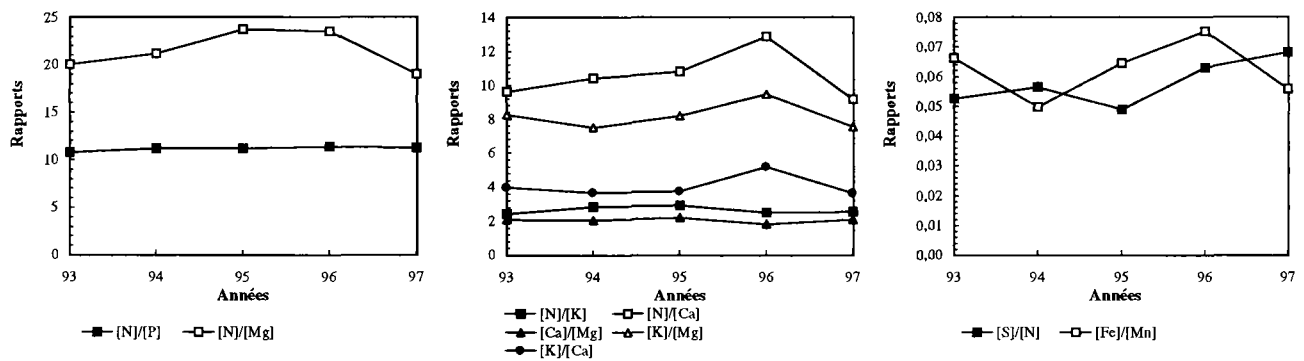
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	4	6	7	15	25	24	31	24	27	16	51	12	19
Interannuel 93-97 (n=5)	9	10	8	5	15	11	13	16	10	10	56	19	10

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	P, Ca, Mg, K	N	S	P, K, Ca, Mg	N
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn		Cu		Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en phosphore, en potassium, en calcium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) et Ca sont moyennes dans les couches minérales du sol tandis que les teneurs en potassium et en magnésium échangeable sont faibles. L'accroissement en surface terrière est élevé (2,77 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont négligeables (< 5 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1994 et 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses ces années là.

Placette de niveau 1

Forêt Sectionale de la Bosdonie et autres (P. 2 et 3)

Commune de Arlanc (Puy de Dôme)

Latitude: 45°24'21" N

Longitude: 3°41'44" E

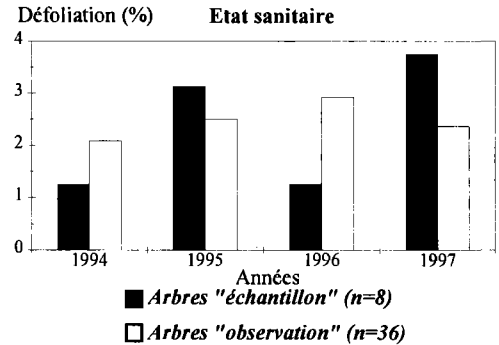
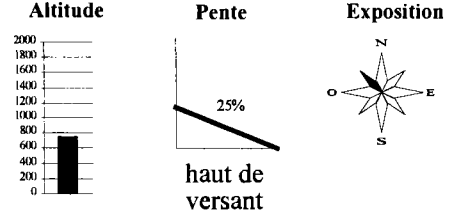
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Semis

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 94 ± 15

Ho en 1995 (m) : 24,6 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.79

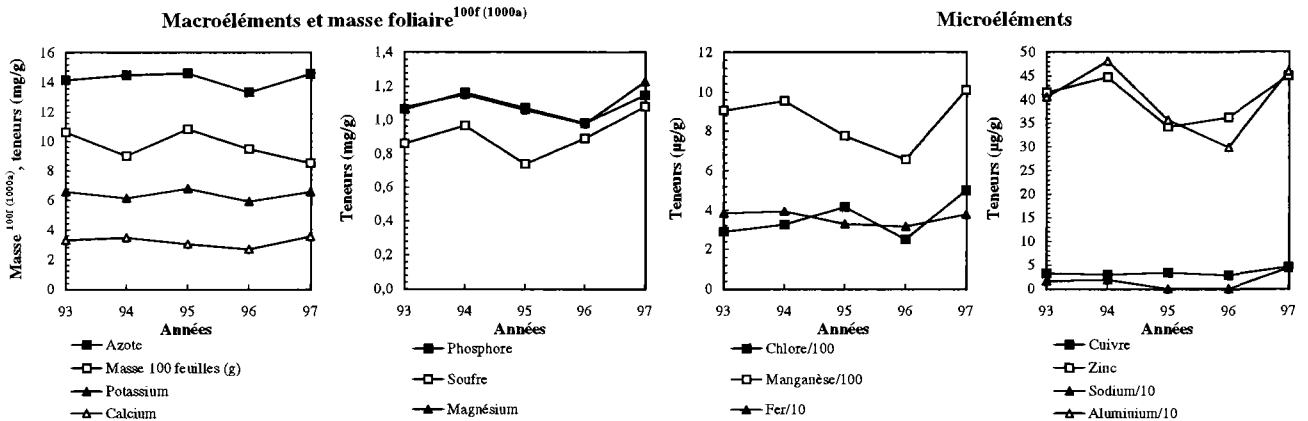


Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

Humus : Dysmuil

Type de sol : Sol brun acide

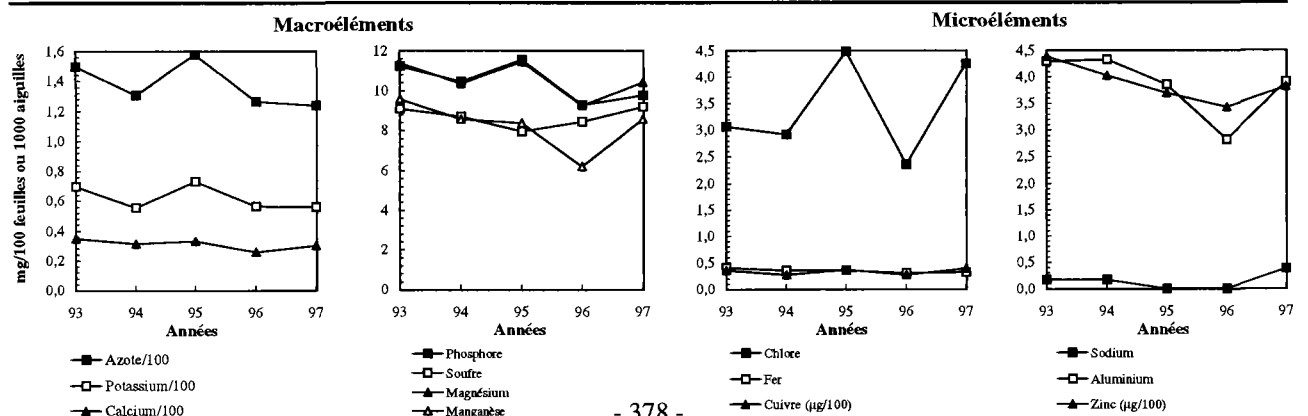
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



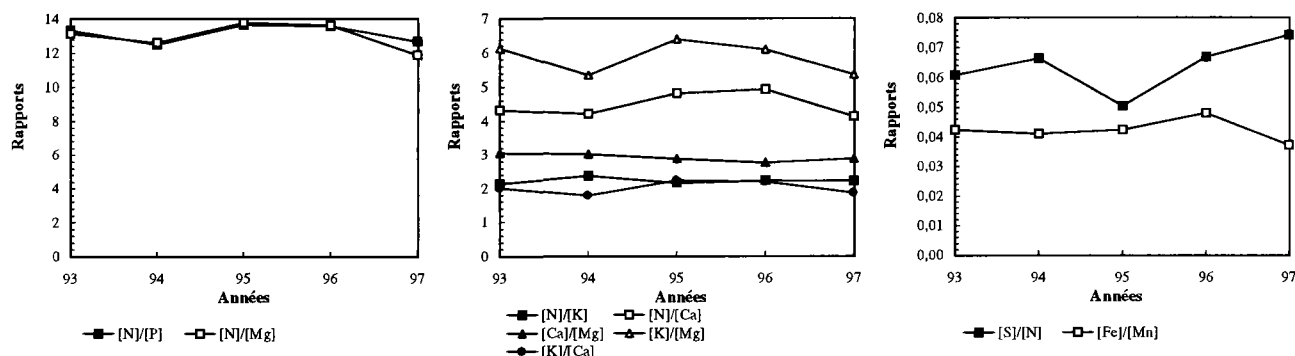
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	9	7	15	15	10	13	23	66	11	67	15	18
Interannuel 93-97 (n=5)	3	6	13	5	9	8	9	15	18	11	102	26	17

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		N, P, S	K	Ca, Mg
Microéléments :		Fe, Cu, Zn	Mn		Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en magnésium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont très faibles dans les couches minérales du sol 10-40 cm, ces teneurs sont faibles pour le potassium échangeable dans les mêmes couches et moyennes pour l'azote, le magnésium et le calcium. Le rapport S/N est faible, et le rapport N/P est élevé. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,79 m²/ha/an) pour le peuplement de pin sylvestre le plus âgé du réseau (94 ans à 1,30 m en 1994). Les pourcentages de défoliation sont négligeables (< 5 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1995, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 3

Forêt Indivise de Haguenau (P. 1094)

Commune de Haguenau (Bas Rhin)

Latitude: 48°51'01" N

Longitude: 7°42'39" E

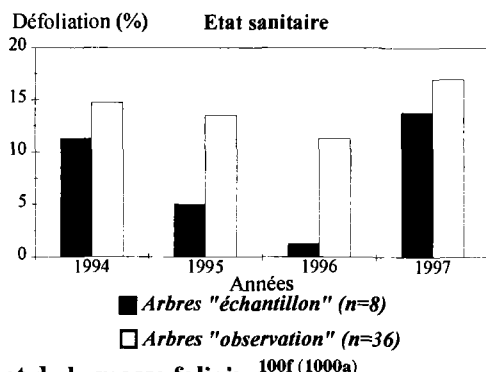
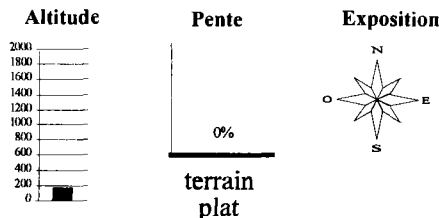
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation et régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 65 ± 6

Ho en 1995 (m) : 24,6 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.58



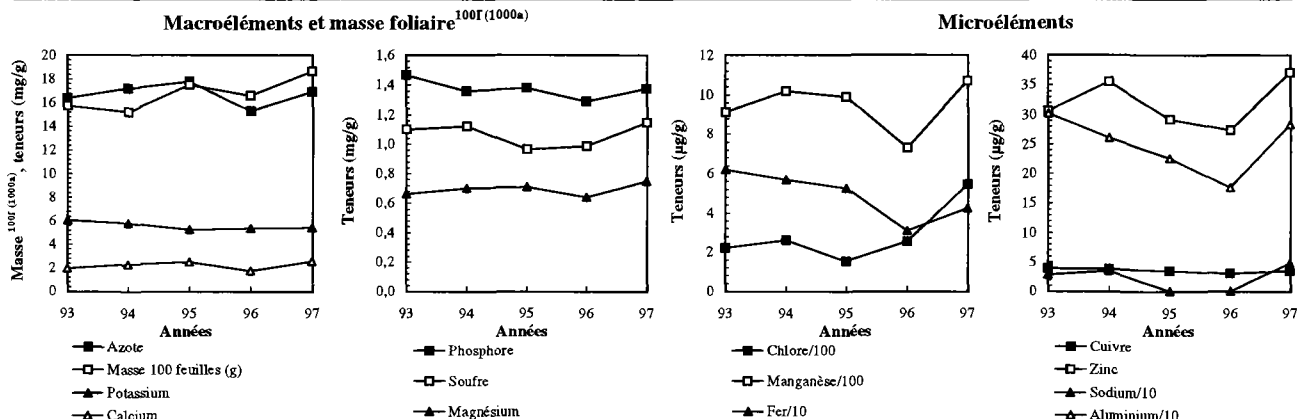
Végétation : *Deschampsia flexuosae-Fagetum*

Humus : Moder - Dysmoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

Sol ocre podzolique sur paléosol

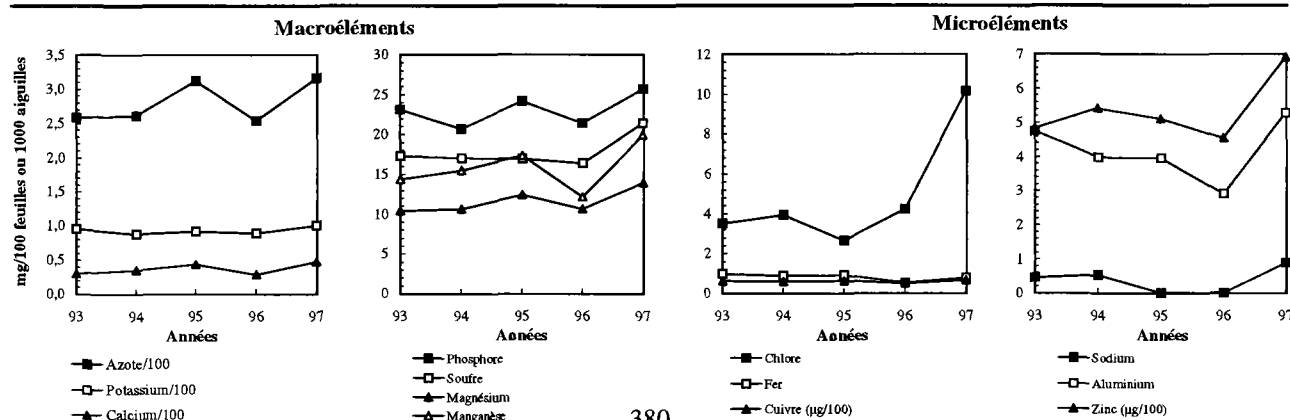
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



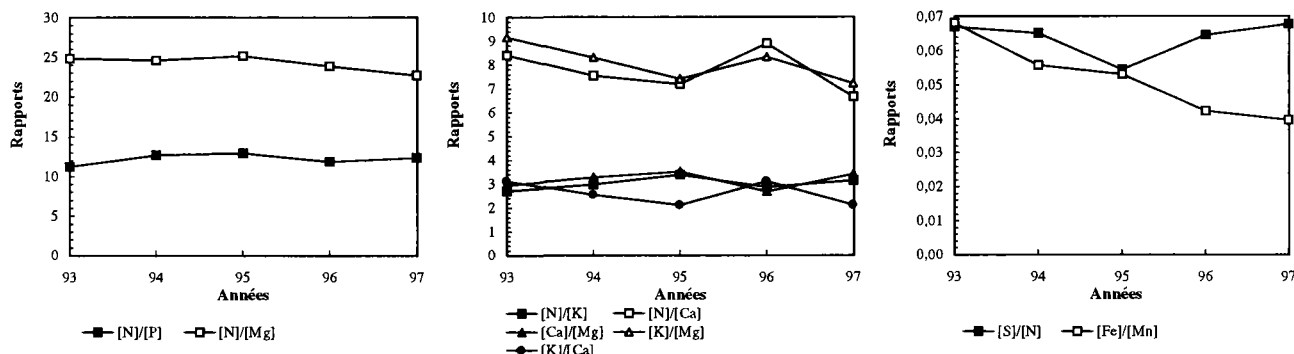
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	13	10	13	31	19	34	22	10	21	107	21	19
Interannuel 93-97 (n=5)	5	4	7	5	14	5	23	13	9	12	86	47	18

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		P, Mg	K	Ca
Microéléments :		Fe, Cu, Zn	Mn		Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyr) sont moyennes dans les couches minérales du sol tandis que ces teneurs sont très faibles pour le potassium, le magnésium et le calcium échangeable. Le rapport S/N est faible, et le rapport N/Mg est élevé (teneurs faibles en magnésium). L'accroissement en surface terrière est moyen (0,58 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont assez faibles (< 20 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale d'Ingwiller (P. 139)

Commune de Wimmenau (Bas Rhin)

Latitude: 48°55'53" N

Longitude: 7°26'40" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

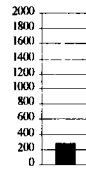
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 64 ± 1

Ho en 1995 (m) : 25,9 ± 1,9

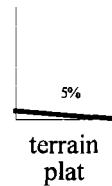
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.47



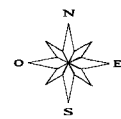
Altitude



Pente

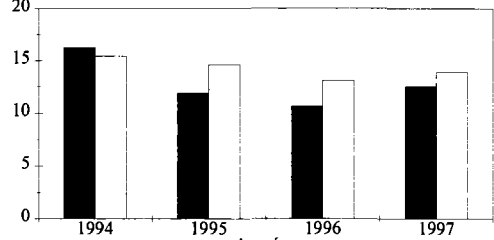


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



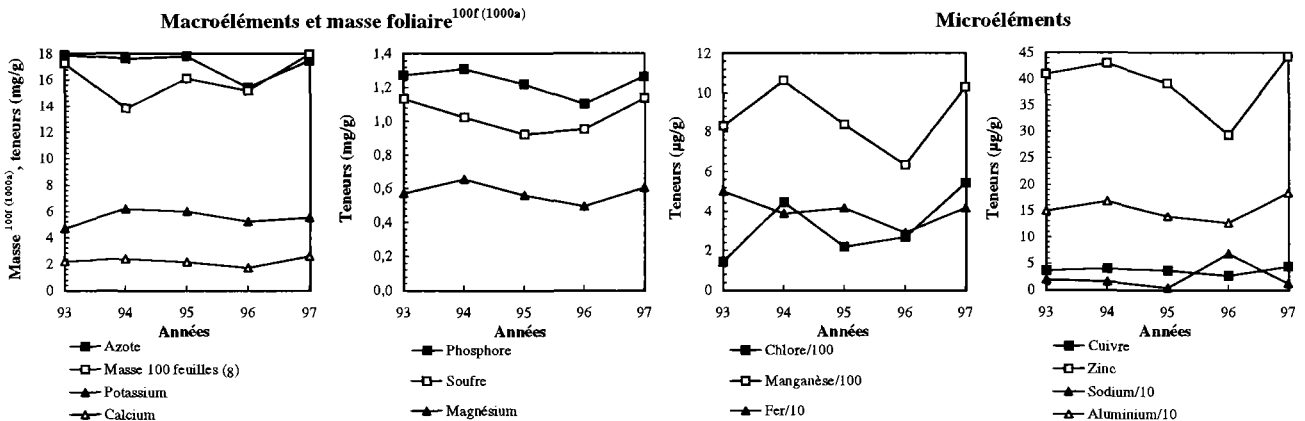
■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Deschampsia flexuosae-Fagetum*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

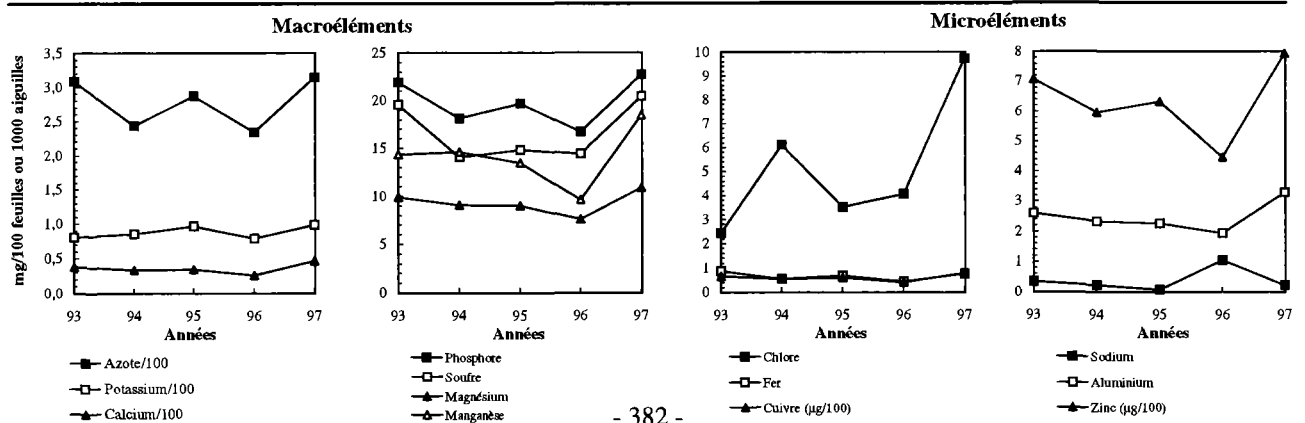
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



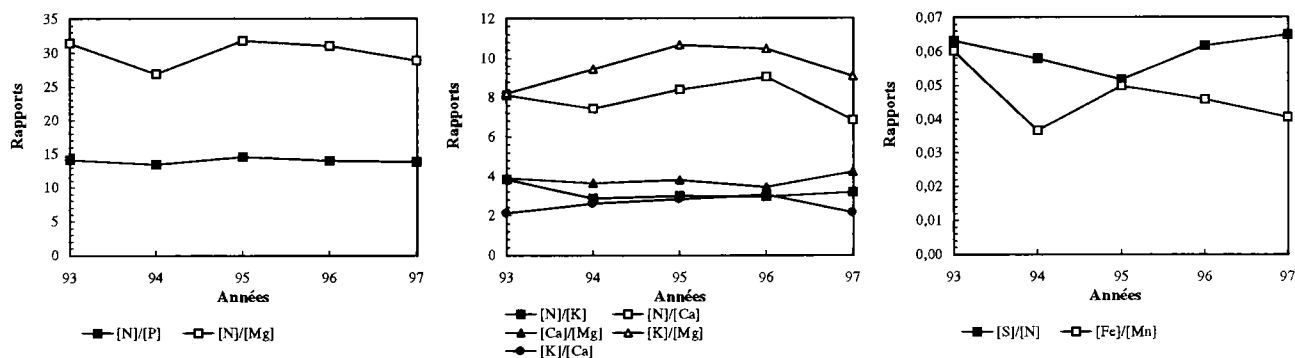
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	9	9	9	16	12	47	18	30	12	106	23	33
Interannuel 93-97 (n=5)	5	6	9	10	13	9	17	18	15	14	94	46	13

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S, Mg		P, Ca, K	P, Mg		K, Ca
			N			N, S
Microéléments :	Fe, Cu		Mn	Cu		Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en magnésium (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes dans les couches minérales du sol tandis que ces teneurs sont très faibles pour le potassium, le magnésium et le calcium échangeable. Les rapports N/P et surtout N/Mg sont élevés (teneurs faibles en magnésium et en phosphore) et le rapport S/N est faible. L'accroissement en surface terrière est assez faible (0,47 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation restent inférieurs à 20 %. Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale de Brotonne (P. 167)

Commune de La Mailleraye sur Seine (Seine Maritime)

Latitude: 49°27'14" N

Longitude: 0°44'53" E

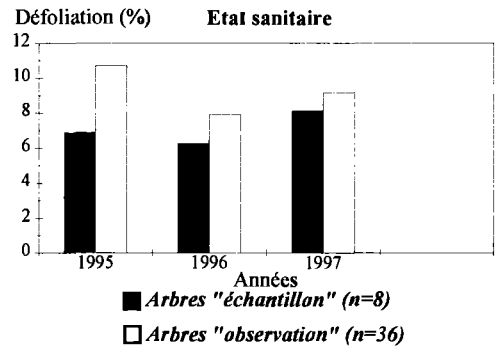
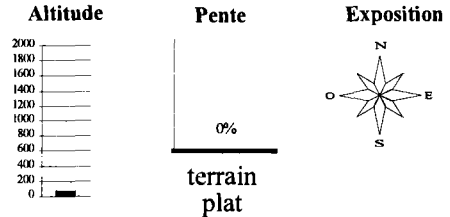
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 43 ± 3

Ho en 1995 (m) : 24,2 ± 1,1

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 2.43

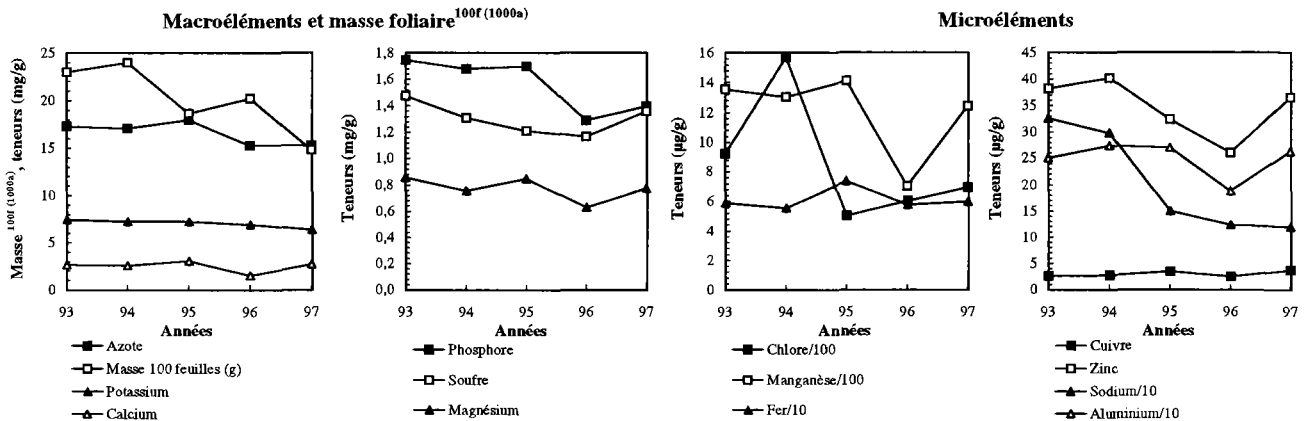


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Sol brun lessivé à micropodzol

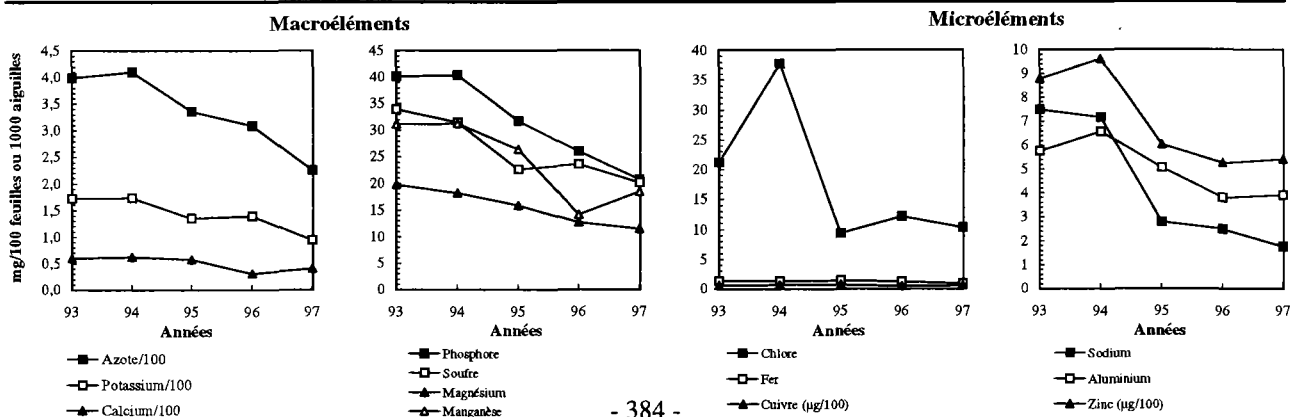
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



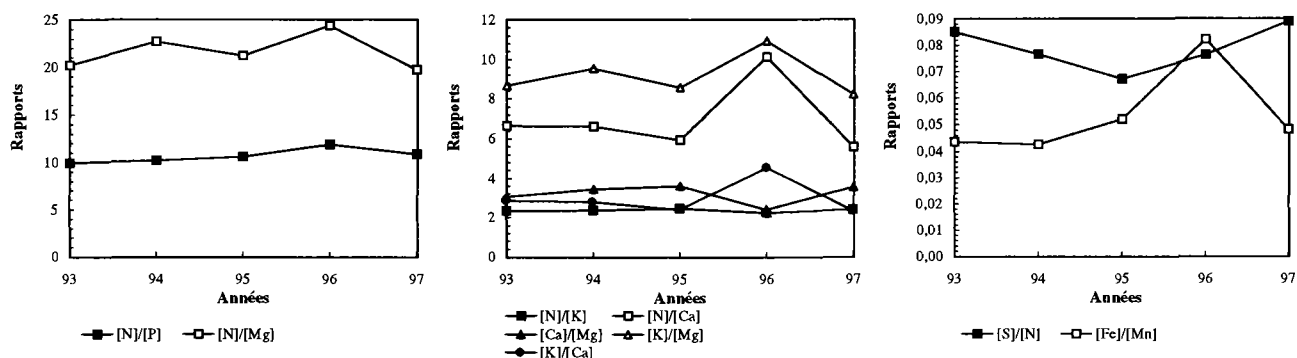
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	9	12	14	28	23	64	31	13	19	31	20	36
Interannuel 93-97 (n=5)	7	12	8	5	21	11	11	21	16	15	44	45	13

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	N, S, P, Ca, Mg, K			P, K, Mg, Ca, N, S		
Microéléments :	Fe, Cu, Zn		Mn	Cu, Mn, Zn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en potassium, en phosphore, en magnésium et en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et des teneurs au delà du seuil indicatif optimum pour Ca, Mn et Zn. Les teneurs en phosphore (Dyer), en potassium, en magnésium et en calcium échangeable sont faibles dans les couches minérales du sol. L'accroissement en surface terrière est fort (2,43 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 12 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires au cours du temps n'est visible actuellement.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Rambouillet (P. 11.07.1)

Commune de Poigny la Forêt (Yvelines)

Latitude: 48°41'37" N

Longitude: 1°43'58" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

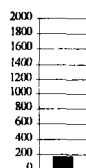
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 43 ± 2

Ho en 1995 (m) : 21,4 ± 1,2

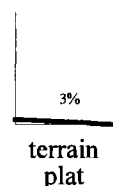
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.96



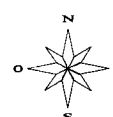
Altitude



Pente

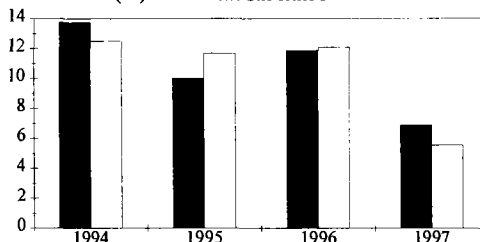


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

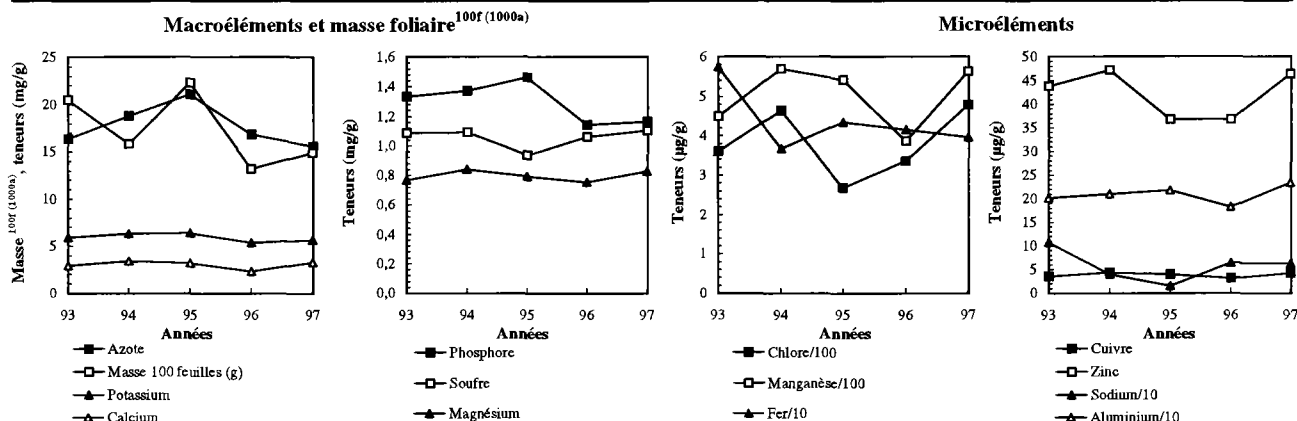


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Sol ocre podzolique à pseudogley

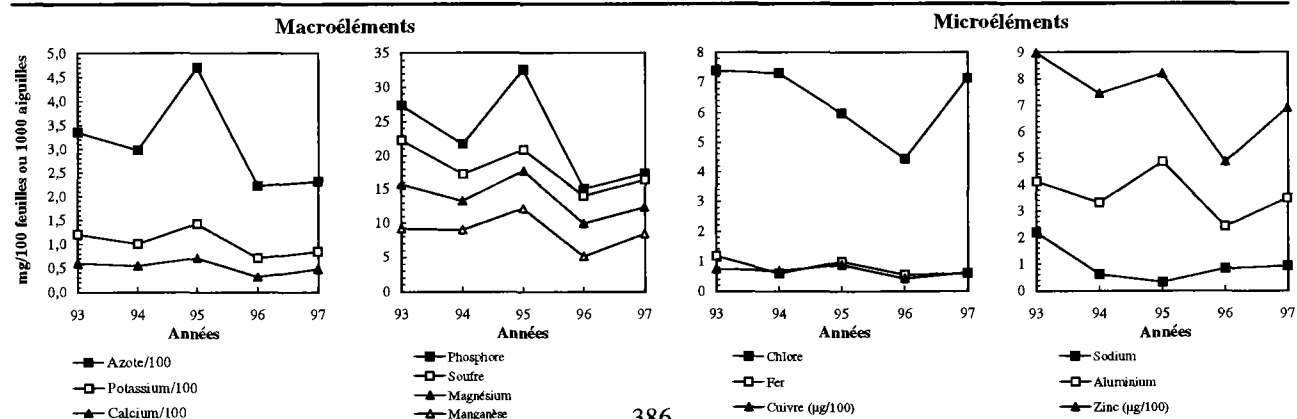
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



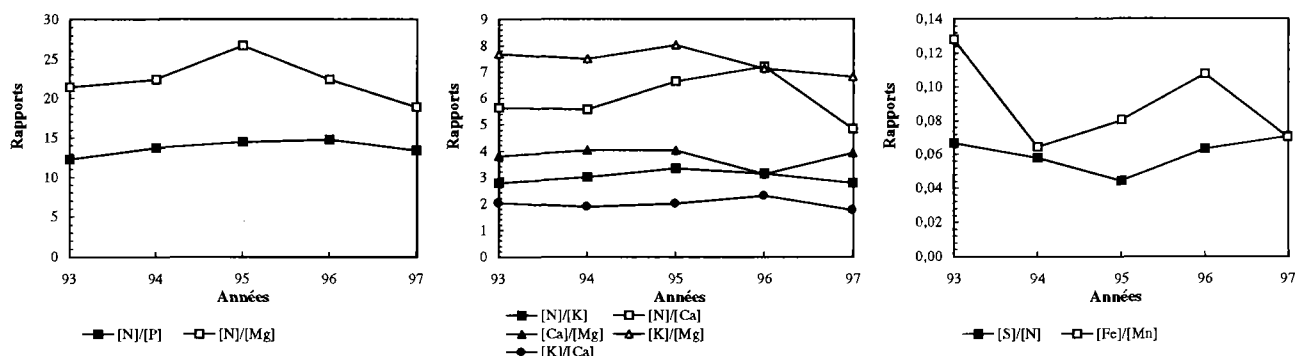
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	10	11	16	24	18	27	33	12	18	41	21	29
Interannuel 93-97 (n=5)	11	9	6	7	12	4	17	14	11	11	54	21	8

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	P, Ca, Mg, K	N	P	K, Mg	Ca
					N, S	
Microéléments :	Fe, Mn, Cu, Zn			Cu		Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont très faibles dans les couches minérales du sol (entre 0,0 et 1,2 mg/Kg) ainsi que les teneurs en potassium, magnésium et calcium échangeable. Le rapport N/P est élevé (faible teneur foliaire en phosphore) et le rapport S/N est faible. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,96 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %) et tendent à diminuer. Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 1

Forêt Communale de Bruyères (P. 44)

Commune de Bruyères (Vosges)

Latitude: 48°13'17" N

Longitude: 6°41'45" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

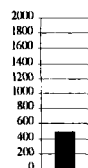
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 66 ± 4

Ho en 1995 (m) : 24,4 ± 2,0

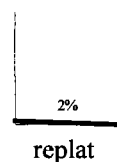
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.33



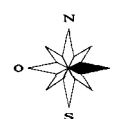
Altitude



Pente

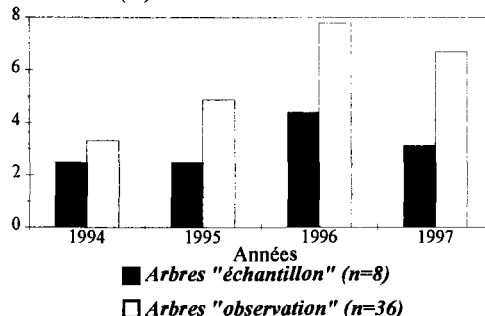


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

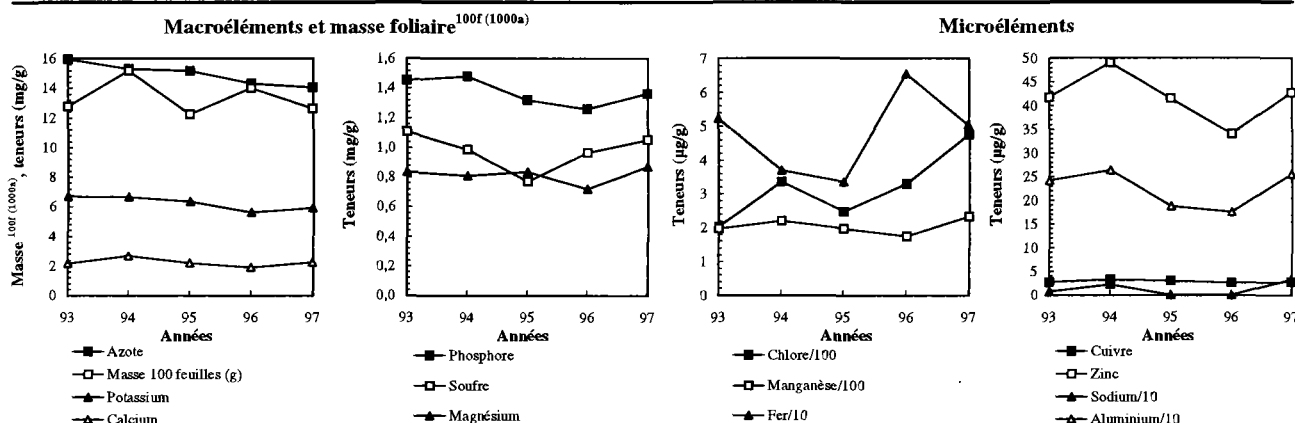


Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Dysmoder

Type de sol : Sol ocre podzolique

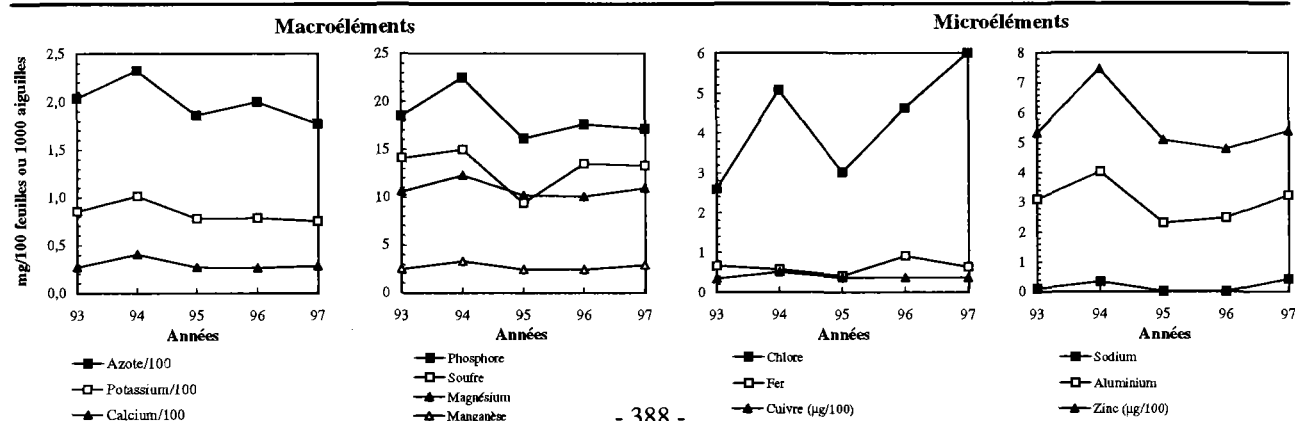
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



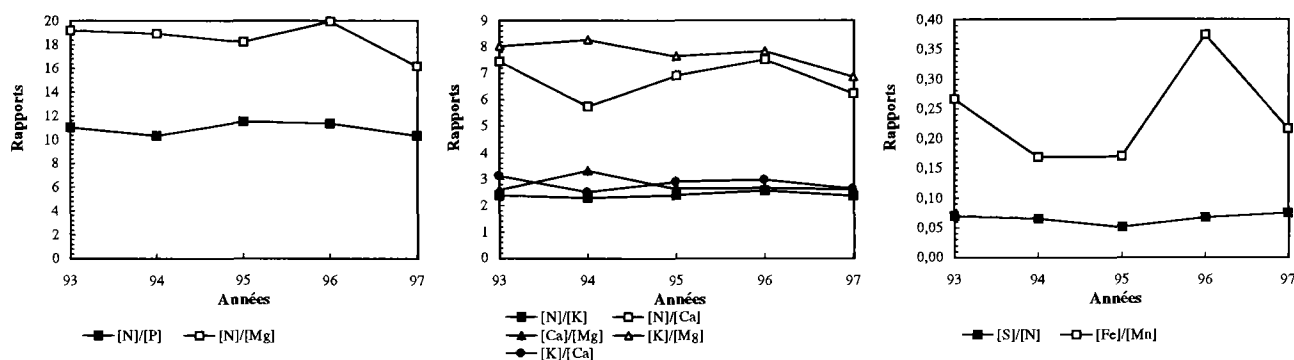
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	7	11	9	17	15	82	22	16	13	80	16	27
Interannuel 93-97 (n=5)	5	6	12	7	11	6	24	10	9	11	106	29	16

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		N, P, S	K, Mg	Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes dans les couches minérales du sol et les teneurs en potassium, magnésium et calcium échangeable sont très faibles. L'accroissement en surface terrière est assez fort (1,33 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 8 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1996, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Pontigny (P. 201)

Commune de Vergigny (Yonne)

Latitude: 47°56'57" N

Longitude: 3°43'05" E

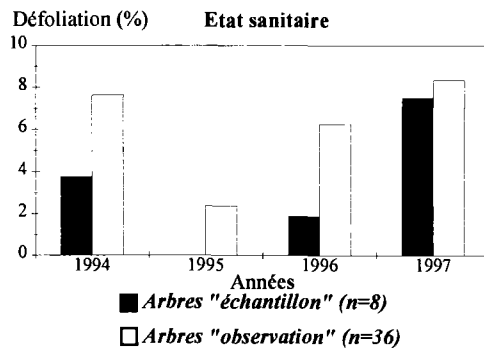
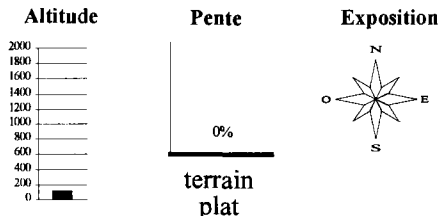
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation et complément en régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 58 ± 9

Ho en 1995 (m) : 26,9 ± 1,4

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.66



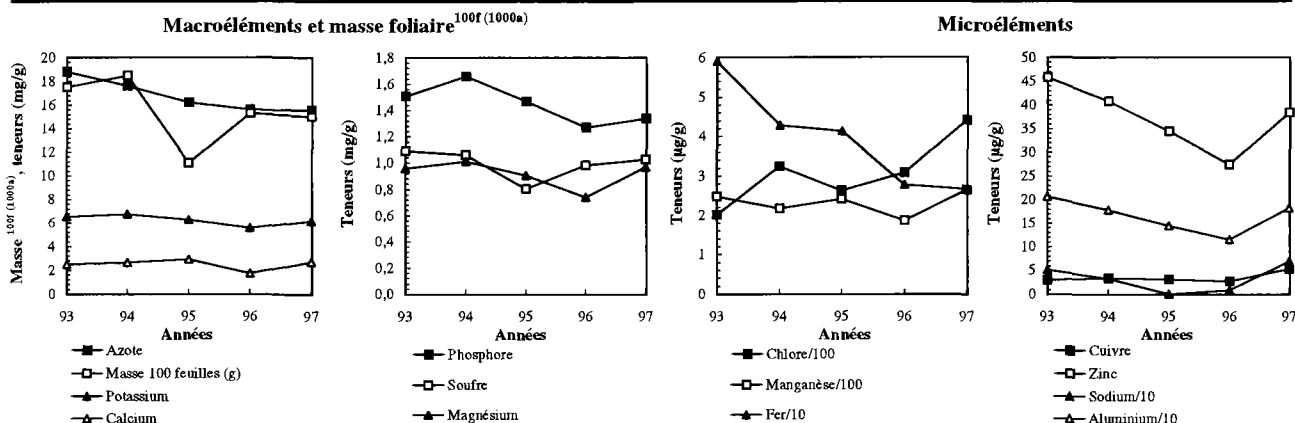
Végétation : *Quercenion robori-petraeae*

Humus : Mor

Type de sol : Sol ocre podzolique à gley profond

à pseudogley

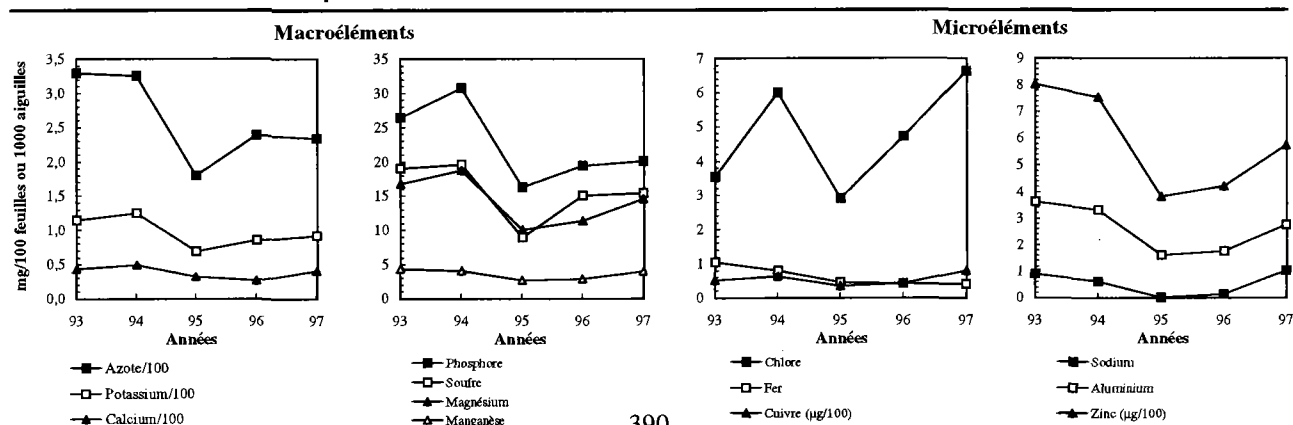
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



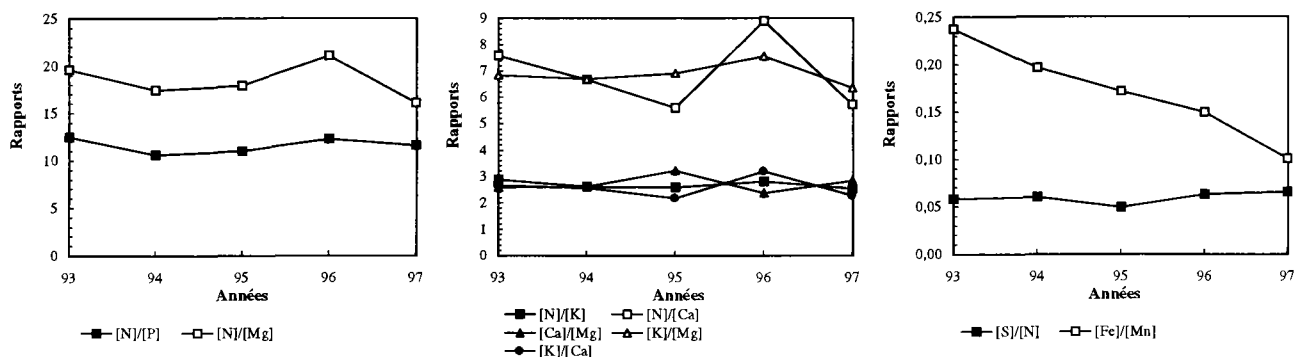
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	7	9	8	17	18	18	20	41	77	10	81	16	30
Interannuel 93-97 (n=5)	8	9	10	6	16	10	30	12	27	16	80	26	19

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	S	N, P, Ca, Mg, K		P, S	K, Mg	Ca
Microéléments :		Fe, Mn, Cu, Zn			Cu	Mn, Zn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	13	1,0	0,7	3,0	1,0	0,4	30		2,5	5
	Critique	15	1,5	1,0	4,0	1,5	0,7		20		
	Optimum		1,8		6,0	2,0	1,0		100	4,0	20
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)	12	1,0	1,1	3,5	1,5	0,6	20	20	2	20
	Borne supérieure (bs)	2,0	17	1,8	10,0	4,0	1,5	200	800	10	70

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en cuivre (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en manganèse et en zinc (supérieur à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes dans les couches minérales du sol et les teneurs en potassium, magnésium et calcium échangeable sont faibles à moyenne selon les couches minérales considérées. Le rapport S/N est faible du fait des teneurs foliaires faibles en soufre. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,66 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Boscodon (P. 16)

Commune de Crots (Hautes Alpes)

Latitude: 44°29'25" N

Longitude: 6°27'33" E

Structure du peuplement : Irrégulière jardinée

Origine : Régénération naturelle

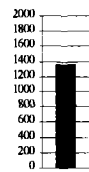
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 99 ± 14

Ho en 1995 (m) : 28,3 ± 2,7

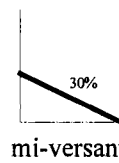
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.68



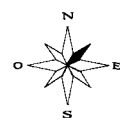
Altitude



Pente

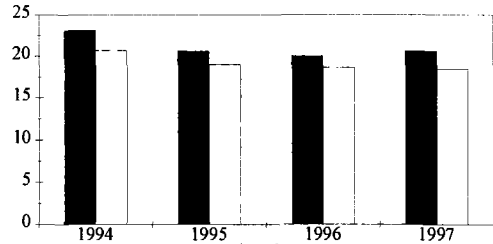


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



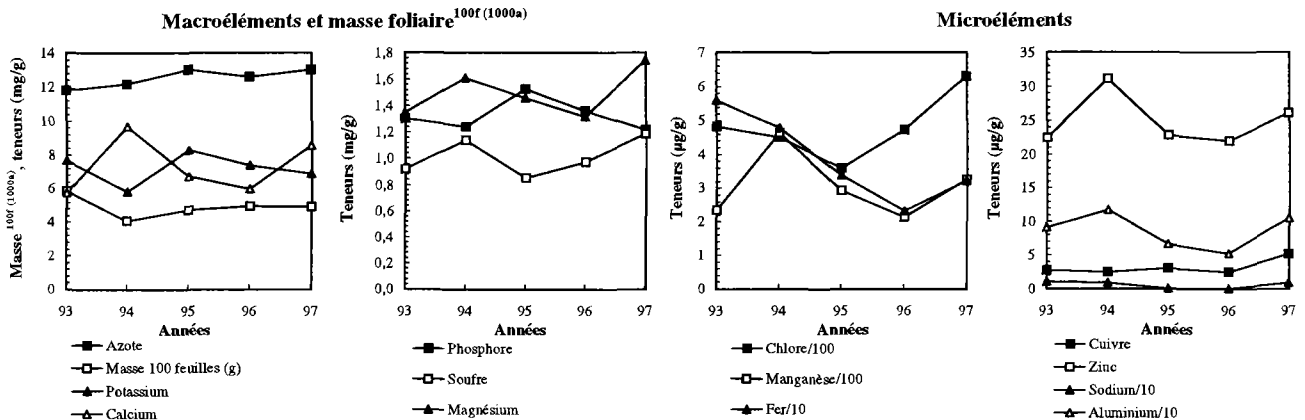
Végétation : *Geranio nodosi-Fagenion sylvaticae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun calcique

Rendzine colluviale

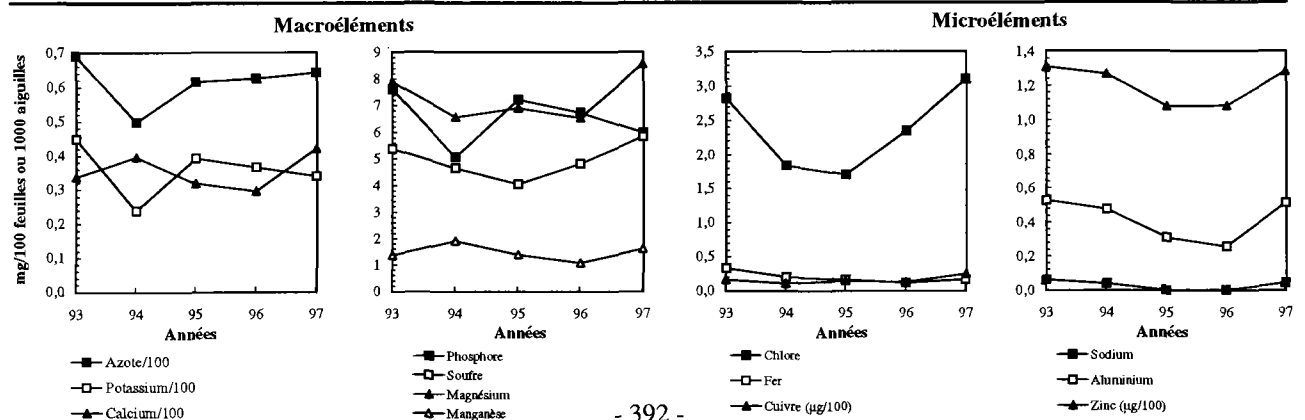
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



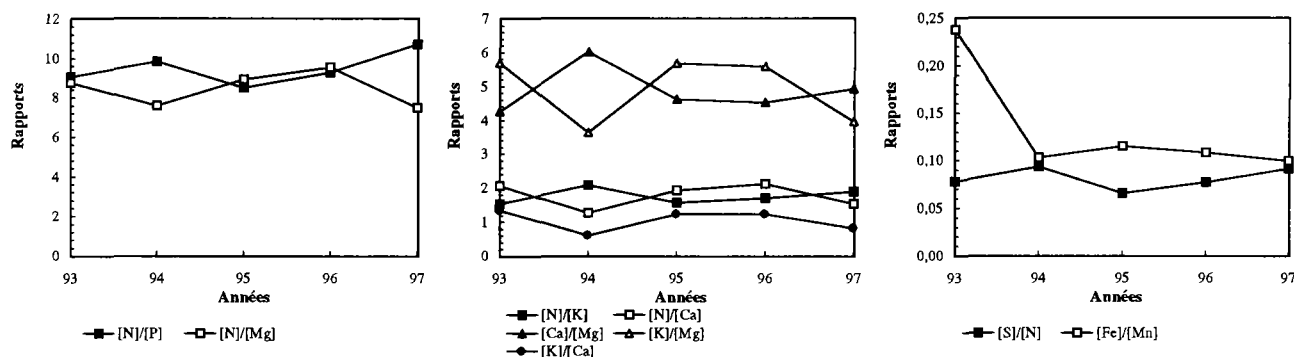
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	12	14	17	8	24	20	37	40	45	21	164	28	26	
Interannuel 93-97 (n=5)	4	8	13	11	21	11	30	29	31	14	83	18	28	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[] [] []			[] [] []		
				N	P, K	Ca, Mg
					S	
Microéléments :						Mn
				Fe		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en phosphore, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en magnésium et en manganèse (supérieur à l'optimum). Les teneurs en éléments dans les couches minérales du sol sont moyennes. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,68 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont compris entre 20 et 25 %. Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lavillatte (P. 4)

Commune de Lavillatte (Ardèche)

Latitude: 44°42'36" N

Longitude: 3°57'57" E

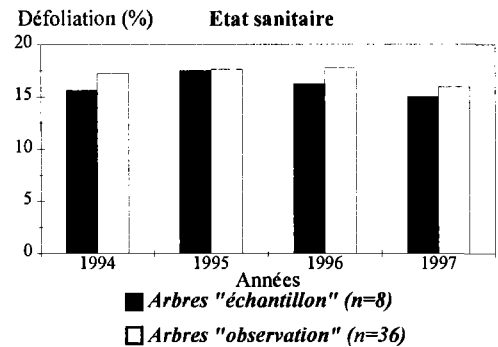
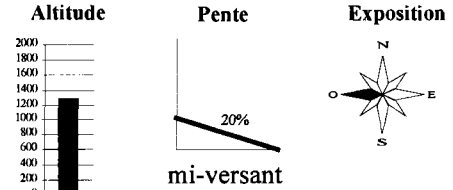
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation - Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 80 ± 3

Ho en 1995 (m) : 25,7 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.48

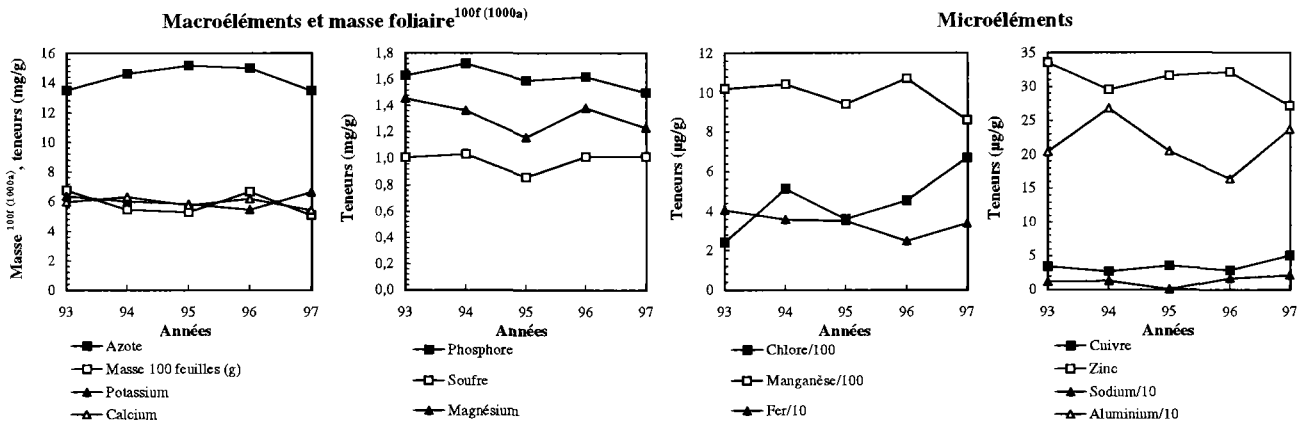


Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

Humus : Moder - Dysmull

Type de sol : Sol ocre podzolique humifère

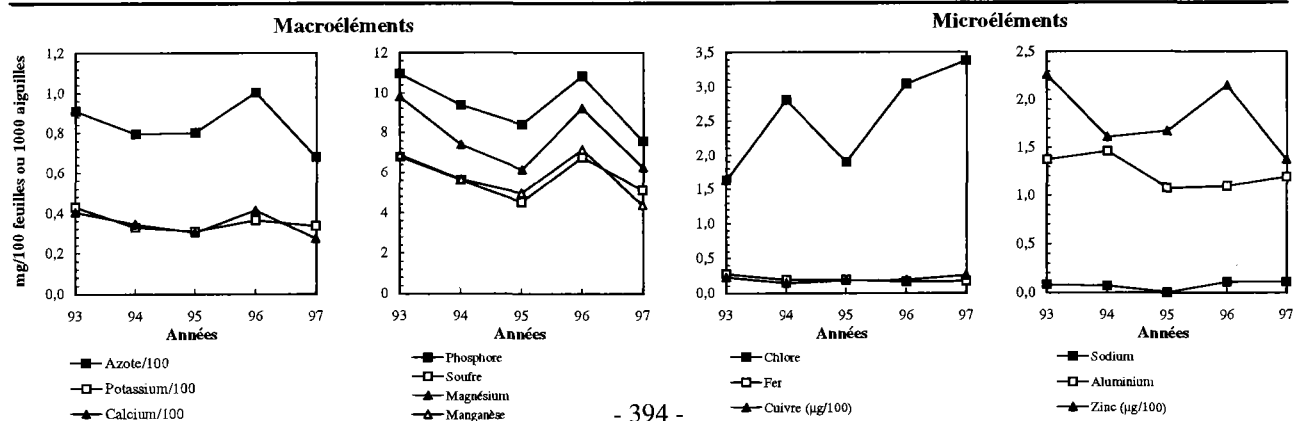
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



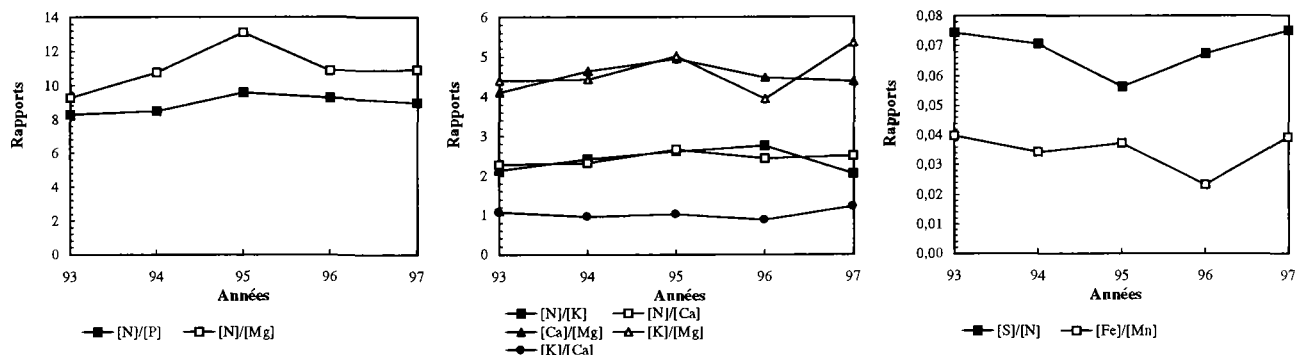
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intracette en 1997 (n=8)	9	14	9	12	18	16	90	24	58	23	137	23	24
Interannuel 93-97 (n=5)	5	4	7	7	5	8	15	8	24	7	57	32	16

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Classes	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
	I	II	III	Carence	Critique	Optimal
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.					
Macroéléments :	[Bar chart showing concentration ranges for N, P, K, Ca, Mg]			S	N, P, K, Mg	Ca
Microéléments :				Fe		Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en N, P, K, Mg et Fe (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, et en manganèse (supérieur à l'optimum). Les teneurs en potassium et en magnésium sont faibles dans la couche minérale 20-40 cm, les teneurs en calcium sont moyennes et les teneurs en phosphore (Dyer) sont moyennes à fortes selon les couches minérales du sol. L'accroissement en surface terrière est faible (0,48 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (entre 15 et 20 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires. Un arbre "échantillon" difficilement accessible a été remplacé en 1995.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Massat (P. 15)

Commune de Massat (Ariège)

Latitude: 42°51'52" N

Longitude: 1°20'43" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle - Regarnis

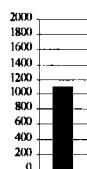
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 168 ± 4

Ho en 1995 (m) : 25,1 ± 3,0

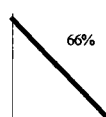
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.22



Altitude

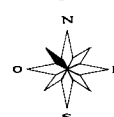


Pente



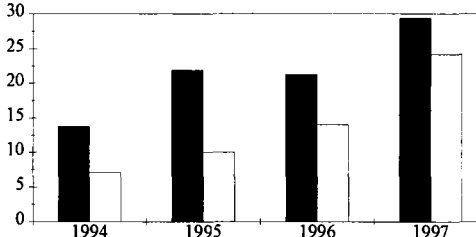
bas de versant

Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

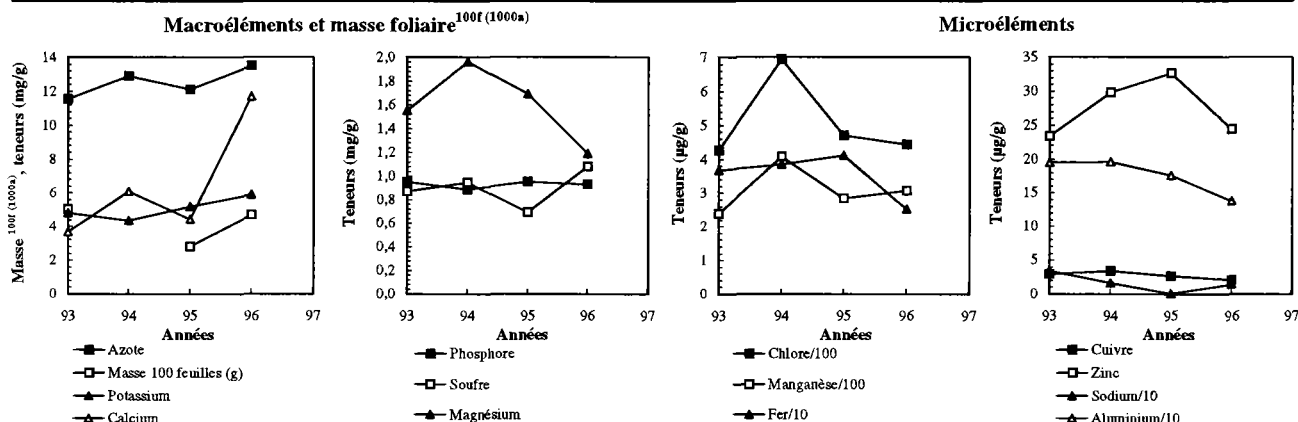


Végétation : *Luzulo sp. pl. Fagion sylvaticae*

Humus : Moder

Type de sol : Sol ocre podzolique

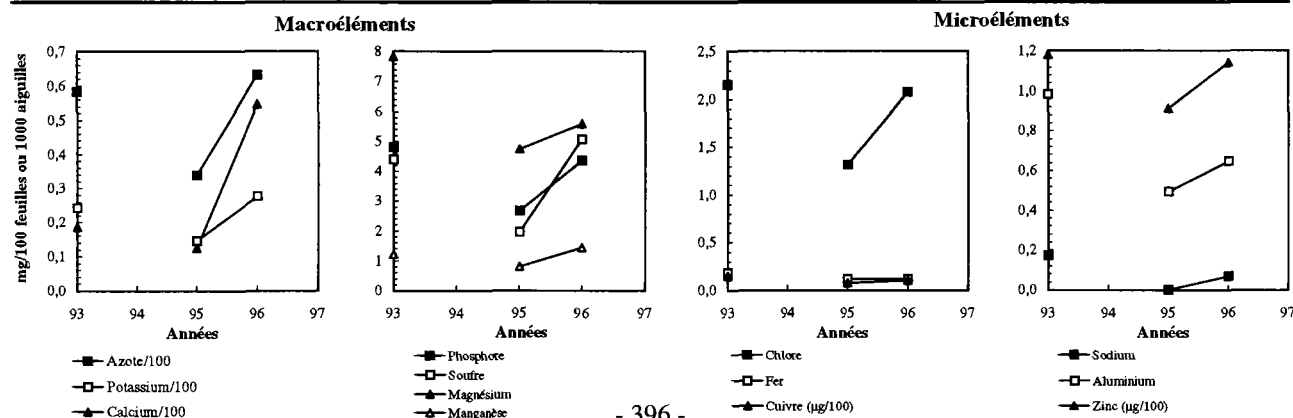
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



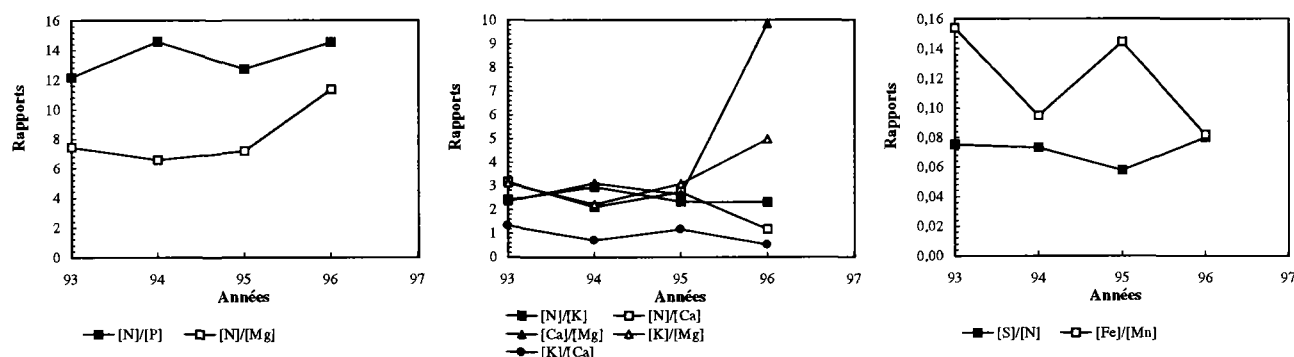
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments					Microéléments							
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)													
Interannuel 93-97 (n=5)	6	3	16	11	49	17	17	20	16	14	74	21	13

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Symp}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Symp}		
Classes	I	II	III	Carence	Critique	Optimal
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.			
Macroéléments :	[Diagram showing three boxes for I, II, III]			[Diagram showing three boxes for Carence, Critique, Optimal]		
				N, P, S	K	Ca, Mg
Microéléments :					Fe	Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Symp}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, en magnésium et en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour ces éléments dans les couches minérales du sol. L'altitude (1100 m) et la pente (66 %) peuvent expliquer en partie les teneurs foliaires faibles pour certains éléments. L'accroissement en surface terrière est faible (0,22 m²/ha/an) pour ce peuplement qui est le plus vieux peuplement de sapin pectiné du réseau (environ 168 ans à 1,30 m en 1994). Les pourcentages de défoliation assez faibles jusqu'en 1996 (< 25 %) augmentent légèrement en 1997 (entre 25 et 30 %), mais des notations plus sévères pourraient expliquer en partie cette augmentation. Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

En 1997, aucun prélèvement d'aiguilles n'a été réalisé. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (60 jours).

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Callong-Mirailles (P. 25)

Commune de Belvis (Aude)

Latitude: 42°52'02" N

Longitude: 2°06'04" E

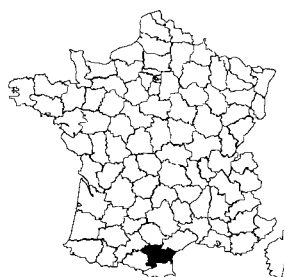
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

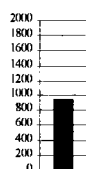
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 80 ± 3

Ho en 1995 (m) : 29,2 ± 1,9

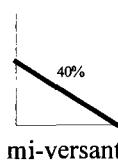
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.64



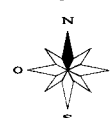
Altitude



Pente

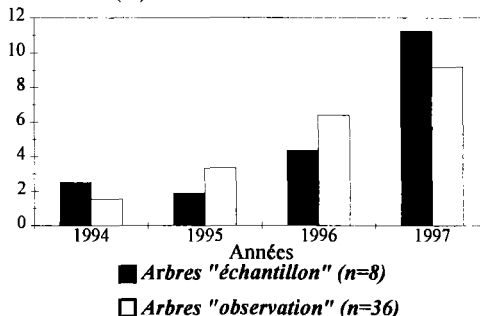


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire

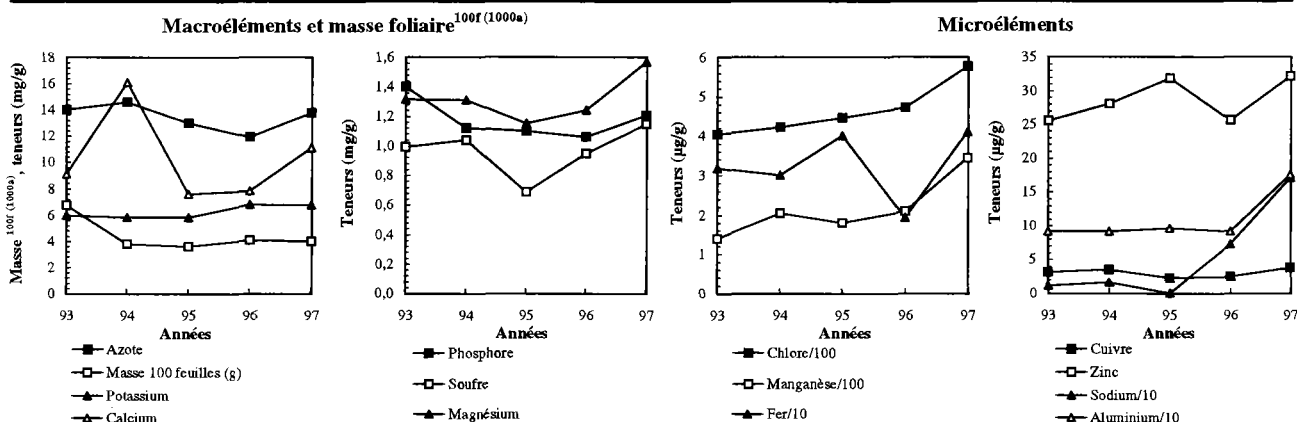


Végétation : *Fagion sylvaticae*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol brun calcique hydromorphe

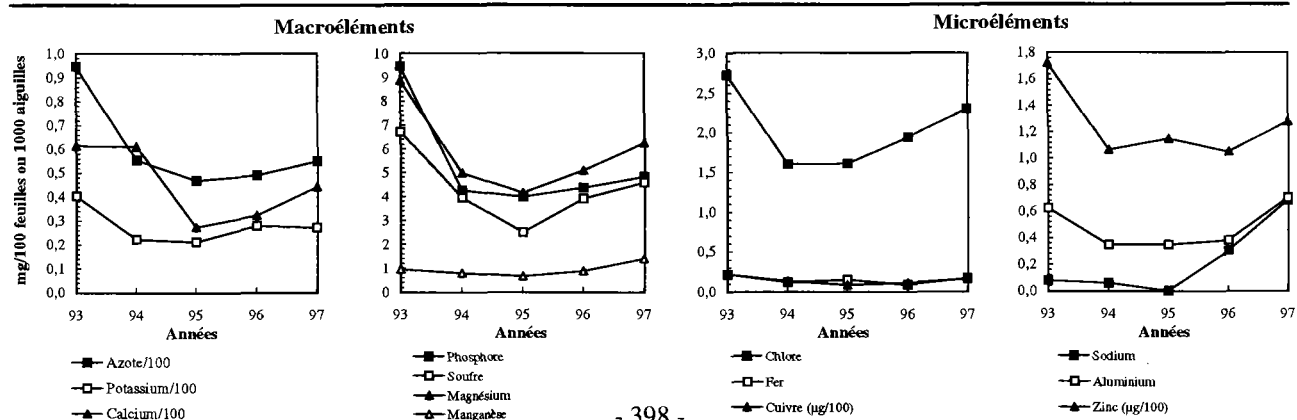
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



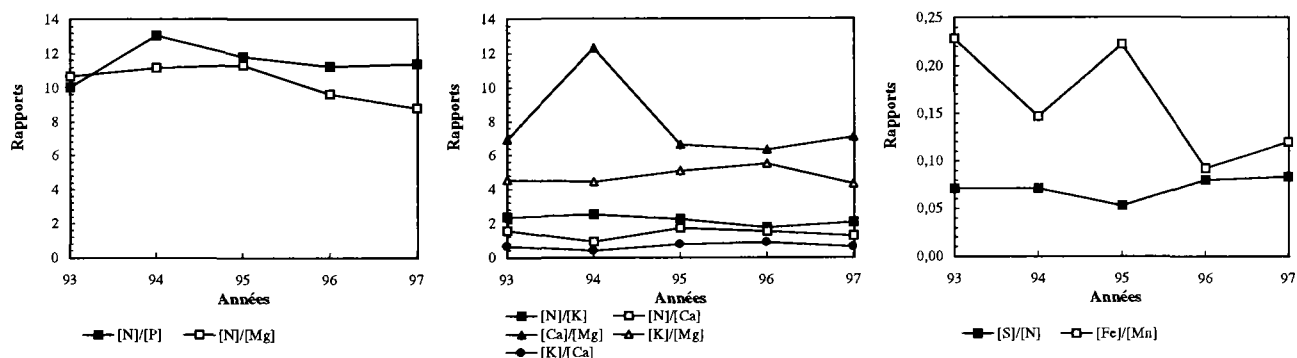
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments					
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	26	28	20	32	20	23	15	35	11	22	33	29	37
Interannuel 93-97 (n=5)	7	10	16	7	30	11	24	32	19	10	117	13	30

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing concentration ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			P, S	N, K, Mg	Ca
Microéléments :					Fe	Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en azote, en potassium, en magnésium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, et en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour Mg, K et P; les teneurs en calcium sont fortes dans les couches minérales du sol entre 0 et 40 cm. L'accroissement en surface terrière est moyen (0,64 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 12 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Les 8 arbres "échantillon" ont été remplacés en 1995 car il n'était pas possible de changer de direction de prélèvement d'une année sur l'autre. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (80 jours), en 94-95 (62 jours), en 95-96 (51 jours) et en 96-97 (71 jours).

Placette de niveau 2

Forêt Domaniale de Ban (P. 26)

Commune de Montbenoit (Doubs)

Latitude: 46°58'34" N

Longitude: 6°27'42" E

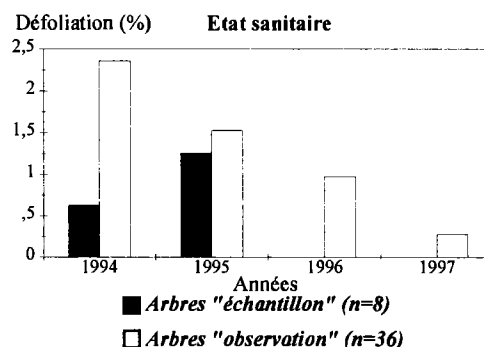
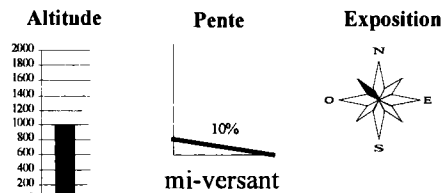
Structure du peuplement : Irrégulière jardinée

Origine : Régénération naturelle - Regarnis d'épicéas

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 81 ± 31

Ho en 1995 (m) : 25,6 ± 1,7

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 1.04



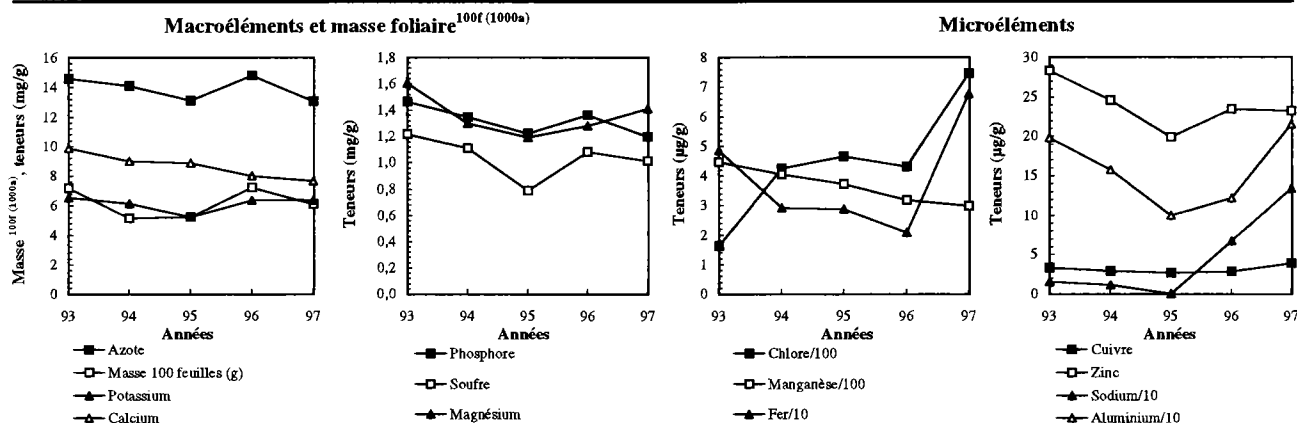
Végétation : *Galio odorati Fagenion*

Humus : Mésomull

Type de sol : Rendzine brunifiée

Sol brun calcaire hydromorphe

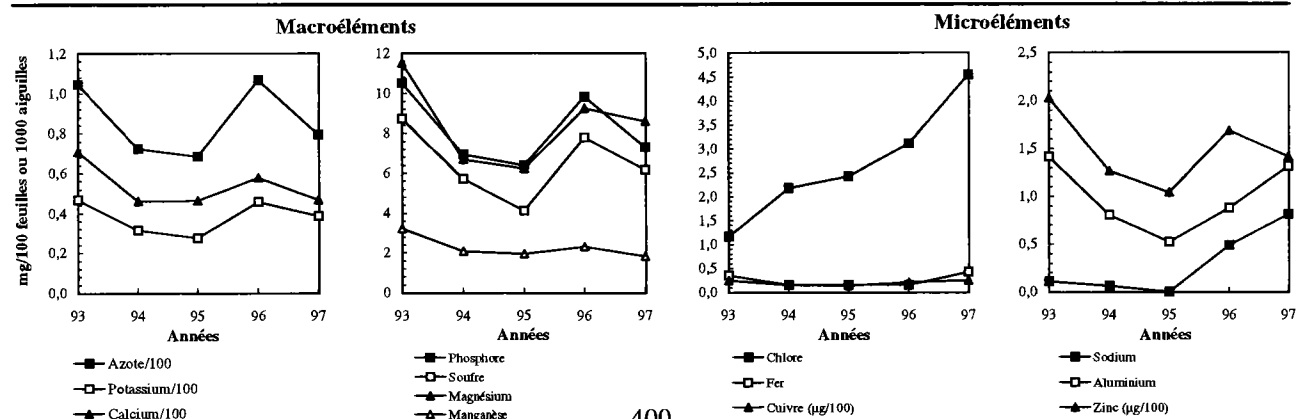
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



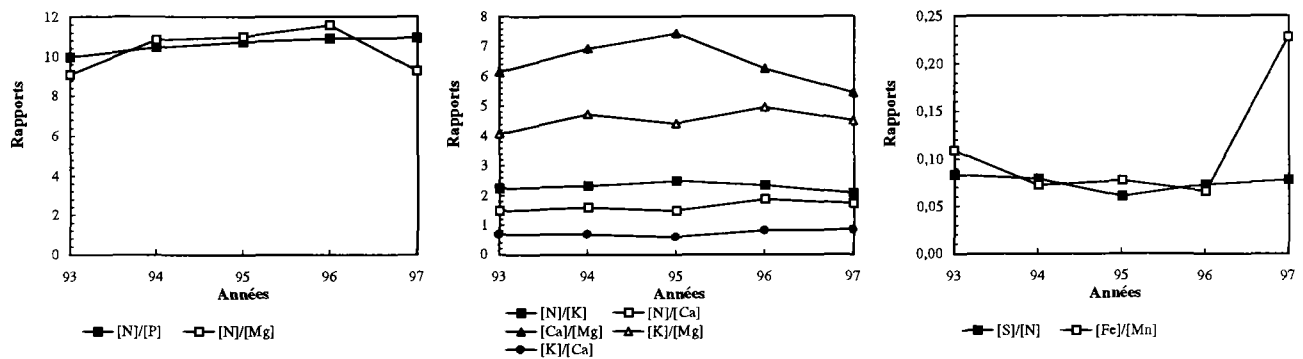
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	12	8	11	13	16	111	32	12	16	54	17	53
Interannuel 93-97 (n=5)	5	8	14	7	9	11	44	15	15	11	109	42	28

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[] [] []			[] [] []		
					N, P, K, Mg	Ca
						S
Microéléments :						
					Fe	Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		

Seuils ^{Eu} Borne inférieure (bi)
Borne supérieure (bs)

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Aucun problème nutritionnel n'est à noter pour cette placette, mis à part des teneurs foliaires un peu faibles en azote, en potassium, en phosphore, en magnésium et en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et des teneurs au delà du seuil indicatif optimum pour Ca, et Mn. Les teneurs en éléments sont moyennes dans les couches minérales du sol. L'accroissement en surface terrière est fort (1,04 m²/ha/an).

Les pourcentages de défoliation sont négligeables (< 5 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires au cours du temps n'est visible actuellement.

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale de Lente (P. 51)

Commune de Bouvante (Drôme)

Latitude: 44°56'53" N

Longitude: 5°19'50" E

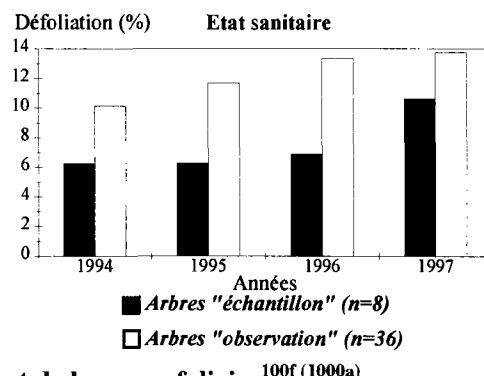
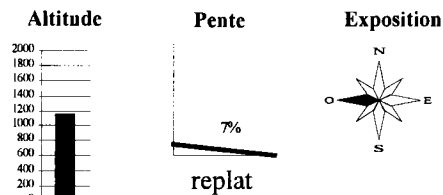
Structure du peuplement : Irrégulière jardinée

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 120 ± 17

Ho en 1995 (m) : 22,4 ± 2,9

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : -0.18



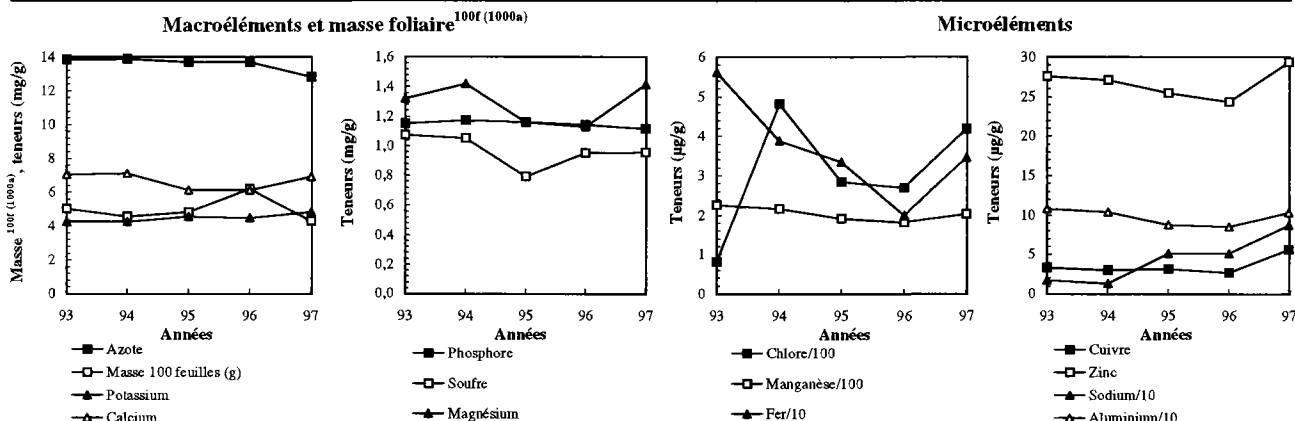
Végétation : *Geranio nodosi-Fagenion sylvaticae*

Humus : Mésomull

Type de sol : Sol brun eutrophe à pellicules calcaires

Sol brun eutrophe humifère

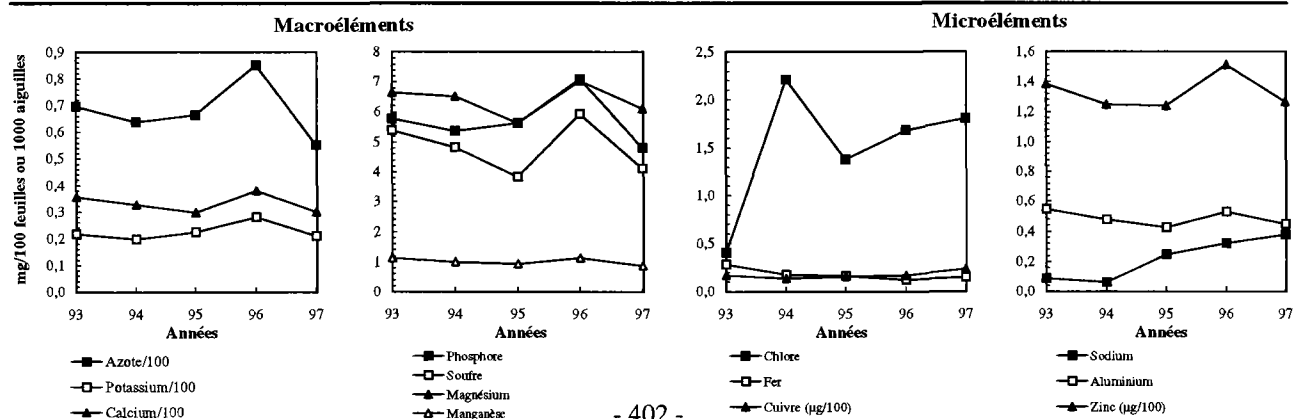
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



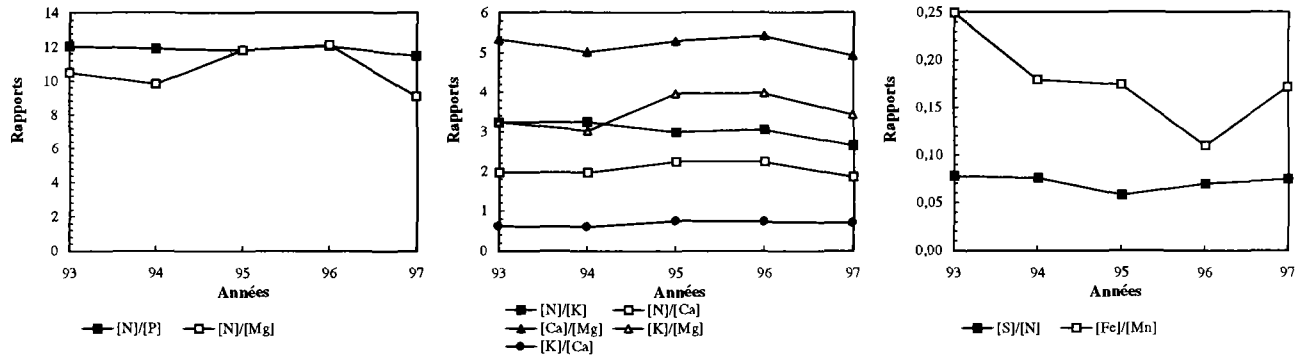
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	8	10	8	15	12	15	51	17	60	16	19	17	39
Interannuel 93-97 (n=5)	3	2	10	5	7	10	32	8	29	6	61	45	10

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.	borne sup.		Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			P, S	N, K, Mg	Ca
Microéléments :				Fe		Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en azote, en potassium, en magnésium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium et en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour Mg, K et P; les teneurs en calcium sont élevées dans les couches minérales du sol entre 0 et 40 cm. L'accroissement en surface terrière est le plus faible de ceux observés sur les placettes de sapin. C'est un des deux plus vieux peuplements de sapin pectiné du réseau (120 ans à 1,30 m en 1994). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 15 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Plus de la moitié des arbres a été prélevée dans la même direction en 1997, ce qui a pu entraîner un manque de représentativité des analyses cette année là.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Saint-Hugon (P. 40)

Commune de La Chapelle du Bard (Isère)

Latitude: 45°25'17" N

Longitude: 6°07'53" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

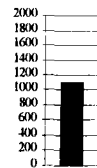
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 94 ± 28

Ho en 1995 (m) : 27,9 ± 2,0

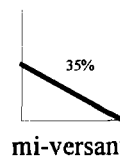
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 1.57



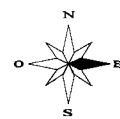
Altitude



Pente

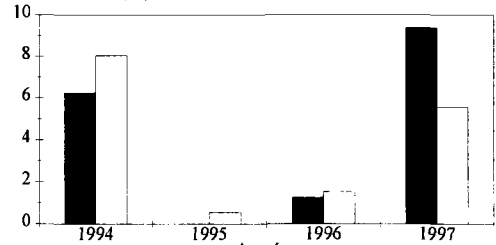


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



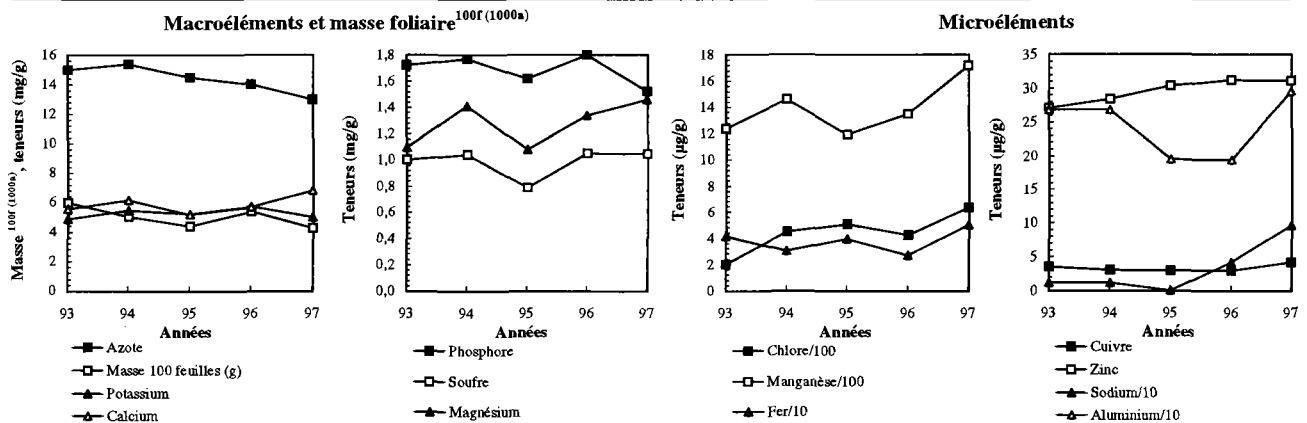
Végétation : *Geranio nodosi-Fagenion sylvaticae*

Humus : Amphimull

Type de sol : Sol brun acide colluvial

Sol brun faiblement lessivé

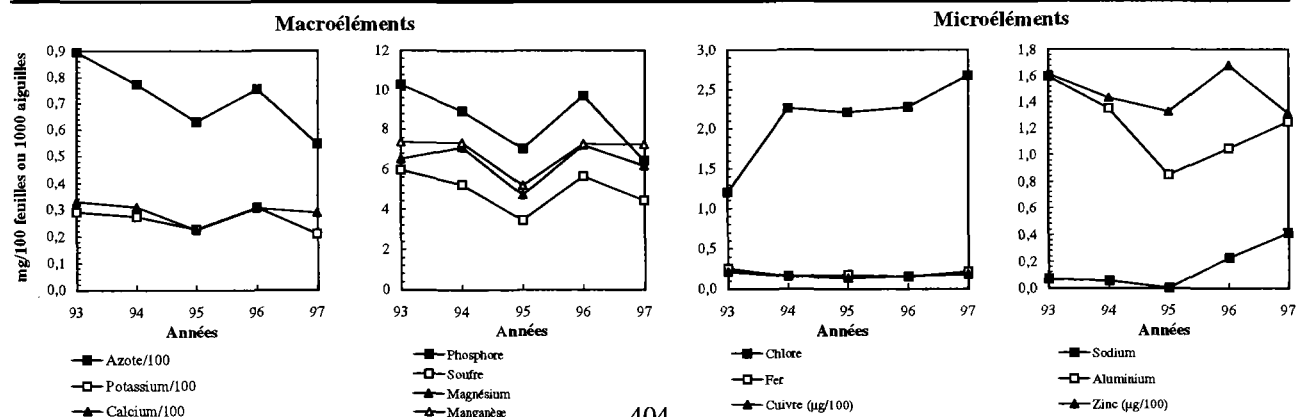
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



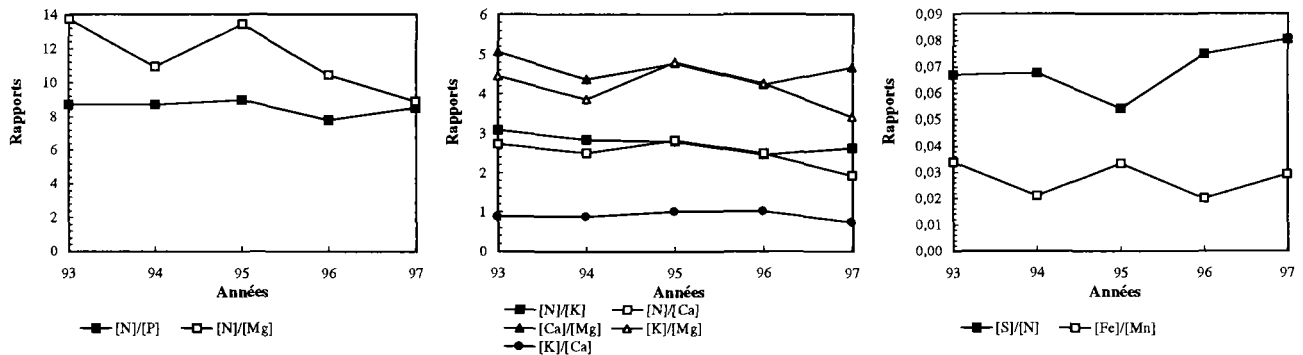
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	10	19	12	14	17	22	29	25	17	15	19	31	28
Interannuel 93-97 (n=5)	6	6	10	6	10	13	22	14	15	5	109	32	17

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, K, Ca, Mg]			S	N, P, K, Mg	Ca
Microéléments :				Fe		Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en azote, en phosphore, en potassium, en magnésium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium, et en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour le phosphore et le calcium; les teneurs en magnésium et surtout en potassium sont faibles dans les couches minérales du sol entre 0 et 40 cm. L'accroissement en surface terrière est moyen (1,57 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 10 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 1

Forêt Communale d'Arbois (P. 98)

Commune de Arbois (Jura)

Latitude: 46°50'33" N

Longitude: 5°47'18" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Plantation

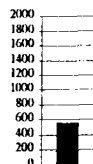
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 41 ± 3

Ho en 1995 (m) : 23,6 ± 1,2

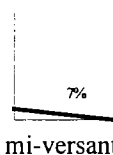
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1991-1995 : 0.00



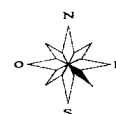
Altitude



Pente



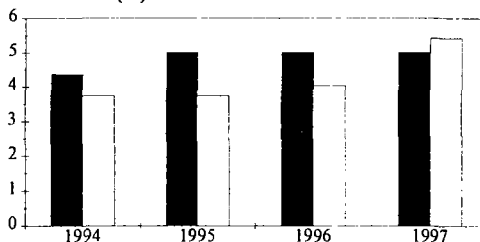
Exposition



mi-versant

Défoliation (%)

Etat sanitaire



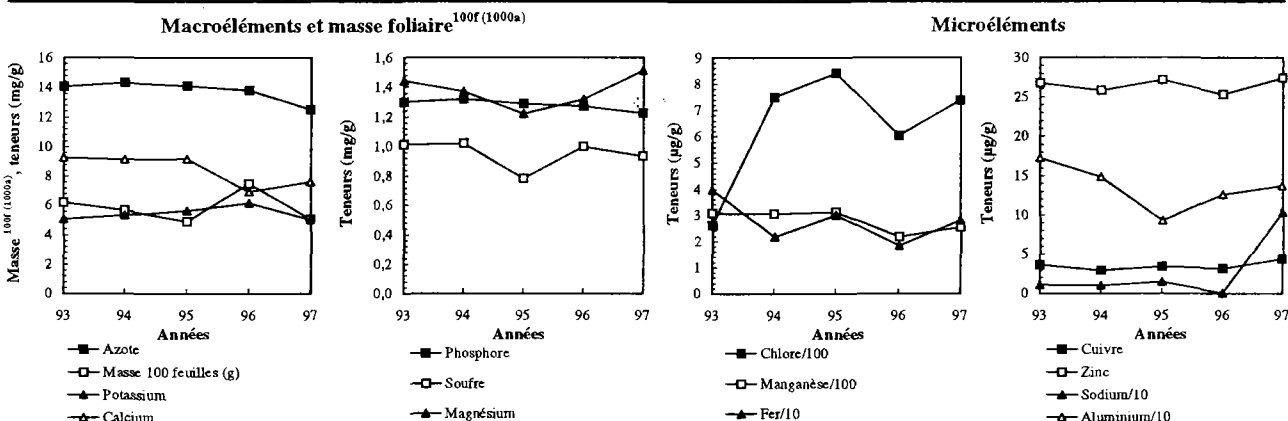
Végétation : *Daphno laureolae-Carpinenion betuli*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol humo-calciq

Sol brun calciq

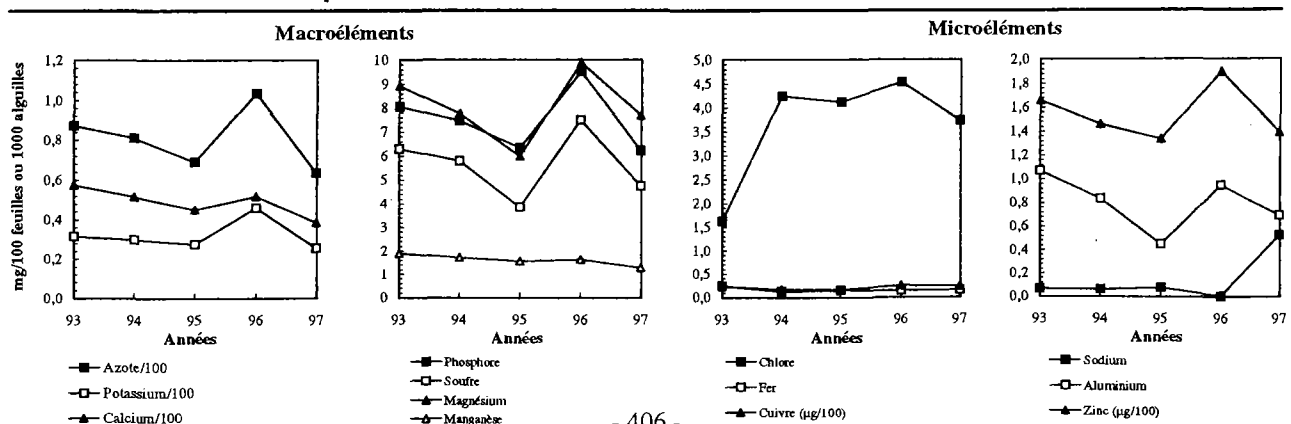
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire



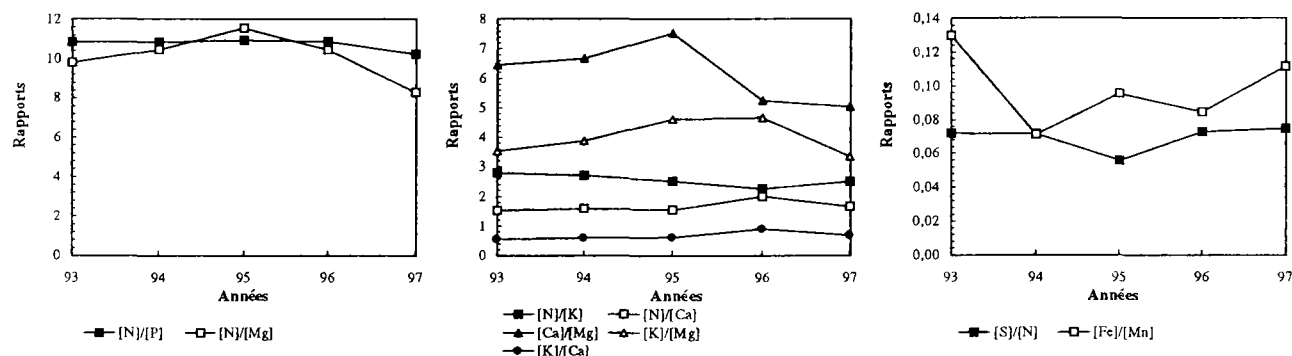
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	5	9	10	17	14	20	4	43	10	19	13	17	35	
Interannuel 93-97 (n=5)	5	2	9	8	11	7	27	13	14	3	138	32	20	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Diagram showing three boxes for I, II, III]			S	N, P, K, Mg	Ca
Microéléments :				Fe		Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)					Microéléments (µg/g)				
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en fer dans les aiguilles est mise en évidence pour cette placette. Les teneurs foliaires sont faibles pour le soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs foliaires sont élevées pour Ca, et Mn (teneurs supérieures à l'optimum). Les teneurs en phosphore, en magnésium et en potassium dans les couches minérales du sol sont moyennes et les teneurs en calcium sont élevées. C'est le plus jeune peuplement de sapin du réseau (environ 41 ans à 1,30 m en 1994). On ne connaît pas l'accroissement en surface terrière de ce peuplement entre 1991 et 1995 car aucun inventaire n'a été réalisé avant et après l'éclaircie de mai 1994. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 6 %). Aucune tendance claire des teneurs foliaires n'est visible entre 1993 et 1997.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale d'Abreschviller (P. 206)

Commune de Abreschviller (Moselle)

Latitude: 48°36'36" N

Longitude: 7°08'02" E

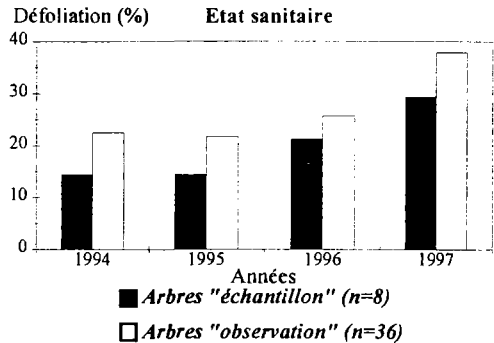
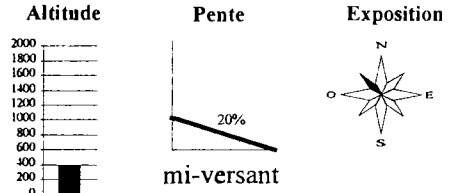
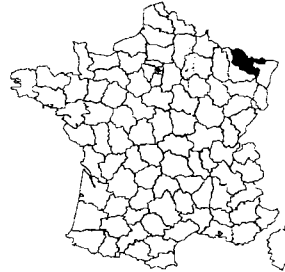
Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 54 ± 4

Ho en 1995 (m) : 27,5 ± 1,5

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 0.49

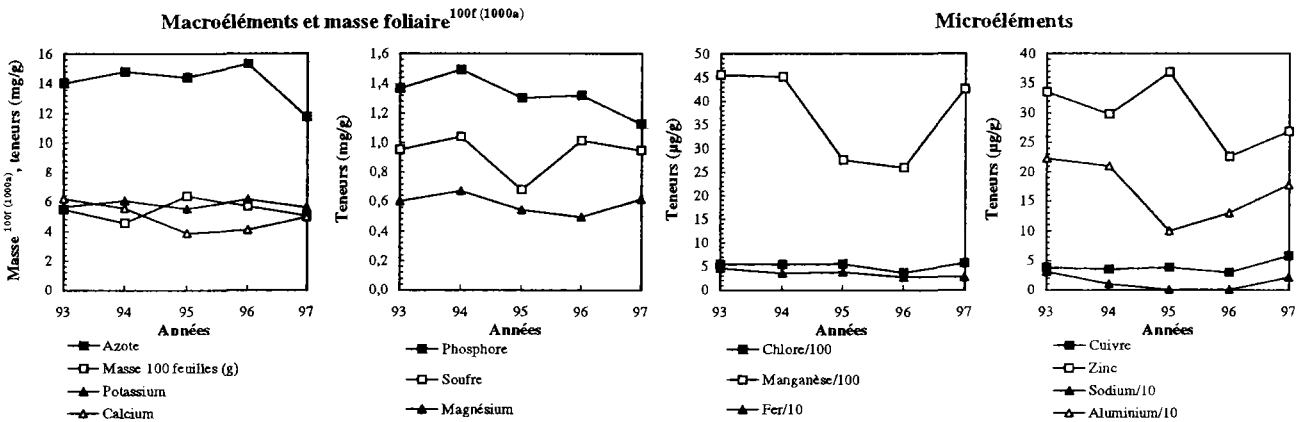


Végétation : *Luzulo luzuloidis-Fagenion sylvaticae*

Humus : Oligomull

Type de sol : Sol brun acide

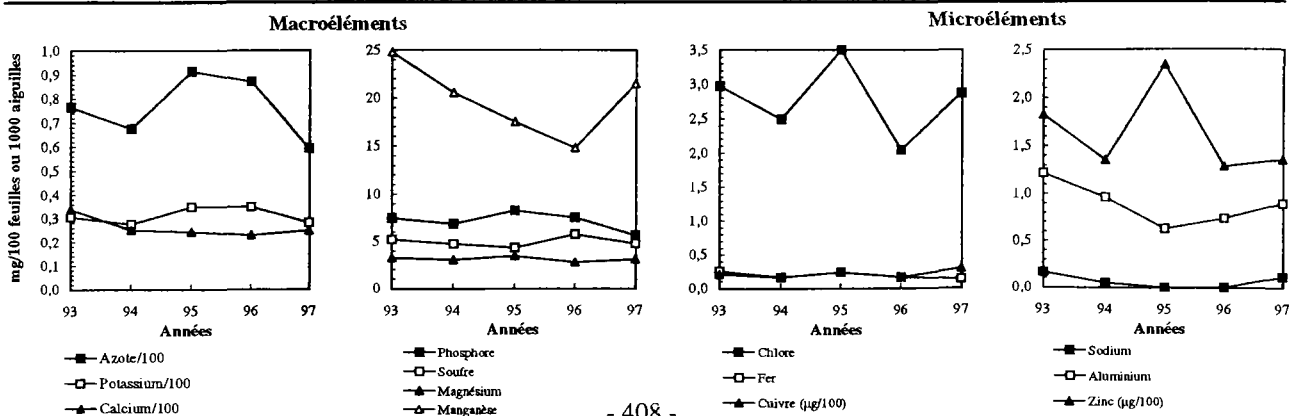
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire ^{100f (1000a)}



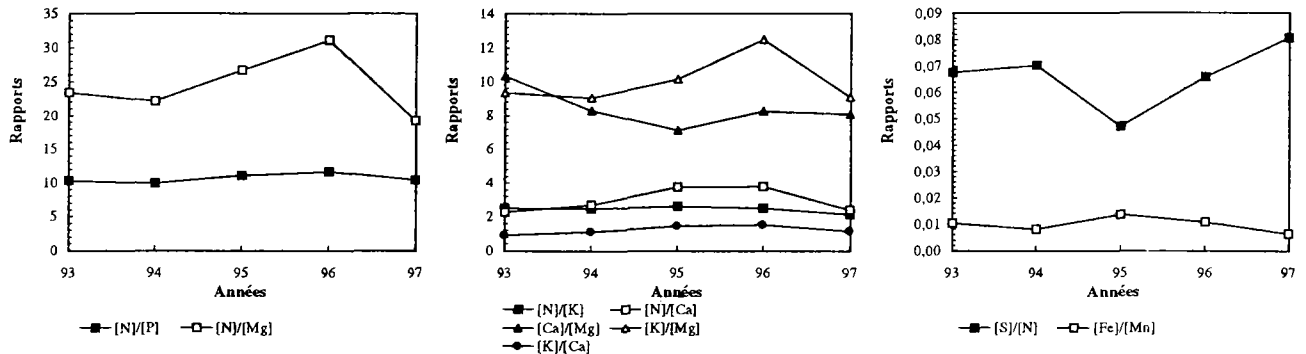
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments						Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al
Intraplacette en 1997 (n=8)	12	16	10	27	19	21	13	25	120	19	69	30	17
Interannuel 93-97 (n=5)	9	9	14	5	18	11	20	23	25	17	97	15	28

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires ^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils ^{Eu} et les seuils indicatifs ^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf. borne sup.			Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Barre à 3 segments]			Mg	S	N, P, K, Ca
Microéléments :					Fe	Mn

Valeurs indicatives des seuils

	Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)				
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi) Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Une carence en magnésium dans les aiguilles est mise en évidence pour cette placette. Les teneurs foliaires sont faibles pour le soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique), l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum). Les teneurs foliaires sont élevées pour Mn (teneurs supérieures à l'optimum). Les teneurs en phosphore (Dyer) dans les couches minérales du sol sont fortes (entre 18 et 39 mg/Kg), celles en calcium sont moyennes à faibles (entre 0,16 et 0,42 cmolc/Kg), celles en magnésium et en potassium sont très faibles (respectivement 0,01-0,07 et 0,02-0,07 cmolc/Kg). L'accroissement en surface terrière de ce peuplement entre 1991 et 1995 est moyen (0,49 m²/ha/an). Les pourcentages de défoliation tendent à augmenter entre 1994 et 1997 (15-25 % à 30-40 %) mais cette augmentation pourrait être due en partie à des notations plus sévères à partir de 1995. Des teneurs foliaires faibles en manganèse sont observées en 1995 et 1996 mais la variabilité intraplacette est importante pour cet élément. Toujours en 1995 les teneurs foliaires en soufre, en aluminium sont faibles tandis que les teneurs foliaires en zinc sont fortes. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 93-94 (52 jours).

Placette de niveau 1

Forêt Domaniale du Livradois (P. 22)

Commune de Saint-Germain-l'Herm (Puy de Dôme)

Latitude: 45°26'51" N

Longitude: 3°31'39" E

Structure du peuplement : Régulière

Origine : Régénération naturelle

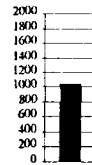
Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 108 ± 32

Ho en 1995 (m) : 26,8 ± 2,7

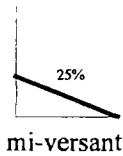
dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : -1.06



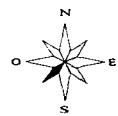
Altitude



Pente

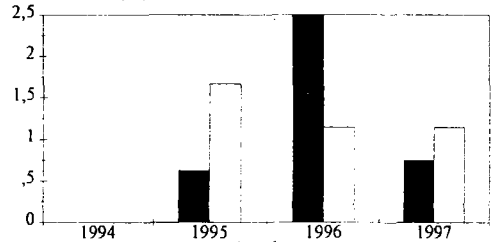


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

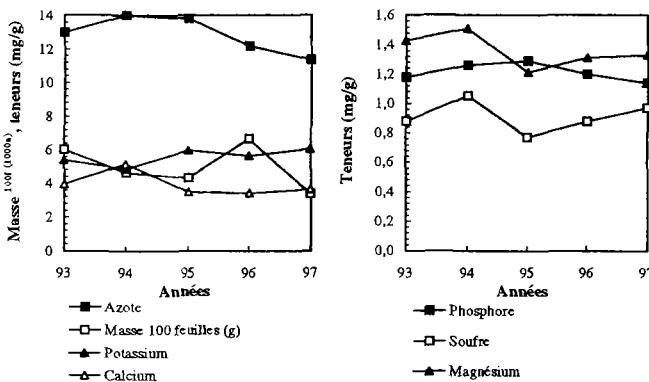
Végétation : *Luzulo sp. pl. -Fagion sylvaticae*

Humus : Dysmoder - Moder

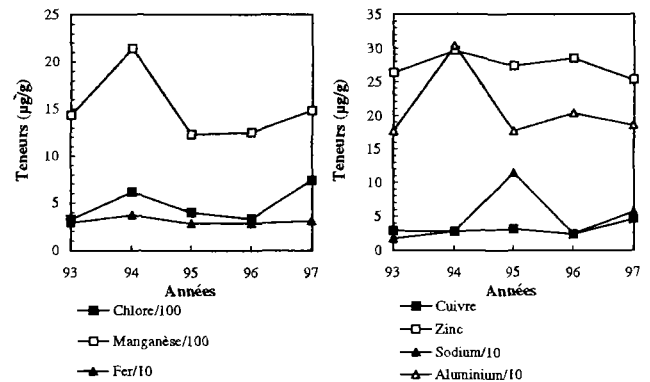
Type de sol : Sol brun acide

Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}

Macroéléments et masse foliaire^{100f (1000a)}



Microéléments

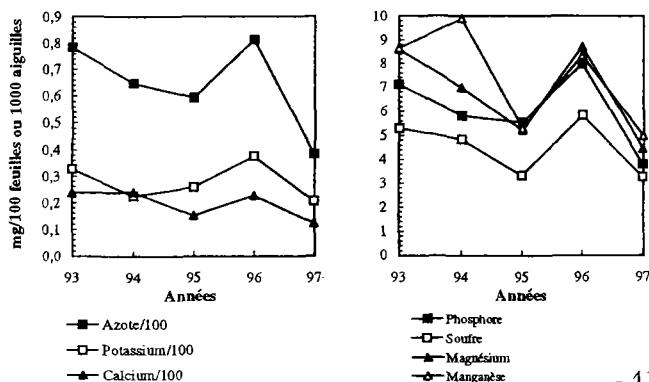


Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

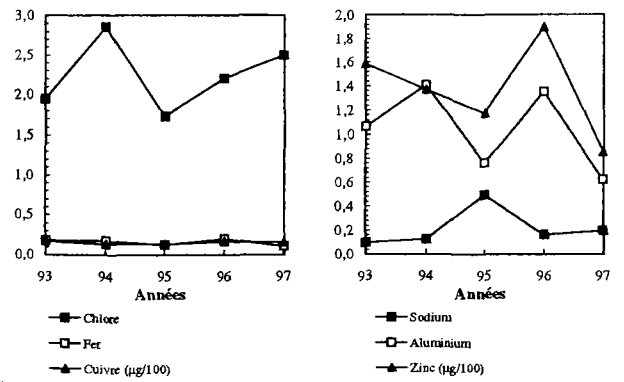
	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	9	9	9	13	28	17	31	23	78	22	60	31	39	
Interannuel 93-97 (n=5)	8	5	10	8	16	8	11	22	25	6	75	35	23	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}

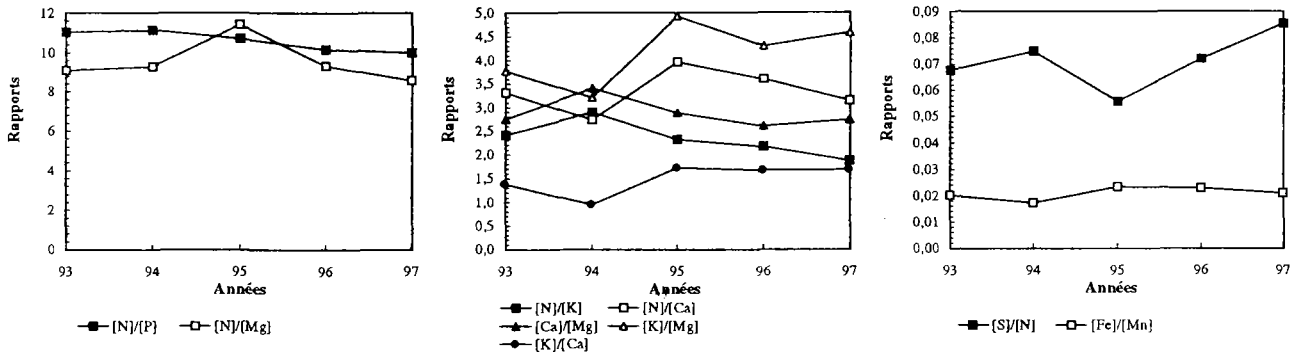
Macroéléments



Microéléments



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

	Seuils ^{Eu}			Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing concentration ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			N, S P, K, Ca, Mg		
Microéléments :				Fe Mn		

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en phosphore, en potassium, en calcium, en magnésium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour les éléments dans le sol. L'accroissement en surface terrière entre les deux campagnes de mesure est négatif car des arbres sont morts durant cette période mais nous ne connaissons par leurs dimensions. Les pourcentages de défoliation sont négligeables (< 5 %) mais de la mortalité a été observée entre les 2 inventaires dendrométriques. Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires.

Placette de niveau 3

Forêt Domaniale de Guebviller (P. 40)

Commune de Lautenbachzell (Haut Rhin)

Latitude: 47°56'01" N

Longitude: 7°07'31" E

Structure du peuplement : Régulière

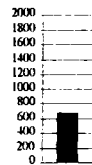
Origine : Régénération naturelle

Age à 1,30 m en 1994 (ans) : 101 ± 18

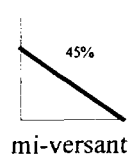
Ho en 1995 (m) : 29,3 ± 2,0

dG/dt (m²/ha/an) sur la période 1992-1995 : 3.18

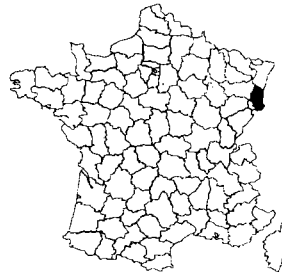
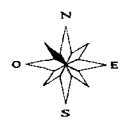
Altitude



Pente

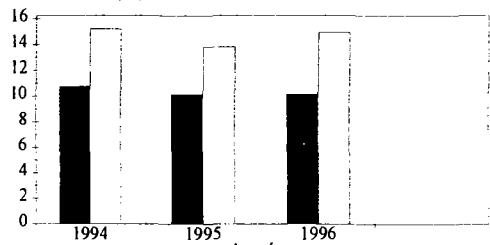


Exposition



Défoliation (%)

Etat sanitaire



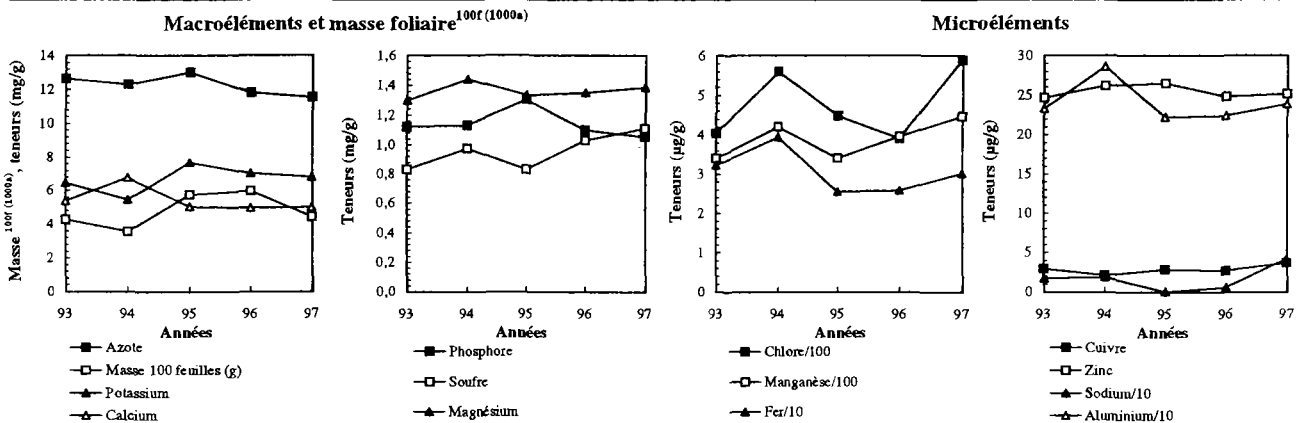
■ Arbres "échantillon" (n=8)
□ Arbres "observation" (n=36)

Végétation : *Abieti-Fagetum*

Humus : Mésomull - Oligomull

Type de sol : Sol brun mésotrophe

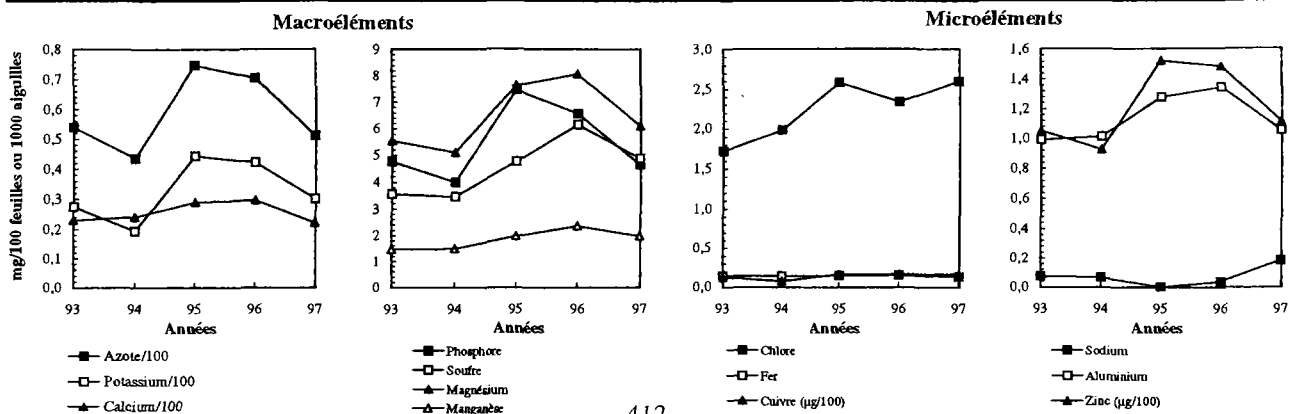
Evolution au cours du temps des teneurs foliaires en nutriments et de la masse foliaire^{100f (1000a)}



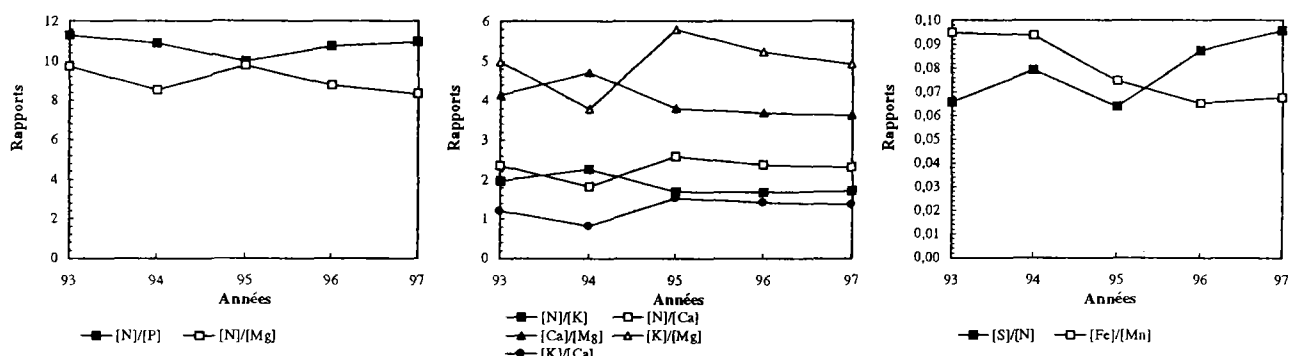
Variabilité des teneurs foliaires (Coefficients de variation CV en %)

	Macroéléments							Microéléments						
	N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	Na	Cl	Al	
Intraplacette en 1997 (n=8)	11	15	22	18	18	21	63	29	30	21	106	40	34	
Interannuel 93-97 (n=5)	4	7	11	11	13	4	17	11	17	3	86	17	10	

Evolution au cours du temps des minéralomasses foliaires^{100f (1000a)}



Evolution au cours du temps des rapports de teneurs en nutriments dans les feuilles



Comparaison des teneurs foliaires moyennes 93-97 avec les seuils^{Eu} et les seuils indicatifs^{Fr}

Seuils ^{Eu}				Seuils indicatifs ^{Fr}		
Classes	I	II	III			
Niveaux de concentration	Faible	Moyen	Elevé			
Seuils	borne inf.		borne sup.	Carence	Critique	Optimal
Macroéléments :	[Bar chart showing ranges for N, P, S, K, Ca, Mg]			N, P, S	K, Mg	Ca
Microéléments :				Fe		Mn

Valeurs indicatives des seuils

		Macroéléments (mg/g)						Microéléments (µg/g)			
		N	P	S	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Seuils indicatifs ^{Fr}	Carence	10	0,8	0,8	3,0	0,8	0,7	30	25		
	Critique	13	1,2	1,0	4,5	3,8	1,0				
	Optimum	16	1,5		6,0	5,0	1,4	100	150		
Seuils ^{Eu}	Borne inférieure (bi)										
	Borne supérieure (bs)										

Les cases vides correspondent à l'absence de seuils.

Commentaires :

Cette placette se caractérise à la fois par des teneurs foliaires faibles en azote, en phosphore, en soufre (entre le seuil indicatif de carence et critique) en potassium, en magnésium, en fer (entre le seuil indicatif critique et l'optimum) et élevées en calcium et en manganèse (supérieur à l'optimum). Une alimentation minérale correcte est observée pour les éléments dans le sol. Ce peuplement a le plus fort accroissement annuel moyen en surface terrière. Les pourcentages de défoliation sont faibles (< 16 %). Aucune tendance claire au cours du temps n'est visible pour les teneurs foliaires. Les écarts de date de prélèvement entre deux années successives ont été supérieurs à un mois et demi en 94-95 (56 jours) et en 95-96 (62 jours).

Crédit photographique (couverture)

E. Ulrich (toutes, sauf en haut à droite)
M. Lanier (en haut à droite)

Légendes des photos de la couverture

- En haut à gauche* : Tir foliaire dans la hêtraie en forêt de Cerisy dans le Clavados (HET 14)
En haut à droite : Tir foliaire dans la pessière en forêt d'Espinouse dans l'Hérault (EPC 34)
Milieu haut à gauche : Tir foliaire dans la hêtraie en forêt de Lente dans la Drôme (HET 26)
Milieu bas à droite : Prélèvement des feuilles pour l'envoi au laboratoire dans la hêtraie en forêt du Jabron en Provence-Alpes-Côte d'Azur (HET 04)
En bas à gauche : Tir couché pour une meilleure visée
En bas à droite : Prélèvement de la pousse de l'année d'un pin sylvestre

Exemplaires imprimés : 1100

Imprimerie ONF - Fontainebleau

ISBN 2 - 84207 - 188 - 3
Dépôt légal 2^{ème} semestre 1999



Direction Technique
Département Recherche et Développement
Réseau RENECOFOR
Boulevard de Constance - 77300 Fontainebleau
Tél : +33 (0) 1 60 74 92 25 - Fax : +33 (0) 1 64 22 49 73