RenDez-Vous techniques

hors-série n°4

patrimoine
sylviculture
progrès
connaissances
économie
forêts et société
environnement
biodiversité
gestion durable

Colloque des 9 - 11 mai 2007 à Beaune

15 ans de suivi des écosystèmes forestiers

Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR

Office National des Forêts

Hors-série
RenDez-Vous techniques

Directeur de la publication
Bernard Gamblin
Rédactrice en chef
Christine Micheneau
Comité éditorial (2006)
Yves Birot, Joseph Behaghel, Jean-Marc Brézard, François Chièze, Xavier Gauquelin, Patrice Hirbec, Olivier James, Pierre Leroy, Alain Macaire, Patrice Mengin-Lecreulx, Rémy Metz, Frédéric Mortier, Jérôme Piat, Thierry Sardin, Jacques Valeix
Maquette, impression et routage
Imprimerie ONF - Fontainebleau
Conception graphique
NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique
page de couverture : RENECOFOR, ONF
pour l'ensemble du document, les photos RENECOFOR sont de Luc Croisé, Marc Lanier et Erwin Ulrich
Périodicité
4 numéros par an, et un hors série
Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par abonnement auprès de la cellule de documentation technique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : dtcb-documentation@onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73
Prix au numéro (hors frais de port) :
n° ordinaire : 10 euros ; hors série : 20 euros
Abonnement : 35 euros : 1 an = 4 numéros ordinaires
prix du hors série pour les abonnés = 15 euros
Dépôt légal : décembre 2008

Ce hors série a été coordonné par Erwin Ulrich, responsable du réseau RENECOFOR, avec l'aide de Bernard Vannière (retraité, ancien chef du Département Recherche ONF) et Christine Micheneau.

Citation recommandée

- du hors-série dans son entier : Office national des forêts. Direction technique et commerciale bois, 2008. 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 4. 166 p.
- d'une contribution du hors-série : LANIER M., 2008. La base de données RENECOFOR, mémoire du réseau et maillon de la chaîne d'assurance qualité. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 4 « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR », pp. 34-37

sommaire

Hors-série n°4

4 Allocution d'ouverture – *par Jacques Valeix*

7 Allocutions des partenaires financiers – *par Ernst Schulte, Ségolène Halley des Fontaines, Christian Elichegaray et Laurence Galsomiès, et Patrice Mengin Lecreulx*

Première session - Pourquoi et comment suivre les écosystèmes forestiers ?
présidée par Ernst Schulte- Commission européenne, DG Environnement

15 Fonctionnement et dysfonctionnement des écosystèmes forestiers : pourquoi un suivi intensif et à long terme ? – *par Jean-Luc Dupouey, Stéphane Hättenschwiler, Matthias Dobbertin*

26 Pourquoi avoir créé le réseau RENECOFOR ? Quel avenir pour ce réseau aujourd'hui ? *par Georges Touzet et Christian Barthod*

29 RENECOFOR et son articulation avec d'autres réseaux nationaux et européens – *par Erwin Ulrich*

34 Base de données et système d'assurance qualité du réseau – *par Marc Lanier*

38 Innovation en matière d'assurance qualité : la base de saisie en ligne « RenecoFlore » *par Sylvaine Camaret*

Deuxième session - Séance posters sur les thématiques du colloque

41 Allocution « inaugurale » du père intellectuel de RENECOFOR : Maurice Bonneau

43 Collection des résumés des posters

Troisième session - Évolution de la pollution atmosphérique et impact sur les peuplements et les sols forestiers
présidée par Étienne Dambrine – INRA Nancy, Équipe Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers

63 Quelles sont les tendances globales des dépôts atmosphériques humides en France ? *par Patrice Coddeville, Erwin Ulrich et al.*

69 Évolution de l'acidité et dynamique des éléments nutritifs en forêt : premiers bilans *par Manuel Nicolas, Étienne Dambrine et Erwin Ulrich*

75 Qu'a apporté le réseau pour le calcul des charges critiques en polluants atmosphériques en France ? – *par Anne Probst, David Montcoulon, Sophie Leguedois, Jean-Paul Party et Étienne Dambrine*

82 Les écosystèmes forestiers sont-ils contaminés en métaux lourds ? – *par Anne Probst, Laura Hernandez et Jean-Luc Probst*

87 Contribution du réseau à la compréhension de l'impact de l'ozone sur la forêt et la végétation de clairière – *par Madeleine Günthardt-Goerg, Laurence Dalstein, Pierre Vollenweider et Terry Menard*

sommaire

Hors-série n°4

Quatrième session - Résultats et perspectives du réseau concernant la biodiversité
présidée Jean-François Dobremez – Professeur émérite de l'université de Savoie

95 La flore dans le réseau RENECOFOR : avancées méthodologiques et premières tendances sur 10 ans – *par Frédéric Archaux, Jean-Luc Dupouey et Patricia Heuzé*

99 Suivi de la flore fongique : une énorme diversité difficile à mesurer – Partenariat avec les sociétés mycologiques de France – *par Régis Courtecuisse, Pierre-Arthur Moreau et Olivier Daillant*

103 Évaluation de la biodiversité et de l'état sanitaire des sols forestiers – *par Nuria Ruiz Camacho, Elena Velasquez et Patrick Lavelle*

Cinquième session - Vers la modélisation du bilan hydrique ; exemples de relations entre fonctionnement des arbres et climat
présidée par Nathalie Bréda – INRA Nancy, Équipe Phytoécologie Forestière

111 Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée – *par Vincent Badeau et Nathalie Bréda*

115 Interprétation climatique et bioclimatique des variations annuelles de la croissance des arbres – *par François Lebourgeois*

120 Évolution de la nutrition des peuplements : vers une carence générale en phosphore ? *par Luc Croisé et Mathieu Jonard*

127 Relation entre les stades phénologiques et les variables climatiques – *par François Lebourgeois et al.*

Sixième session - Ateliers

133 Ateliers sur les questions émergentes - Présentation

Septième session – Collaborations de longue durée et vulgarisation par les forestiers
présidée par Brigitte Pilard-Landeau – ONF, direction territoriale Ile-de-France – Nord-Ouest

135 Collaboration de longue durée entre l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts du Grand-Duché de Luxembourg – *par Claude Parini*

139 Collaboration entre les dispositifs BRAMM et RENECOFOR – *par Sébastien Leblond et al.*

144 Vulgarisation par les forestiers de terrain dans les Vosges, au Mont Aigoual, et au Pays de Sault – *par François Mouchot, Guy Monzo et Francis Milhaut, et Jean-Luc Fiol*

Huitième session – Enjeux et perspectives
présidée par Guy Landmann – GIP ECOFOR

151 Synthèse des ateliers « questions émergentes » – *par Myriam Legay et al.*

154 Quelles évolutions possibles pour RENECOFOR ? Une analyse basée sur les résultats d'une évaluation scientifique – *par Yves Birot et Guy Landmann*

159 Table ronde : quels enjeux pour les dispositifs d'observation forestière à long terme et quels partenariats ?

Avant-propos

Ce numéro hors-série rassemble l'intégralité des communications du colloque des 9-11 mai 2007 à Beaune : « 15 ans de suivi intensif des écosystèmes forestiers - les résultats, les acquis et perspectives de RENECOFOR (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers) ».

L'objectif du colloque était de dresser le bilan de 15 années d'existence de RENECOFOR et d'esquisser les perspectives d'avenir. À l'image du réseau, il se voulait à l'interface entre recherche et gestion, alternant les présentations pédagogiques des résultats et des enjeux avec des temps à tonalité scientifique, pour un public de scientifiques et de forestiers. La forte participation (310 personnes) témoigne de l'intérêt que les résultats du réseau, très ambitieux et multi-domaines, ont suscité.

Ces actes du colloque montrent à quel point le réseau RENECOFOR est pertinent pour répondre à des besoins très divers en données de qualité, récoltées sur une longue période. À ce stade où il n'en est qu'à la moitié de la durée initialement prévue, force est de constater qu'il a déjà généré une foule d'études inédites et nécessaires à la compréhension des effets des changements globaux sur la forêt, que ce soit au niveau français ou européen. Saluons à ce propos nos partenaires financiers pour la constance de leur soutien à une opération dont on savait dès le départ qu'elle ne pouvait montrer sa valeur ajoutée qu'après un minimum de 10-15 ans : l'Union européenne, à travers plusieurs règlements, le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, le ministère de l'Environnement surtout au moment de sa création, et l'Office national des forêts.

Après 15 ans, les besoins en matière d'information environnementale ont évolué et l'évaluation du réseau en 2006 et 2007 a conduit à redimensionner ses domaines et fréquences d'observations pour qu'il puisse mieux répondre aux besoins futurs, tout en optimisant les coûts. En 2008, RENECOFOR a donc entamé sa métamorphose. À partir de 2009, le projet européen LIFE+ « FutMon » (Future Development and Implementation of an EU-level Forest Monitoring System), auquel participent 41 partenaires de 24 pays, permettra à RENECOFOR II de rester dans une logique européenne tout en évoluant dans le sens d'une meilleure prise en compte des mesures liées surtout au changement climatique et aux charges critiques de dépôts supportables par les sols.

C'est le moment de remercier ici très chaleureusement les très nombreuses personnes qui ont rendu possible l'existence et le succès de ce réseau, que ce soit pour son financement, son fonctionnement sur le terrain et dans les laboratoires, ou pour l'analyse et la publication des données.

Le Directeur technique et commercial bois,

Bernard Gamblin

Allocution d'ouverture du colloque

Bonjour à toutes et à tous et bienvenue dans ce magnifique Palais des Congrès de Beaune qui nous ouvre ses portes pendant trois jours afin que nous puissions y mener, dans d'excellentes conditions, les travaux du colloque intitulé « *15 ans de suivi des écosystèmes forestiers – résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR* ». L'objectif de ce colloque est bien en effet de présenter le bilan de RENECOFOR (REseau National de suivi des ECOsystèmes FORestiers), après 15 années de suivi, puis d'en dresser des perspectives d'avenir.

RENECOFOR, ONF

Vous êtes plus de 310 à vous être inscrits à ce colloque. Je ne peux que vous en féliciter. Ce niveau de participation constitue, vous vous en doutez, un premier succès pour les organisateurs. Au nom de son comité d'organisation, j'ai l'honneur, le privilège et le grand plaisir de saluer et de remercier pour leur participation :

Tout d'abord, à tout seigneur, tout honneur, les **25 participants en provenance de divers pays d'Europe**. Je dis en conséquence à nos collègues et amis en provenance d'Allemagne, de Belgique, d'Espagne, de Finlande, du Luxembourg, de Roumanie, du Royaume-Uni et de Suisse : « *Welcome to Beaune and enjoy this workshop !* », « *Bienvenidos en Beaune y disfruten este taller !* », « *Willkommen in Beaune und profitieren Sie von diesem Kolloquium !* » ! Je pense qu'ils méritent bien vos applaudissements.

Ensuite, les **110 chercheurs et responsables de haut niveau** venus des diverses régions de France, certains parmi eux étant fortement impliqués dans la valorisation des données du réseau. Bienvenue donc à nos collègues et amis de l'administration forestière, de l'environnement, de la forêt privée, de l'ADEME et de la recherche. Concernant plus particulièrement la recherche et ce colloque ayant pour ambition de se situer entre recherche et gestion, ce qui constitue un vrai défi pour les organisateurs, je suis d'ores et déjà heureux de constater l'importance comme le niveau de la participation des organismes de recherche, des écoles supérieures d'ingénieur et des universités, c'est-à-dire des partenaires scientifiques de l'ONF dans l'aventure RENECOFOR, je veux citer notamment l'INRA, le CNRS, le Cemagref, le Muséum national d'histoire naturelle, l'ENGREF, le GIP ECOFOR, l'École des mines de Douai, le Groupe international d'études des forêts sud européennes et les universités de Savoie, de Lille, de Paris VI, Paris VII et Paris XII. Ils seront à l'œuvre tout au long de ces trois journées en animant certaines sessions, en présentant leurs travaux et leurs résultats et, d'une manière générale, en participant à nos échanges et débats. Je vous en remercie d'avance.

Enfin, les **175 personnels de l'ONF**, qu'ils soient responsables locaux des placettes du réseau RENECOFOR, membres de la cellule de coordination du réseau, correspondants observateurs œuvrant en relation étroite avec le département de la santé des forêts du ministère de l'agriculture et de la pêche, gestionnaires forestiers ou membres de la direction générale. Permettez-moi de profiter de cet événement pour saluer et souligner l'investissement remarquable des membres de la cellule de coordination du réseau RENECOFOR ainsi que de tous les forestiers responsables des 102 placettes du réseau, c'est-à-dire de ceux qui assurent les prises de données

avec une grande constance, mais aussi et je dirai même surtout, avec une qualité unanimement reconnue par nos partenaires de la recherche. Si la base de données du réseau, telle que constituée à ce jour, contient près de 60 millions d'enregistrements, ce qui est à l'évidence tout à fait considérable, il y a lieu de souligner l'application d'un système d'assurance qualité audit réseau, gage de rigueur et de professionnalisme.

Le réseau RENECOFOR a donc cette année 15 ans d'âge. Rappelons-nous : ce dispositif de suivi continu des écosystèmes forestiers avait été mis en place suite à l'épisode des « pluies acides », « *die Waldsterben* » comme le dénommaient nos confrères allemands, et aux questionnements apparus en Europe sur les pollutions atmosphériques à longue distance et leurs effets sur les forêts. Cette décision était conforme à la 1ère résolution de la 1ère conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe, tenue à Strasbourg en 1990. Les enjeux d'un tel dispositif avaient alors été clairement perçus par les principaux promoteurs du réseau, je veux parler de Georges Touzet, alors directeur général de l'ONF, qui nous fait l'honneur d'être des nôtres et qui s'adressera à vous tout à l'heure, d'une part, de Christian Barthod, alors responsable du département de la santé des forêts au ministère de l'agriculture et de la pêche et qui ne peut malheureusement être des nôtres suite à un empêchement majeur, d'autre part. Et je n'oublie ni Maurice Bonneau, directeur de recherche honoraire de l'INRA, présent parmi nous et qui interviendra ce soir au cours de l'apéritif d'honneur, ni Guy Landmann, directeur adjoint du GIP ECOFOR et qui interviendra pour sa part vendredi matin, qui leur ont, à l'époque, apporté tout leur soutien scientifique, et ce dès la première heure. Un grand merci à ces pères fondateurs et spirituels.
Aujourd'hui, de nouvelles questions émergent, comme celles des changements climatiques ou des changements globaux et de leurs effets sur les écosystèmes forestiers. Comment pourrions-nous en effet rester insensibles aux évolutions climatiques en cours et à leurs manifestations les plus diverses sur les écosystèmes forestiers ? Ne nous invitent-elles pas, ne nous incitent-elles pas à adapter nos dispositifs de suivi continu des écosystèmes forestiers, dispositifs dont RENECOFOR fait partie, et cela en étroite relation avec la recherche ? Après 15 années de fonctionnement, tenant compte des questions posées à l'origine du réseau mais en se plaçant aussi dans la perspective nouvelle qu'apportent ces changements, il nous apparaît nécessaire de faire ensemble un point mais aussi de réfléchir à l'avenir, voire d'ouvrir de nouvelles pistes. Rappelons-nous à ce propos que la création en 1992 du réseau RENECOFOR s'inscrivait clairement dans la durée, c'est-à-dire sur une durée de 30 ans.

C'est bien dans cet esprit que l'Office national des forêts a décidé de procéder dès 2006 à une évaluation scientifique du réseau RENECOFOR puis à un travail d'approfondissement, de la part du comité scientifique de l'ONF, des résultats et recommandations de cette évaluation. Les principaux fruits de ces travaux vous seront rapportés vendredi matin, juste avant la table ronde qui viendra clôturer nos travaux, par Guy Landmann, que j'ai déjà cité, et par Yves Birot, président du comité scientifique de l'ONF, et que je salue bien amicalement.

Comme vous pouvez vous en douter, RENECOFOR s'inscrit clairement, au-delà de sa dimension nationale, dans un contexte plus large, à savoir dans une dimension européenne. Les importantes questions environnementales que posent les changements climatiques en cours justifient ainsi l'existence de réseaux d'observation à l'échelle des aires de répartition des espèces. Me tournant vers M. Ernst Schulte, de la direction générale Environnement à la Commission européenne et dont je salue avec un très grand plaisir la présence parmi nous, connaissant ses convictions et son engagement sur les questions qui vont être abordées tout au long de ce colloque, je tiens à lui confirmer que nous serons bien évidemment particulièrement attentifs à l'évolution de la réglementation européenne régissant de tels réseaux d'observation, et plus précisément aux modalités de mise en place, à la suite du programme Forest Focus, du nouveau programme européen LIFE +, programme auquel la France, comme bon nombre d'États membres, souhaitera sans nul doute activement participer.

Car, vous vous en doutez bien, les résultats et acquis du réseau RENECOFOR n'auraient pas été possibles sans l'obtention de financements au niveau requis. Juste après mon allocution d'ouverture, il reviendra d'ailleurs aux partenaires financiers d'intervenir devant vous. Je serai donc très synthétique sur ce point, qui est au demeurant un point capital, en mentionnant que, de 1992 à 2006, c'est-à-dire sur les 15 premières années d'existence de RENECOFOR, ce sont près de 20 millions d'euros qui auront été utilisés par ce réseau. Grâce tout d'abord à la Commission Européenne qui a financé 44 % du total de ces dépenses, grâce aussi à l'Office national des forêts qui en a couvert 40 %,

grâce ensuite au ministère de l'agriculture et de la pêche, présent depuis l'origine aux côtés de l'ONF, qui en aura financé 12 % en moyenne sur cette période et qui a, cela mérite d'être souligné et salué, décidé de relever sensiblement son niveau d'intervention en 2007, grâce enfin à l'Ademe, pour 3 %, et au ministère de l'écologie et du développement durable, pour 1 %, ce ministère n'étant intervenu financièrement qu'au cours des cinq premières années du réseau, soit de 1992 à 1996. Concernant l'ONF, il faut également noter que l'intérêt de ce réseau a été explicitement reconnu dans le contrat État-ONF récemment signé, à savoir en juin 2006, à Épinal, ce contrat d'objectifs et de moyens étant applicable à la période 2007-2011.

Je tiens de même à souligner que l'organisation de ce colloque n'aurait pas été possible sans l'accueil et l'hospitalité de la ville Beaune, d'une part, sans l'appui financier du ministère de l'agriculture et de la pêche, du ministère de l'écologie et du développement durable et de l'ADEME, d'autre part. Je les en remercie chaleureusement au nom de l'Office national des forêts, au nom du comité d'organisation et en votre nom si vous me le permettez.

Enfin, comment ne pas rendre hommage avant de démarrer nos travaux aux chevilles ouvrières de la présente manifestation, je pense aux membres du comité d'organisation du colloque, à savoir, par ordre alphabétique : Christiane Baroche, Yves Birot, Laurence Bourjot, Nathalie Bréda, Isabelle Chuine, Étienne Dambrine, Christian Elichegaray, Laurence Galsomiès, Madeleine Günthardt-Goerg, Guy Landmann, Patrice Mengin-Lecreulx, Jean-Luc Peyron, Brigitte Pilard-Landeau, Anne Probst, Ernst Schulte et Erwin Ulrich. Mille mercis pour votre engagement, la qualité de vos travaux préparatoires et votre travail de longue haleine. Je vous demande de les applaudir car ils l'ont bien mérité. Et maintenant, que la fête soit belle ! ou, plutôt, bonne concentration, bonne participation, bons échanges ! À vous tous de jouer !

Je déclare donc à présent ouvert le colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers : résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR ».

Et je demande aussitôt, pour rentrer dans le vif du sujet,
- à Ernst Schulte, chef du secteur Forest Focus à la Direction Générale Environnement de la Commission Européenne ;
- à Ségolène Halley des Fontaines, Sous-directrice de la Forêt et du Bois au ministère de l'Agriculture et de la Pêche ;
- à Laurence Galsomiès, du département Surveillance de la Qualité de l'Air à l'Ademe ;
- et à Patrice Mengin-Lecreulx, chef du département Recherche à l'Office national des forêts, de monter à la tribune pour démarrer nos travaux et vous présenter les allocutions des partenaires financiers actuels du réseau.

Jacques VALEIX
Directeur technique
et commercial bois
de l'Office national des forêts
jacques.valeix@onf.fr

RENECOFOR, ONF

Allocutions des partenaires financiers

RENECOFOR, ONF

Allocution de la Commission européenne

Monsieur le Président, chers amis, je suis très fier et honoré de participer à ce colloque dont l'objectif est de rendre compte de 15 ans de suivi des forêts et d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le réseau RENECOFOR.

À la demande des États membres, la Commission européenne soutient depuis 1987 les différents programmes européens de surveillance des forêts, suite, dans un premier temps, à la problématique des pluies acides. Puis les observations en forêt se sont étendues à d'autres thèmes comme les questions liées au changement climatique, la biodiversité, les sols, l'eau et la protection des forêts en général.

Je tiens à exprimer toute notre gratitude aux Français qui, dès le départ, ont joué un rôle moteur dans la formulation des programmes européens. Ils se sont montrés très actifs et ont fait partager leur grande expérience.

Comme cela a été rappelé en ouverture, le dernier programme financier « Forest Focus » est arrivé à son terme en décembre 2006. Il sera remplacé par le règlement « LIFE + », LIFE étant l'acronyme de l'instrument financier pour l'environnement. Ce règlement portera sur la période 2007-2013.

Pour l'heure, les États membres et la Commission négocient le futur système européen de surveillance des forêts. Dans la mesure où l'observation des forêts sera désormais une action volontaire, rien n'assure que tous les États membres s'y plieront. Certains ont même déjà fait savoir qu'ils ne participeraient pas à la surveillance des forêts.

Pour conclure ce court exposé, je tiens à vous rappeler qu'aujourd'hui est la date anniversaire de la déclaration sur la reconstruction de l'Europe prononcée par Robert Schuman en 1950.

Ernst SCHULTE
Chef du secteur « forêt »
à la direction générale
Environnement
Commission européenne
ernst.schulte@ec.europa.eu

Allocution du ministère de l'Agriculture et de la Pêche

Mesdemoiselles, Mesdames,
Messieurs,

En ouverture à ce colloque, je voudrais en premier lieu insister sur les objectifs très ambitieux du projet dans lequel s'inscrit le réseau RENECOFOR : un suivi des écosystèmes forestiers, à long terme - avec une durée initiale prévue de 30 années - et à l'échelle européenne.
Un projet d'une telle ampleur ne peut naturellement se développer et perdurer sans aléas, sans interrogation. C'est pourquoi je tiens à souligner en préambule que ce suivi a bien été mis en place, avec plus de 800 placettes au niveau européen dont 100 placettes pour la France, qu'il fonctionne depuis maintenant 15 années et, nous aurons l'occasion de le vérifier au long de ce colloque, combien ce réseau a été productif et riche d'enseignements.

Le ministère de l'Agriculture en charge de la forêt s'est fortement impliqué dès l'origine dans ce projet, c'est-à-dire dès la préparation de la résolution S1 de la première conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe qui s'est tenue à Strasbourg en 1990.

Cette résolution S1, qui constitue l'acte officiel de naissance du réseau de suivi intensif, et donc de RENECOFOR, a été préparée en étroite coopération entre les délégations des ministères finlandais et français. Pour être plus précis, du côté français, les deux chevilles ouvrières de ce projet ont été, pour l'ONF, M. Georges Touzet directeur général et, pour le ministère, M. Christian Barthod, alors responsable du département de la santé des forêts, que je salue ici.

L'Office national des forêts a donc été chargé de mettre en place ce réseau de suivi, installé en très grande partie en forêt domaniale pour disposer de la stabilité foncière nécessaire à un projet à long terme.

Le ministre chargé de la forêt a ainsi soutenu le réseau RENECOFOR au moment de son installation et tout au long des 15 années qui viennent de s'écouler. Ce soutien a bien sûr été un soutien **financier**, avec un financement direct, régulier et très significatif, à hauteur de 12 % des dépenses engagées. Ce soutien s'est aussi manifesté au niveau **institutionnel** dans la mise en œuvre de mécanismes communautaires, pour que RENECOFOR bénéficie des cofinancements européens dans le cadre du règlement « Pollution atmosphérique » jusqu'en 2002, et dans le cadre du règlement Forest focus de 2003 à 2006.

Cet appui institutionnel et financier a été plus particulièrement confié au département de la santé des forêts du ministère de l'Agriculture et de la Pêche qui, en outre, depuis l'origine coopère avec les gestionnaires du réseau et suit leur activité et leurs résultats avec le plus vif intérêt.

L'année 2007 est une année charnière pour RENECOFOR, comme pour l'ensemble du suivi des forêts car l'abrogation du règlement Forest Focus et l'adoption du règlement LIFE + suspendent pour cette année, et mettent en question pour le futur, le financement européen, dont il faut tout de même rappeler qu'il couvre près de la moitié du coût de RENECOFOR.

À cet égard, je voudrais remercier vivement tous les autres partenaires publics et financiers du réseau qui ont cru en cet outil utile, à tous les gestionnaires, et les acteurs de la politique forestière et de la politique de qualité de l'air. Je pense en particulier à la Commission européenne, au MEDD, à l'ADEME, et naturellement à l'ONF. Je voudrais ici les remercier de leur appui déterminé.

Je veux dire aujourd'hui combien est forte la volonté du ministère de continuer à soutenir avec vigueur et détermination ce réseau :
- à le soutenir sur le plan politique en œuvrant pour faire perdurer sa dimension européenne, à la fois sa cohérence et son cofinancement européens ;
- et à le soutenir sur le plan financier.
C'est dans cet esprit que le ministère chargé de la forêt a décidé en 2007 d'augmenter substantiellement sa participation financière pour assurer temporairement la pérennité du réseau dans l'attente d'un nouveau cofinancement européen.

Pour l'avenir, je voudrais que tous les partenaires, qui confirmeront, je n'en doute pas, l'utilité de cet outil, se mobilisent collectivement pour que ces actions se poursuivent et soient soutenues dans le cadre du nouveau règlement LIFE +, qui devrait être validé par le parlement européen en juin 2007. Il faut que l'ONF mobilise ses homologues, via l'association des forêts d'état européennes (EUSTAFOR), pour se mettre en situation de répondre à l'appel d'offres LIFE + dès l'automne prochain, avec le soutien naturellement du ministère de l'Écologie.

Au-delà du contexte institutionnel et financier, je voudrais insister sur les raisons objectives de notre conviction à soutenir ce dispositif, c'est-à-dire le grand intérêt pour les résultats acquis, pour les informations diffusées et pour les potentialités de ce réseau.

Conçu dans un contexte de « pluies acides » et de pollution atmosphérique, RENECOFOR se révèle un dispositif remarquable et irremplaçable pour aborder les problématiques relatives au changement climatique, avec comme atout majeur une antériorité de 15 années d'observations.

Je terminerai cette intervention en évoquant **les apports de RENECOFOR et la communication** autour de ce réseau.

Tout d'abord, les résultats de RENECOFOR ont contribué directement à de nombreuses publications, parmi lesquelles on peut citer les indicateurs de gestion durable dont la dernière mise à jour a été publiée en 2006, les cartes de charges critiques et les cartes des dépôts de polluants atmosphériques.

De façon peut-être plus discrète, les résultats acquis dans le cadre de RENECOFOR et dans le cadre des autres dispositifs de suivi des forêts sont utilisés dans toutes les réflexions relatives à la forêt, à la

politique forestière et à la gestion forestière, parmi lesquels on peut citer entre autres les documents cadre de la gestion forestière (SRGS, DRA, SRA…) que le ministre chargé de la forêt approuve régulièrement.
Les résultats des réseaux d'observations ne sont suffisamment diffusés que vers un public très spécialisé. J'ai la conviction que ces résultats gagneraient encore plus à être communiqués vers d'autres publics tels que les décideurs, les propriétaires forestiers, voire le grand public, pour le plus grand bénéfice de la politique forestière, ce qui sera, je crois, l'un des points forts qui sera discuté à la table ronde de vendredi sur les enjeux forestiers et les partenariats.

Ségolène HALLEY DES FONTAINES
Sous-directrice de la forêt et du bois
Ministère de l'Agriculture
et de la Pêche
Direction générale de la forêt
et des affaires rurales
segolene.halley-des-fontaines@agriculture.gouv.fr

Allocution de l'ADEME
Les observatoires de la qualité de l'air, et le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

Améliorer et préserver la qualité de l'air est un enjeu environnemental majeur et une priorité pour l'ADEME dans le cadre de ses missions de surveillance et de lutte contre les émissions de polluants. Rappelons que les problèmes de la qualité de l'air se caractérisent en premier lieu par leur diversité et leur étendue spatiale et temporelle, et qu'il est bien établi qu'ils peuvent se manifester au voisinage immédiat de sources d'émissions, mais aussi en zones rurales puis à l'échelle planétaire. Les enjeux concernent la santé de l'homme, des écosystèmes, ainsi que la préservation du climat. La surveillance de la pollution de l'air s'est notablement développée dans notre pays et en Europe, notamment en milieu urbain en vue de veiller au respect des directives et de réglementations visant à préserver en premier lieu la santé de l'homme. Mais il convient de ne pas non plus négliger les effets de la pollution atmosphérique sur des éléments sensibles de l'environnement tels que les écosystèmes touchés également par des pollutions d'origine rurale ou transfrontière (pluies acides dans le passé, ou ozone et dépôts azotés de nos jours). Leur préservation est essentielle, y compris en raison de leur rôle dans le cycle du carbone et de leur contribution à la régulation du climat.

D'une manière générale, les actions d'observation constituent un maillon clé des politiques de protection de l'environnement car elles permettent d'évaluer leur efficacité et de disposer d'indicateurs pertinents pour guider les actions. Pour ces raisons l'ADEME est très présente dans le domaine des observatoires en matière de qualité de l'air, et ses actions s'inscrivent notamment dans le cadre de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE, 1996) et des engagements européens ou internationaux ratifiés par la France (convention de Genève de 1979 sur la pollution de l'air à longue distance, etc.).

L'ADEME exerce, en vertu de la LAURE, une mission de coordination technique du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant mis en œuvre par 37 associations de la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) agréées par le ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD). Depuis 1996, ce dispositif en France a connu une forte croissance et des dispositifs de cartographie et de prévision de la qualité de l'air (PREVAIR), issus de recherches souvent initiées par l'ADEME, ont été déployés au niveau national afin de compléter les moyens de surveillance des AASQA.

Mais la surveillance de l'air ne doit pas se limiter à la surveillance de polluants réglementés en zones urbanisées. Les problèmes de qualité de l'air découlent de plus en plus souvent de transferts de polluants à longue distance en mesure d'affecter les écosystèmes (cas de l'ozone). Dans le cadre de la convention de Genève sur la pollution de l'air à longue distance, l'ADEME a provoqué et soutient les actions de surveillance de la pollution atmosphérique de fond en zone rurale menées au moyen notamment des dispositifs MERA et BRAMM (respectivement : mesure en milieu rural des retombées humides et biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses). Elle a été également historiquement associée aux actions de recherche sur les effets des polluants de l'air sur les écosystèmes entreprises dans les années 1980 sur les pluies acides (programme DEFORPA), et de ce fait apporte son soutien au dispositif RENECOFOR géré par l'Office national des forêts. Ces divers outils de surveillance sont complémentaires et des liens sont établis entre eux.

Parmi les 102 sites du dispositif RENECOFOR, 27 sont dédiés entre autres au suivi des dépôts atmosphériques totaux (sous-réseau

CATAENAT ; charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres). C'est dans le cadre de ces mesures particulières sur les apports de la pollution atmosphérique, que l'ADEME est devenue un proche partenaire de l'ONF en cofinançant cet observatoire depuis sa création, il y a déjà 15 ans. Les données issues du réseau RENECOFOR et du sous-réseau CATAENAT sont transmises, dans le cadre du programme international concerté sur le suivi des forêts (PIC Forêt), aux instances de la commission économique des Nations unies pour l'Europe et de la convention de Genève relative à la pollution atmosphérique à longue distance.

En conclusion, les impacts de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes ne sont pas à négliger et c'est d'ailleurs autour du concept de charges critiques[1] qu'ont été définis les plafonds d'émissions du protocole de Göteborg adopté en 1999 dans le cadre de la convention de Genève CEE-ONU de 1979 sur la pollution atmosphérique à longue distance. Les plafonds d'émission de polluants de la directive 2001/81/CE ont également pour objectif une réduction de 50 % des dépôts acides excessifs sur les zones touchées, notamment au niveau des écosystèmes, et une réduction de 30 % environ de la charge d'ozone sur les cultures. Ces éléments constituent de bonnes raisons pour que l'ADEME continue de soutenir à des observatoires tels que le dispositif RENECOFOR.

Christian ELICHEGARAY
Laurence GALSOMIÈS
Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie
Département surveillance
de la qualité de l'air
christian.elichegaray@ademe.fr
laurence.galsomies@ademe.fr

Allocution de l'Office national des forêts

L'origine du réseau

Les pluies acides et la pollution atmosphérique ont été au cours des années 80 un grand sujet d'inquiétude pour la société, et tout particulièrement pour les forestiers.

Sur la base des programmes de recherche engagés au niveau européen, la première conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe a été organisée à Strasbourg en 1990. MM. Georges Touzet, directeur général de l'ONF à l'époque, et Christian Barthod, alors responsable du département de la santé des forêts, étaient particulièrement impliqués dans la préparation de cette conférence. La première résolution de la conférence identifiait la nécessité de mettre en place un dispositif de surveillance à long terme du fonctionnement des écosystèmes forestiers.

Dans cet esprit ont été créés le réseau européen de surveillance des forêts (1987) sur la base d'une maille de 16 par 16 km (qui a relayé le « réseau bleu » avec une maille d'observation de 1x16 km sur des massifs ciblés), le réseau des correspondants observateurs de la santé des forêts (1988), et le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR).

La création de RENECOFOR, en 1992, s'inscrivait alors sans hésitation dans la durée (au moins 30 ans), avec pour objectif de mieux connaître le fonctionnement des écosystèmes forestiers et leur réaction à des perturbations, l'accent étant mis à l'époque sur la pollution atmosphérique. L'apport de séries longues et cohérentes de données est en effet irremplaçable dans ce domaine.

L'ONF, porteur du projet, a mis en place les 102 placettes du réseau en forêt publique. Le plan de financement des cinq premières années du réseau reflète l'implication des différents partenaires à l'époque : 47 % Union européenne, 27 % ONF, 15 % ministère chargé de la forêt, 9 % ministère chargé de l'environnement, 1 % AQA (agence pour la qualité de l'air)/ADEME, avec un budget annuel moyen de l'ordre d'un million d'Euros hors taxes.

Le chemin parcouru

Le réseau RENECOFOR a fait l'objet d'une mise en œuvre rigoureuse. La qualité de ce réseau, soulignée par tous les partenaires de l'ONF, doit beaucoup à l'engagement des quelque 200 responsables de placettes et suppléants, fidèles au poste quel que soit le temps, à celui de l'équipe de coordination du réseau et tout particulièrement à Erwin Ulrich, recruté à

[1] *Seuils des flux d'entrées dans les écosystèmes au-delà desquels des effets nocifs peuvent apparaître (Nilsson et Grennfelt, 1988), ou dose d'exposition à un ou plusieurs polluants atmosphériques au dessous desquelles aucun effet indésirable ne sera perceptible sur des éléments sensibles de l'environnement, dans l'état actuel des connaissances*

l'époque par l'Office pour le mettre en place et qui a piloté et animé le réseau avec brio depuis lors. Cela mérite d'être souligné. Qu'ils en soient tous remerciés ici.

Je tiens également à évoquer l'engagement des correspondants observateurs de la santé des forêts, qui ont assuré avec constance cette fonction de surveillance, dont l'importance est ici réaffirmée dans la perspective du changement climatique. Qu'ils en soient remerciés également.

On dispose à présent d'un outil d'observation du fonctionnement des forêts efficient, bien rodé, bénéficiant d'une assurance qualité, et bien approprié par les personnels de l'ONF qui y sont impliqués. C'est un résultat en soi. Le réseau est également un lieu de mise au point de méthodes propres à l'observation sur des sites multiples et sur la durée, le suivi de la composition floristique par exemple.

L'acquisition de données est l'activité de fond du réseau, avec une base de données constituée à ce jour de 60 millions d'enregistrements. Après une dizaine d'années de fonctionnement, la valorisation des premières séries temporelles de données a pu monter en puissance, en procédant domaine par domaine dans un premier temps.

Quelques exemples de valorisation :

- la connaissance de la situation et de l'évolution des dépôts atmosphériques, avec une cartographie établie sur la base d'un modèle à l'échelle du pays ;
- la connaissance, inédite à l'échelle du pays, de la composition des sols forestiers français (notamment le carbone et l'azote) ;
- une contribution importante au calcul des charges critiques en acidité, azote et actuellement métaux lourds ;
- la mise en évidence de symptômes provoqués par l'ozone sur les arbres, arbustes et plantes herbacées en forêt ;
- l'observation de la phénologie forestière (RENECOFOR étant jusqu'à présent le seul réseau opérant dans ce domaine), et l'établissement de modèles de prédiction de la phénologie ; c'est un domaine particulièrement important dans la perspective du changement climatique.

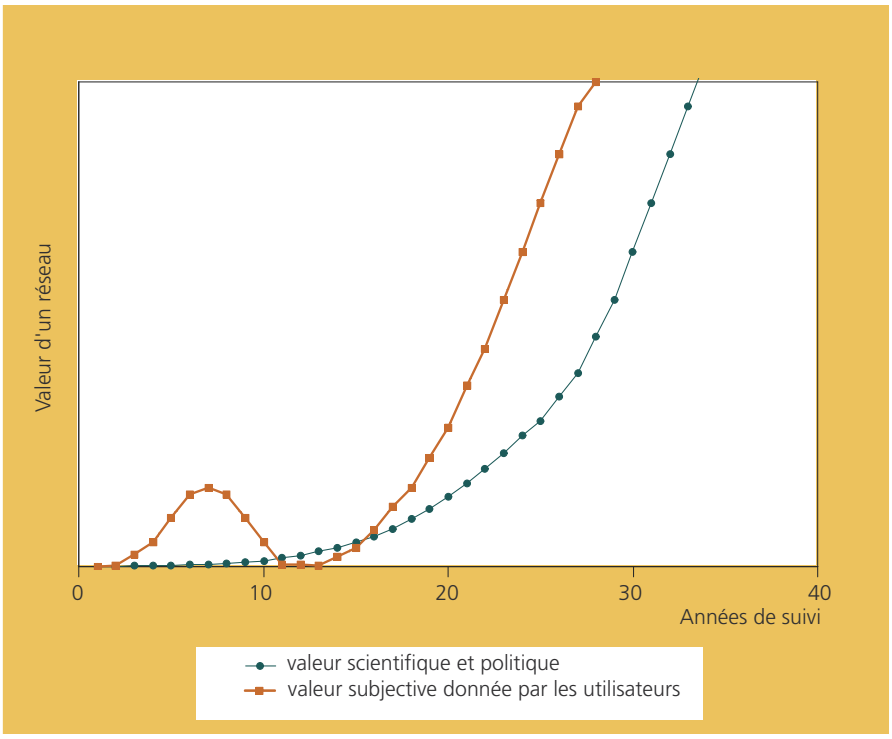


Fig. 1 : évolution théorique de la valeur scientifique, politique ou subjective attribuée par les personnes intéressées par un réseau le long de sa durée ; la valeur n'a pas d'unité car elle est très individuelle

La communauté scientifique est particulièrement impliquée dans la valorisation des données. Depuis l'origine, près de deux cents chercheurs ou experts (cent dix français et quatre-vingt-dix étrangers) ont publié des travaux utilisant les données du réseau. Cinquante-cinq environ (dont dix à l'étranger) sont en contact très régulier avec la cellule de coordination du réseau. Ils relèvent de vingt-cinq organismes de recherche ou de bureaux d'études différents. Le réseau mériterait toutefois d'être encore plus largement connu, compte tenu de la qualité et de l'originalité de ses données (de telles séries continues sont rares).

On peut schématiquement représenter (figure 1) la valeur intrinsèque d'un tel réseau, et la valeur que peut en percevoir un public non averti. La perception de la valeur est forte au début, en lien avec le phénomène déclencheur (les pluies acides en l'occurrence), puis s'installe une certaine lassitude. Cette perception de l'intérêt peut ensuite être réactivée par la valorisation des données, également par des questions émergentes, telles que le changement climatique actuellement. La valeur intrinsèque de

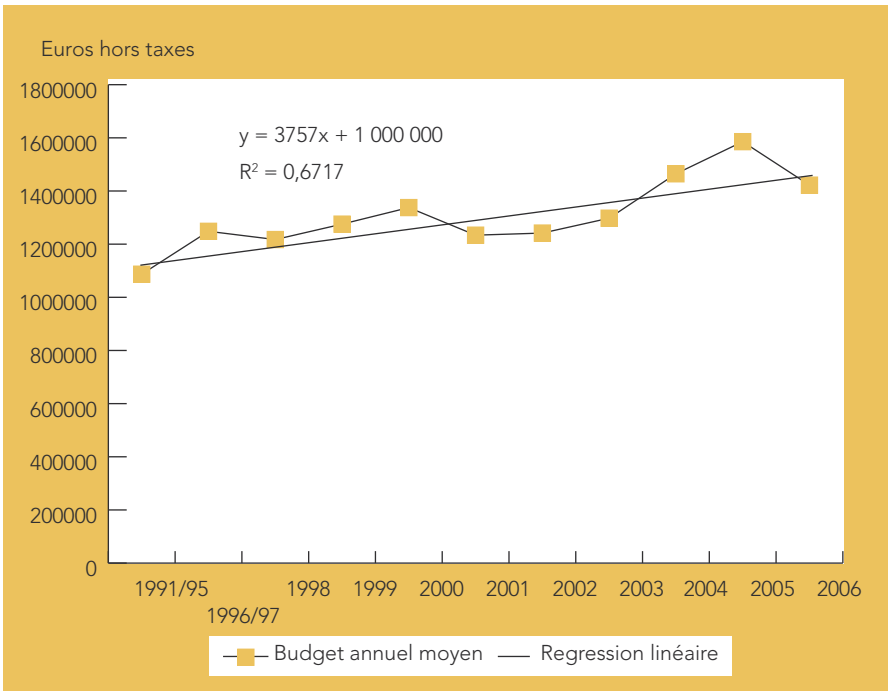


Fig. 2 : évolution du budget annuel du réseau RENECOFOR de 1991 à 2006 en Euros hors taxes ; ce budget comporte tous les coûts du personnel de l'ONF

séries longues et cohérentes de données, par contre, n'est pas sujette à de telles fluctuations. Elle augmente avec le temps, au sens de la capacité à pouvoir répondre aux interrogations (identifiées ou à venir) concernant le fonctionnement (ou le dysfonctionnement) de la forêt dans un environnement qui évolue.

Enfin, sur la période des 15 années écoulées, le budget cumulé total, de l'ordre de 20 millions d'Euros hors taxes, a été pris en charge ainsi : 44 % Union européenne, 40 % ONF, 12 % MAP, 3 % ADEME et 1 % MEDD. Je tiens ici à souligner l'engagement de tous ces partenaires financiers au service de cette mission d'intérêt général, et à les en remercier. Comme vous pouvez le constater, le financement européen a été particulièrement déterminant. L'Office a non seulement été opérateur pour la mise en œuvre du réseau, mais y a également beaucoup investi.

Le présent

Après 15 années de fonctionnement, l'Office a suscité une évaluation scientifique indépendante du réseau. Je tiens ici à remercier tous les membres de la commission d'évaluation qui ont réalisé un travail remarquable et particulièrement approfondi : Anne Probst (CNRS), Anne-Marie Bastrupt-Birk (Centre commun de recherches, Direction de la recherche, Commission Européenne), Myriam Legay (ONF/INRA Nancy), François Lebourgeois (ENGREF Nancy), Guy Landmann (GIP ECOFOR), Jacques Ranger (INRA Nancy), Jean-Luc Dupouey (INRA Nancy) et enfin Franck Jacobée (à l'époque au MEDD, DNP), qui a coordonné l'exercice.

Il s'agissait d'examiner de manière détaillée le dispositif, de faire des propositions d'ajustements (nombre de placettes, types et périodicités de mesures), en tenant compte des enjeux relevant des questions d'origine ou émergentes (changement climatique), et en cherchant à ajuster les coûts au juste nécessaire.

La commission a produit un rapport d'une grande richesse, de nature à bien éclairer les choix à faire. Le comité scientifique de l'ONF, et tout particulièrement Yves Birot son président, prépare actuellement un avis synthétique sur la base de ce travail de fond. La cellule de coordination du réseau prépare des scénarios financiers en contrepoint de ces avis scientifiques et techniques.

Les perspectives

Ce processus d'évaluation se poursuivra enfin sur le terrain politique, avec des prises de décision sur le format et le financement du dispositif vers l'été 2007. La démarche, engagée par une analyse scientifique et technique et devant aboutir à un positionnement politique, devrait s'être ainsi déroulée sur une année.

L'adaptation du réseau RENECOFOR est donc en cours, avec une équation technique et financière qui reste à résoudre, étant entendu que le changement climatique confirme bien aujourd'hui la nécessité de disposer d'un tel dispositif d'observation du fonctionnement de l'écosystème forestier sur la durée.

Le contrat État-ONF pour la période 2007-2011 fait explicitement référence à cette nécessité d'observation dans la perspective du changement climatique

(je cite) : « *L'ONF développera, en intégrant les acquis des réseaux existants, notamment RENECOFOR, des missions d'observation, de veille, d'évaluation dans les domaines sanitaires, de la biodiversité, des changements climatiques et des risques naturels.* »
Face au changement climatique, il faut tout à la fois traduire les résultats de la recherche pour adapter la gestion, développer des recherches spécifiques, et se donner enfin les moyens d'observer ce qui se passe réellement. Nous avons tous en mémoire des scénarios de déplacements assez significatifs à l'échelle de ce siècle des aires climatiques potentielles des espèces forestières. La recherche et le suivi continu doivent avancer de concert pour mieux cerner et anticiper de telles évolutions.
L'observation (ou encore le « suivi continu ») devient ainsi un acte de gestion à part entière dans ce contexte nouveau de climat instable, et l'évolution de RENECOFOR est à considérer dans cette perspective. Le suivi continu est plus précisément assuré à travers une multiplicité de dispositifs, plus ou moins intensifs, notamment : l'Inventaire forestier national, le dispositif d'observation de la santé des forêts, le réseau européen, RENECOFOR.

Notre responsabilité collective est de faire en sorte que cet ensemble réponde de la manière la plus efficiente possible à cette nécessité d'observation et d'investigation sur les effets du changement climatique sur la forêt. Cette question interroge chacun des dispositifs. Il est également nécessaire d'examiner les passerelles et les articulations à construire entre ces systèmes pour faire en sorte que l'ensemble réponde mieux aux questions posées. Enfin, la recherche doit être étroitement associée à ces différents stades, étant en capacité de construire des modèles permettant de « faire parler » les données, et de mettre en lumière des évolutions avec le maximum d'anticipation.

On doit également être vigilant vis-à-vis d'initiatives locales de création d'observatoires des effets du changement climatique sur la forêt, qui pourraient être déconnectés des dispositifs nationaux. Il y a là un risque de dispersion et de perte d'efficacité. Pour le dire en quelques mots, détecter et comprendre ce qui se passe localement nécessite d'observer globalement et de manière cohérente. On pourrait faire un parallèle avec les observations et prévisions météorologiques, un domaine que tout le monde connaît bien.

Les gestionnaires, les opérateurs spécialisés dans l'observation forestière et les chercheurs sont donc concernés. Le GIP ECOFOR, au sein duquel ils sont représentés, est un lieu privilégié pour de telles réflexions.

En conclusion

En conclusion, le suivi continu est confirmé comme étant un acte de gestion à part entière dans le contexte du changement climatique. L'évolution de RENECOFOR est construite dans cette perspective, sans oublier les questions posées à l'origine du réseau et qui restent d'actualité. Les gestionnaires forestiers, les opérateurs du suivi continu et les chercheurs doivent également coopérer pour améliorer le dispositif global d'observation français et européen.

Enfin, mais c'est un autre sujet, les changements sur lesquels on doit exercer notre vigilance ne sont pas uniquement climatiques mais plus globaux (pollution atmosphérique, qualité des sols, le bois et l'énergie, le bois et la chimie du carbone, la mécanisation de l'exploitation forestière, etc.).

Patrice MENGIN-LECREULX
ONF, direction technique
Département recherche
patrice.mengin-lecreulx@onf.fr

RENECOFOR, ONF

Ouverture du colloque par Jacques Valeix

Allocutions (de gauche à droite) : Ernst Schulte, Ségolène Halley des Fontaines, Laurence Galsomies, Patrice Mengin-Lecreulx, Jacques Valeix

Erwin Ulrich

Jean-Luc Dupouey

Georges Touzet

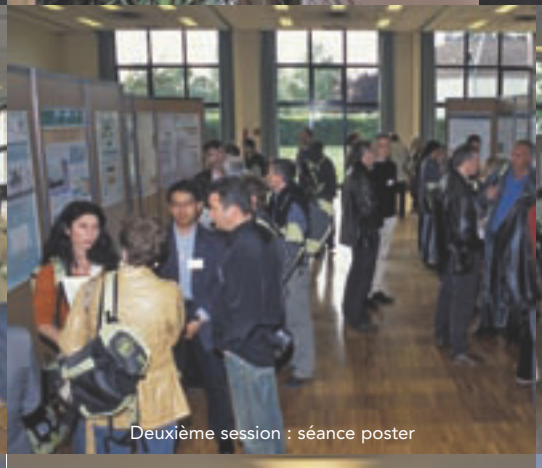
Erwin Ulrich

Marc Lanier

Sylvaine Camaret

Intervenants de la première session présidée par Ernst Schulte

Deuxième session : séance poster


Deuxième session : séance poster

Deuxième session : séance poster

Maurice Bonneau : allocutions en l'honneur des 15 ans de RENECOFOR

Erwin Ulrich

Guy Monzo : présentation d'un extrait du film : « Aigoual, la forêt retrouvée » de Marc Khanne

Fonctionnement et dysfonctionnement des écosystèmes forestiers : pourquoi un suivi intensif à long terme ?

Les écosystèmes forestiers ne fonctionnent pas en régime permanent. Par-delà le cycle sylvicole classique, qui mène de la régénération à la mort des arbres, interviennent des modifications à long terme de leur état et de leur fonctionnement. Dans un même site, le milieu forestier que nous renouvelons aujourd'hui n'est plus le même qu'au siècle dernier et diffère de celui dans lequel interviendra la prochaine régénération, à la fin du 21e siècle. La prise en compte progressive de ce fait constitue l'une des évolutions majeures de l'écologie forestière au cours des 30 dernières années et la mise en place du réseau RENECOFOR en est une des conséquences les plus notables.

Pourquoi une prise de conscience aussi tardive de l'importance des modifications à long terme de l'environnement forestier ? Parce qu'il est justement difficile de séparer les changements « normaux », cycliques, liés au vieillissement des arbres et des écosystèmes, des variations à long terme, non cycliques : les premiers masquaient souvent les seconds ; parce que la paléoécologie nous avait habitués à des évolutions très lentes, à l'échelle du millénaire plutôt que du siècle ; parce que l'Homme a progressivement accru sa pression sur l'environnement, accélérant et rendant plus visibles ces modifications ; parce que les pluies acides ont constitué, dans les années 1980, un coup de semonce salutaire. Quels sont ces facteurs de l'environnement qui évoluent aujourd'hui ?

RENECOFOR, ONF

Comment répondent les forêts à ces perturbations ? Pourront-elles s'adapter à ces changements ou revenir à leur état antérieur ? Autant de questions auxquelles les réseaux d'observation des forêts apportent des réponses précieuses.

Des changements des facteurs environnementaux connus ou moins connus

Notre perception globale des facteurs à l'origine des changements environnementaux n'échappe pas à des effets de mode, ou de loupe

et il n'y a pas forcément proportionnalité entre les effets connus d'un facteur et l'importance que lui accordent les chercheurs, les gestionnaires et le grand public. Les réseaux de suivi de l'environnement, tel que le réseau RENECOFOR, doivent, bon gré ou mal gré, s'adapter à cette volatilité de la demande sociétale. Initialement conçu, au début des années 1980, pour le suivi de l'impact des polluants atmosphériques, RENECOFOR a connu depuis diverses évolutions de la demande qui lui était faite, avec par exemple la montée en puissance des préoccupations liées au changement climatique et à la biodiversité.

Polluants atmosphériques : de multiples questions restent en suspens

Certes, les émissions de soufre, en grande partie à l'origine des pluies acides, ont fortement baissé en intensité, permettant d'envisager une baisse de la pression d'observation sur ce phénomène. Mais les niveaux de dépôts actuellement atteints sont-ils en dessous des seuils critiques pour les écosystèmes forestiers, et ce sur tout notre territoire ? Rien n'est moins sûr, et on continue à observer au cours de cette période des signes d'acidification dans les régions sur sol acide. De plus, cette baisse des niveaux de dépôts acides depuis une trentaine d'années nous offre une opportunité unique d'étudier *in situ* la résilience des écosystèmes forestiers face à ce type de changement de l'environnement. On appelle résilience la capacité de revenir à l'état antérieur après une perturbation. Les écosystèmes forestiers sont faiblement résilients face à une large gamme de perturbations. Ils ne retournent pas rapidement à un état antérieur, contrairement aux écosystèmes à forte vitesse de renouvellement, tels que les cultures par exemple. Ainsi, depuis que les dépôts atmosphériques acides diminuent, on assiste en Angleterre au retour de certaines espèces de lichens comme *Xanthoria polycarpa* mais le lichen pulmonaire, *Lobaria pumonaria*, ne revient toujours pas dans les régions où il avait été observé antérieurement, même trente ans après le pic de pollution (Headley *et al.*, 2001). De nombreuses espèces végétales sont incapables de revenir dans leur habitat après une perturbation, en raison, entre autres, de leur capacité de dispersion très faible.

Les dépôts d'azote, qui contribuent de façon majoritaire à l'eutrophisation des milieux forestiers, ont beaucoup moins nettement régressé que les dépôts soufrés. Les concentrations en ozone de l'air augmentent régulièrement depuis un siècle. L'évolution des concentrations et dépôts d'autres polluants est mal connue. Les dépôts de certains métaux lourds montrent une structuration géographique nette en France et en Europe, qui suggère une origine anthropique (Galsomiès *et al.*, 2005). Mais la dynamique de ces dépôts reste encore à caractériser. L'importance et le rôle des polluants organiques en forêt (pesticides agricoles dans les paysages de forêts morcelées par exemple) sont encore quasiment inexplorés.

Surface forestière et stock de bois en très forte évolution depuis deux siècles

Le contexte socio-économique et ses évolutions sont à l'origine de modifications profondes des paysages forestiers. Deux changements majeurs sont en cours : l'augmentation de la surface forestière et la baisse régulière des niveaux de prélèvement de bois. Le doublement en à peine deux siècles de la surface forestière française, lié à l'intensification des pratiques agricoles, à l'exode rural et à la déprise des terrains cultivés qui en découle, constitue une vraie révolution écologique. Cette progression se poursuit encore. La comparaison de la carte forestière de la France, établie par l'Inventaire forestier national, (IFN) entre les années 1980 et 1990 montre une forte progression du taux de boisement dans l'ensemble du sud de la France (figure 1). Les montagnes de basse altitude en particulier sont envahies par des forêts nouvelles, aux caractéristiques très différentes des forêts

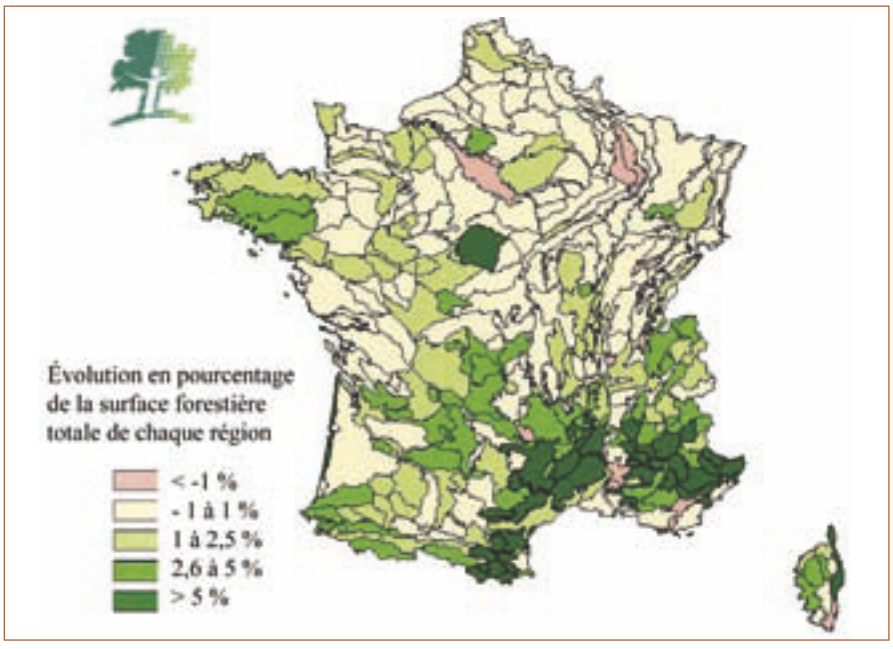


Fig. 1 : évolution de la surface forestière entre les années 1980 et 1990 ; on constate une recolonisation rapide des terroirs agricoles (source : IFN)

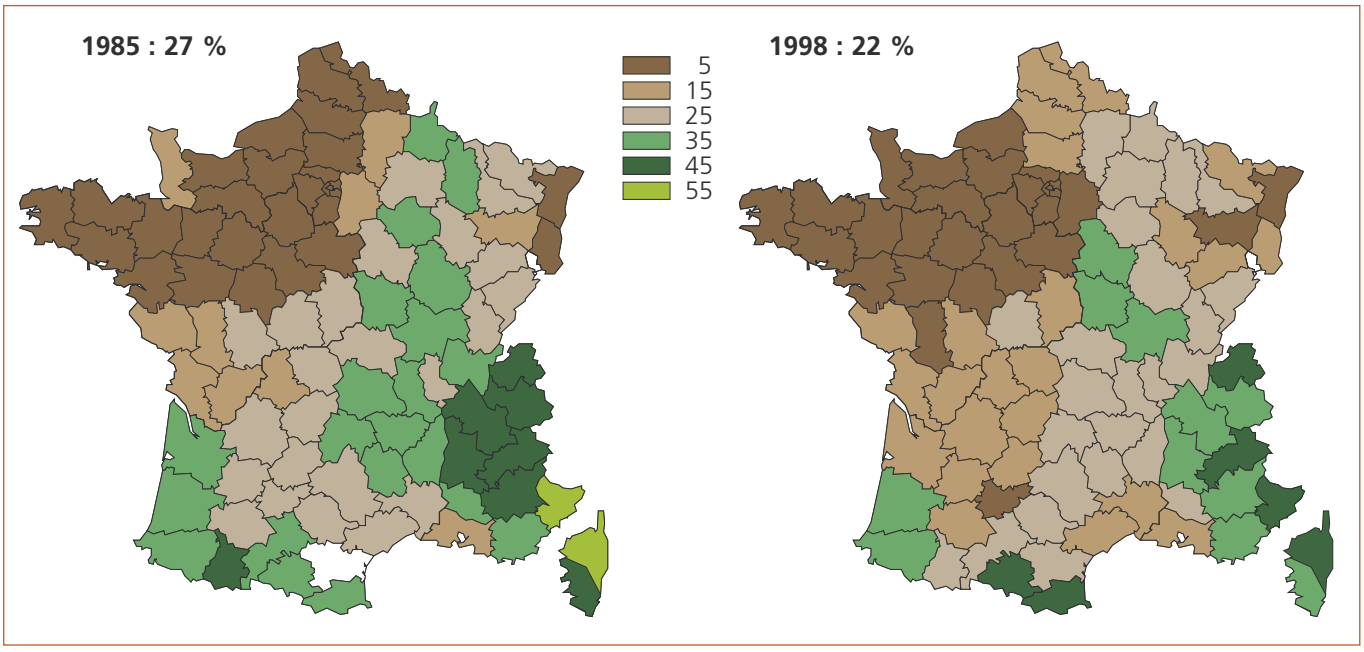


Fig. 2 : un témoin de l'augmentation de la pression anthropique : pourcentage des surfaces forestières situées à plus de 500 m d'une route forestière, par département (source : projet GIP-Ecofor « Corylus » et IFN)

anciennes. Les zones d'abandon cultural se sont aujourd'hui déplacées dans l'ouest de la France où apparaîtront mécaniquement les prochains fronts de recolonisation forestière, si rien ne vient contrecarrer cette progression.

De façon plus ou moins concomitante, on a assisté à une augmentation très importante du volume de bois sur pied dans les forêts existantes. Alors que les forêts françaises étaient, à la sortie du 18e siècle, dans un état de surexploitation bien décrit par de nombreux auteurs, nous sommes aujourd'hui dans une situation globale d'accumulation (à moduler en fonction des régions et des types de propriétaire). Les prélèvements sont à un niveau bas, entre 60 et 70 % de la croissance biologique en moyenne nationale (Dupouey *et al.*, 2006), ce qui conduit à un accroissement rapide des stocks de bois. Après de nombreuses années de baisse des prix de vente et de hausse des coûts de gestion, la demande accrue en bois énergie pourrait venir inverser cette tendance séculaire à l'augmentation des surfaces et volumes forestiers.

On oublie trop souvent l'impact écologique rapide et important que peuvent avoir, à très large échelle, ces changements du contexte économique.

Augmentation de la pression anthropique, accroissement des populations d'herbivores

Venons-en à des changements moins publicisés car considérés, souvent à tort, comme moins importants ou plus faciles à maîtriser. Là encore, il s'agit d'un accroissement, direct ou indirect, de la pression anthropique sur les milieux naturels.

Les dessertes forestières se sont améliorées régulièrement au cours des siècles, suivant en cela la densification globale de l'ensemble du réseau routier et du bâti. Rappelons que, si la surface forestière française a progressé de plus de 70 000 ha par an au cours des années 1990, les surfaces artificielles, goudronnées ou bâties, ont progressé à peu près au même rythme, à raison de 62 000 ha par an (Coutellier, 2003) ! La densification des dessertes forestières, si elle permet bien sûr l'entretien des forêts, contribue aussi, avec d'autres facteurs, à une lente et relativement insidieuse anthropisation des milieux forestiers. Ainsi, le pourcentage de surfaces forestières éloignées des routes forestières a fortement diminué au cours des dernières décennies, en particulier dans les régions de montagne (figure 2). Ce changement environnemental n'est pas anodin, de nombreuses espèces non forestières se dispersant par les routes et les véhicules, collées aux roues par exemple. Les écologistes ont même donné un nom à ce type bien particulier de déplacement des graines, l'« agestochorie ».

L'intensification de la mécanisation est mieux connue. Elle s'est très nettement accélérée depuis la tempête de 1999 qui a nécessité l'emploi massif d'outils de débardage efficaces, mais dans des conditions qui n'étaient pas toujours respectueuses des sols. Les conséquences potentielles sur les sols, la diversité et l'état de santé des forêts sont importantes (Lamandé *et al.*, 2005).

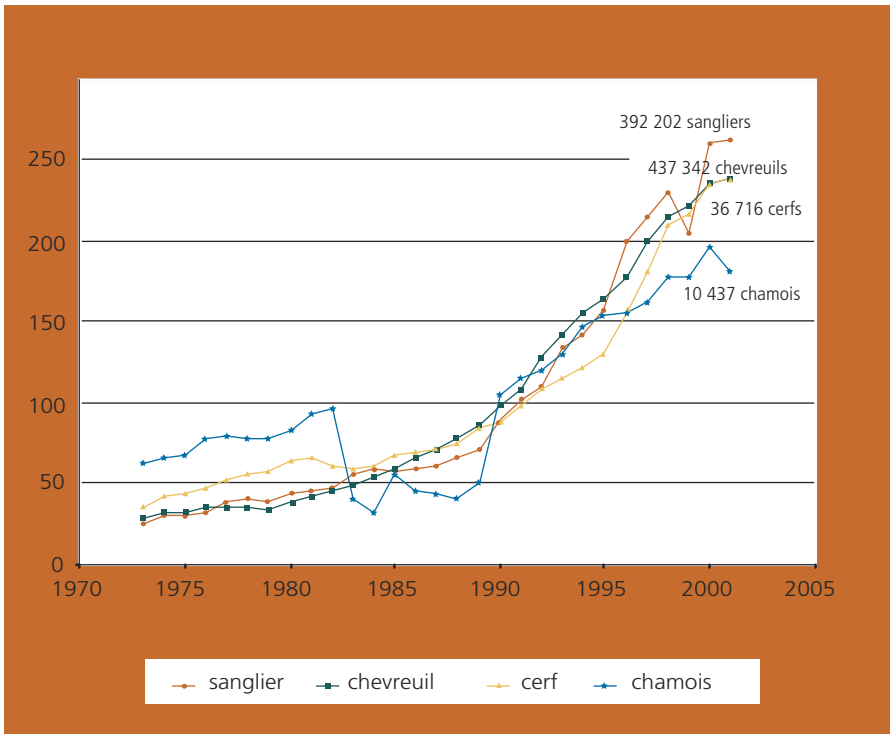


Fig. 3 : un indicateur indirect de l'augmentation de la pression d'herbivorie : évolution des prélèvements par la chasse en pourcentage de la moyenne 1973-2001 (source : réseau Ongulés Sauvages ONCFS/FNC/FDC)

L'anthropisation croissante de la forêt se traduit aussi par l'érosion lente, régulière et importante des zones humides en forêt. Mares et mardelles ont disparu progressivement au cours des siècles, et continuent à régresser à un rythme inconnu, lors des exploitations principalement. L'explosion des populations d'herbivores, sangliers et cervidés (figure 3), constitue un dernier changement lié à la gestion du milieu forestier qui trouve entre autres sa cause dans des plans de chasse visiblement insuffisants, depuis plusieurs années, pour maintenir une population constante, avec des conséquences potentielles fortes sur la biodiversité et la régénération des forêts.

Impact important du changement climatique attendu

Le changement climatique est l'une des préoccupations les plus récentes du monde forestier, mais qui a pris rapidement le pas sur toutes les autres. Quelques remarques peuvent être faites à son propos. Un réchauffement est déjà en cours, puisque les trois dernières décennies du 20e siècle ont montré, en France par exemple, une augmentation de 0,5 °C par décennie de la température moyenne. Au cours de l'ensemble du 20e siècle, l'augmentation avait été de 0,9 °C. En fait, cette augmentation s'est faite en deux phases. Une première phase, jusqu'aux années 1940, culminant avec la sécheresse-canicule de 1947. Puis une stabilité, voire une baisse des températures jusqu'aux années 1970, suivie d'une remontée beaucoup plus rapide depuis. Ces changements sont potentiellement assez importants pour avoir eu des impacts déjà visibles dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Mais la mise en place des réseaux d'observation de la forêt est trop récente pour pouvoir analyser ces premiers symptômes. Ceci souligne le rôle fondamental de l'écologie historique et de la paléoécologie, qui permettent d'apprécier l'impact de ces changements antérieurs pour des périodes où nous ne disposions pas de réseaux d'observation *ad hoc* et d'en tirer des enseignements pour le futur.

Les climatologues prévoient des augmentations beaucoup plus fortes pour la fin du 21e siècle, qui seront déjà très sensibles à partir de 2050. Le problème est que nous ne disposons pas de prévisions, mais seulement de différents scénarios, plus ou moins optimistes selon les situations politiques, sociales et économiques envisagées. Et ces scénarios recouvrent une gamme très large de changements climatiques. Constatons simplement qu'en l'an 2000, le scénario de la croissance la plus rapide du monde envisagé dans le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) conduisait à une augmentation du taux de CO_2 atmosphérique de 2,3 % par an entre 2000 et 2010. Or, entre 2000 et 2005, le taux d'accroissement observé a été de 3,1 % (Canadell *et al.*, 2007) ! Nous sommes sur une trajectoire d'émission de ce gaz à effet de serre plus rapide que celle envisagée dans le pire des scénarios de l'époque. L'incertitude des modèles sur l'évolution des pluies est très forte, bien plus que sur celle des températures. Or, nous savons que la disponibilité en eau contrôle l'évolution des écosystèmes forestiers tout autant que la température elle-même. Cette seule incertitude suffit pour garantir que les prévisions d'impact sur les forêts du changement climatique pour le siècle à venir vont encore beaucoup évoluer. Il reste donc nécessaire de bien comparer divers scénarios, « optimistes » ou « pessimistes », lors de ces exercices de prévision. Badeau *et al.* (2005), dans leurs travaux de modélisation de la niche potentielle des espèces forestières, ont montré qu'en 2100, même dans les scénarios qui prévoient des augmentations modérées de température, le bioclimat de type méditer-

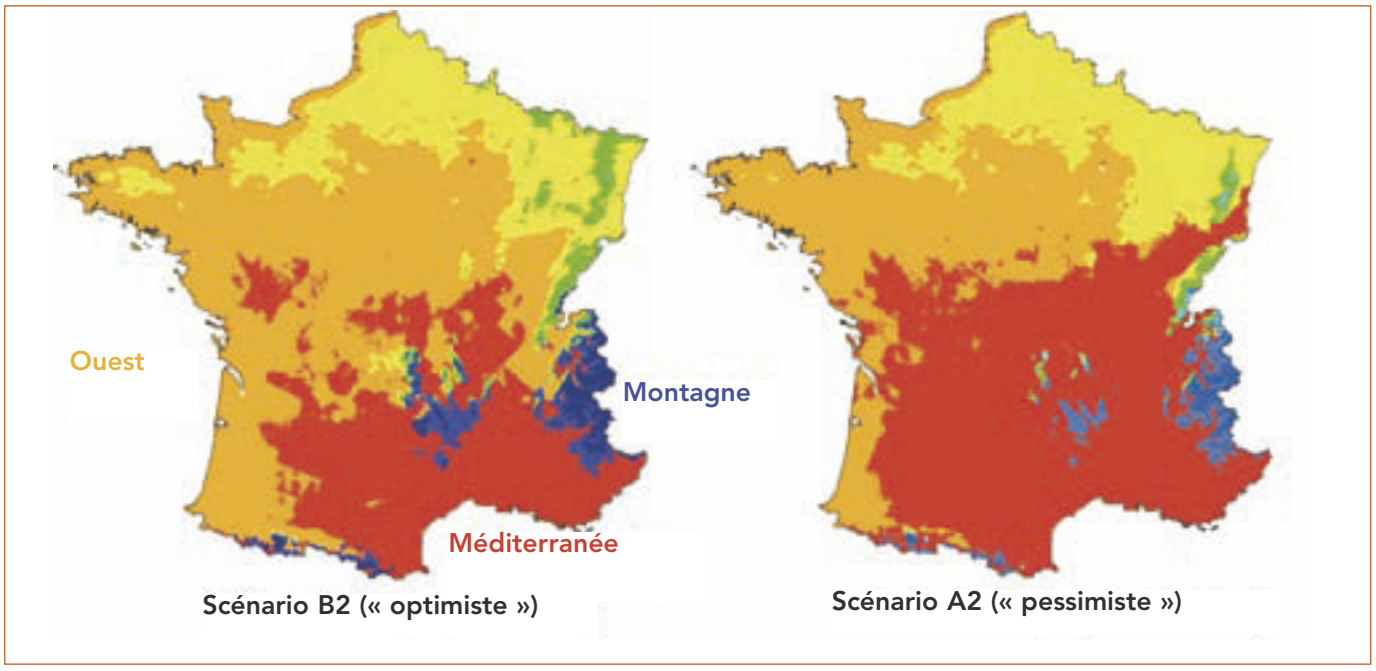


Fig. 4 : emplacement des principaux bioclimats forestiers de France en 2100, selon deux scénarios d'évolution du climat (Arpège-Météo France) (source : Badeau et Dupouey in Roman-Amat, 2007)

Rouge : bioclimat méditerranéen ; orange : bioclimat atlantique ; bleu clair et bleu foncé : bioclimats de montagne ; jaune et vert : bioclimats de type médio-européen.

ranéen remonterait au niveau de la Loire. Dans des scénarios plus pessimistes, cette remontée se ferait jusqu'au niveau de l'Alsace (figure 4). Face à de telles incertitudes, l'observation des évolutions réelles des écosystèmes, dans les réseaux en particulier, restera un élément clef de notre stratégie de réaction aux changements climatiques.

L'impact des changements environnementaux sur les écosystèmes forestiers

Les exemples qui suivent présentent quelques conséquences déjà visibles des changements environnementaux sur les écosystèmes forestiers, en insistant plus particulièrement sur le rôle qu'ont joué les réseaux dans leur mise en évidence ou la compréhension des mécanismes sous-jacents.

Incertitude sur les raisons de l'augmentation de la croissance des arbres

La productivité des peuplements forestiers augmente fortement. L'étude menée par Bontemps *et al.* (2005) sur les hêtraies du nord-est de la France montre une augmentation de la croissance en hauteur dominante des hêtraies de 50 % au cours du siècle écoulé (figure 5 page suivante). Concernant la croissance radiale, ce phénomène avait été mis en évidence par la dendrochronologie dès le début des années 80 et confirmé de multiples fois par différentes voies. Cependant, nous ne savons toujours pas quelles sont les causes exactes de ce changement de productivité. Nous connaissons probablement tous les « responsables » potentiels (changements climatiques, augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère, dépôts azotés, changement d'utilisation des sols) mais nous n'avons pas d'estimation, même grossière, de la part respective de ces différentes causes. Cette ignorance rend délicate toute prédiction des conséquences des changements environnementaux en cours sur la productivité des peuplements. Dans le cadre du protocole de Kyoto, il serait souhaitable de ne pas comptabiliser comme effort de réduction des émissions par un pays signataire cette séquestration supplémentaire de carbone dans la biomasse en croissance, lorsqu'elle n'est pas due à un effort volontaire, ce qui est le cas par exemple de l'impact des dépôts azotés ou de l'augmentation du taux de CO_2 atmosphérique. Seuls les efforts de séquestration supplémentaire, liés à la sylviculture, devraient être crédités. Notre ignorance des mécanismes à l'origine des augmentations de productivité rend très délicate l'intégration de la forêt des pays du Nord dans le protocole de Kyoto.

Sans être à l'origine de la découverte du phénomène, les réseaux ont apporté des éléments importants pour sa compréhension. En analysant la croissance en circonférence des arbres dans l'ensemble du réseau de niveau II européen, dont fait partie RENECOFOR, on a observé par exemple une corrélation spatiale significative entre les niveaux de dépôts azotés, une fois retirés les effets de l'âge et de la densité des peuplements (figure 6). Cette réponse n'est bien sûr pas suffisante pour faire la part des dif-

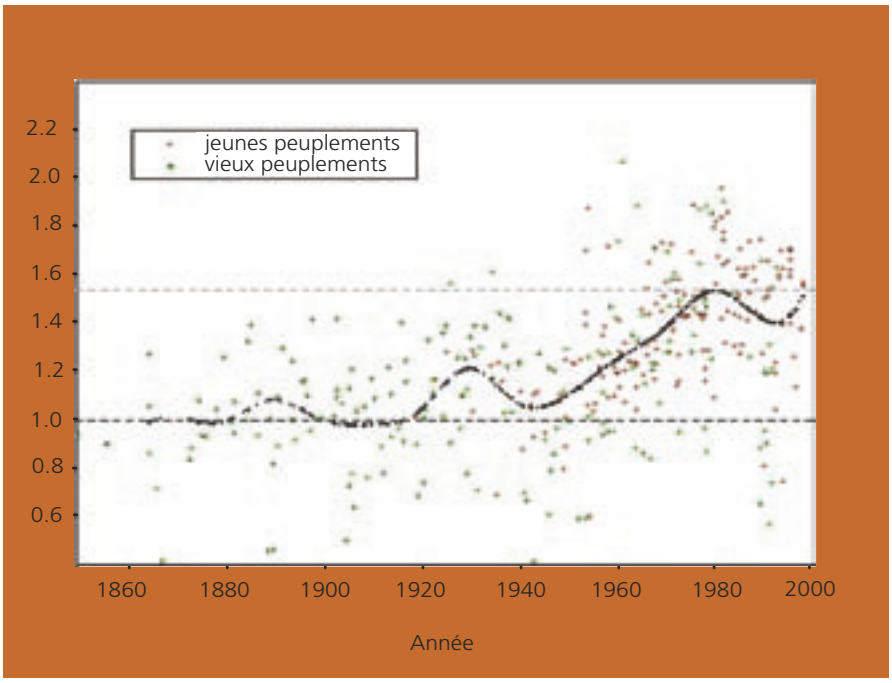


Fig. 5 : évolution de la croissance en hauteur dominante des hêtraies du nord-est de la France (source : Bontemps et al., 2005)

Les valeurs d'accroissement, en abscisse, sont standardisées au niveau 1 en 1900. On constate une augmentation de 50 % en un siècle

férentes causes, mais elle apporte un élément de confirmation au fait que l'azote joue un rôle dans ces augmentations de productivité. Il faut souligner ici l'importance de disposer de réseaux internationaux d'observation. Grâce à leur grande extension spatiale, ces réseaux permettent, en comparant les évolutions de la forêt dans des zones géographiques présentant des facteurs de perturbations variés, à des niveaux différenciés, de mieux comprendre les causes de ces évolutions.

Évolution des sols et de la nutrition des arbres

De façon générale, les premières observations d'effets des changements environnementaux sur la forêt ont été faites en réutilisant des données anciennes de la recherche ou du monde associatif dont la collecte initiale n'avait pas du tout été prévue dans cet objectif. L'évolution à long terme de la fertilité des sols en constitue un bon exemple. En France, les premiers résultats à grande échelle viennent du réseau de recherche des « Hêtraies du Nord-Est » qui, dans les années 1970, avait été installé pour mener des études de typologie des stations et de relations station-production et en aucun cas pour l'étude des changements environnementaux à long terme. On a observé, grâce au rééchantillonnage dans les années 1990 des placettes de ce réseau régional, une baisse alarmante des niveaux de cations (magnésium, calcium) dans le sol (Dupouey *et al.*, 1998) Dans le même temps, le rapport carbone/azote a baissé, principalement du fait d'une augmentation de la concentration en azote. Qu'en est-il dans le reste de la France ? Quelle est, dans le Nord-Est, l'évolution actuelle du phénomène ? Pour répondre en partie à ces questions, les chercheurs attendent avec impatience le rééchantillonnage des sols dans le réseau RENECOFOR, réalisé pour l'instant une seule fois dans la première moitié des années 1990.

Les évolutions de l'environnement provoquent-elles des changements dans la nutrition des arbres ? Le suivi du contenu chimique des feuilles permet d'apporter indirectement des réponses à cette question. Dans le même réseau des hêtraies du Nord-Est, le contenu chimique des feuilles de hêtres montrait, toujours sur la période 1970-1990, une augmentation de la concentration en azote, une baisse des cations et, résultat nouveau et plutôt étonnant lors de sa publication en 2000 (Duquesnay *et al.*), une baisse du taux de phosphore foliaire. Le réseau RENECOFOR a permis de confirmer et de généraliser cette tendance (voir Croisé *et al.*, ce volume). Le résultat obtenu dans le cadre de RENECOFOR est beaucoup plus fiable que les précédents, car il est basé sur des protocoles d'échantillonnage, de prélèvement et d'analyse qui sont restés, contrairement à ceux des chercheurs, homogènes et à un niveau de qualité contrôlé pendant toute la série des observations de 1993 à aujourd'hui.

Il faut souligner l'apport décisif, en complément du suivi dans les réseaux, des résultats obtenus dans divers dispositifs expérimentaux. Ces dispositifs, lorsqu'ils sont suivis sur le long terme, s'apparentent d'ailleurs fortement à des placettes de réseaux d'observation. Dans le cas des modifications de la fertilité des sols, un réseau de 22 sites expérimentaux dans les forêts acides du nord-est de la France a permis de suivre l'impact de l'amendement du sol sur la richesse et la diversité des espèces herbacées. Renaud *et al.* ont observé, à la suite d'apports d'éléments minéraux, une augmentation du nombre d'espèces présentes, mais qui se fait principalement au profit d'espèces à caractère nitrophile et qui sont rarement des espèces forestières

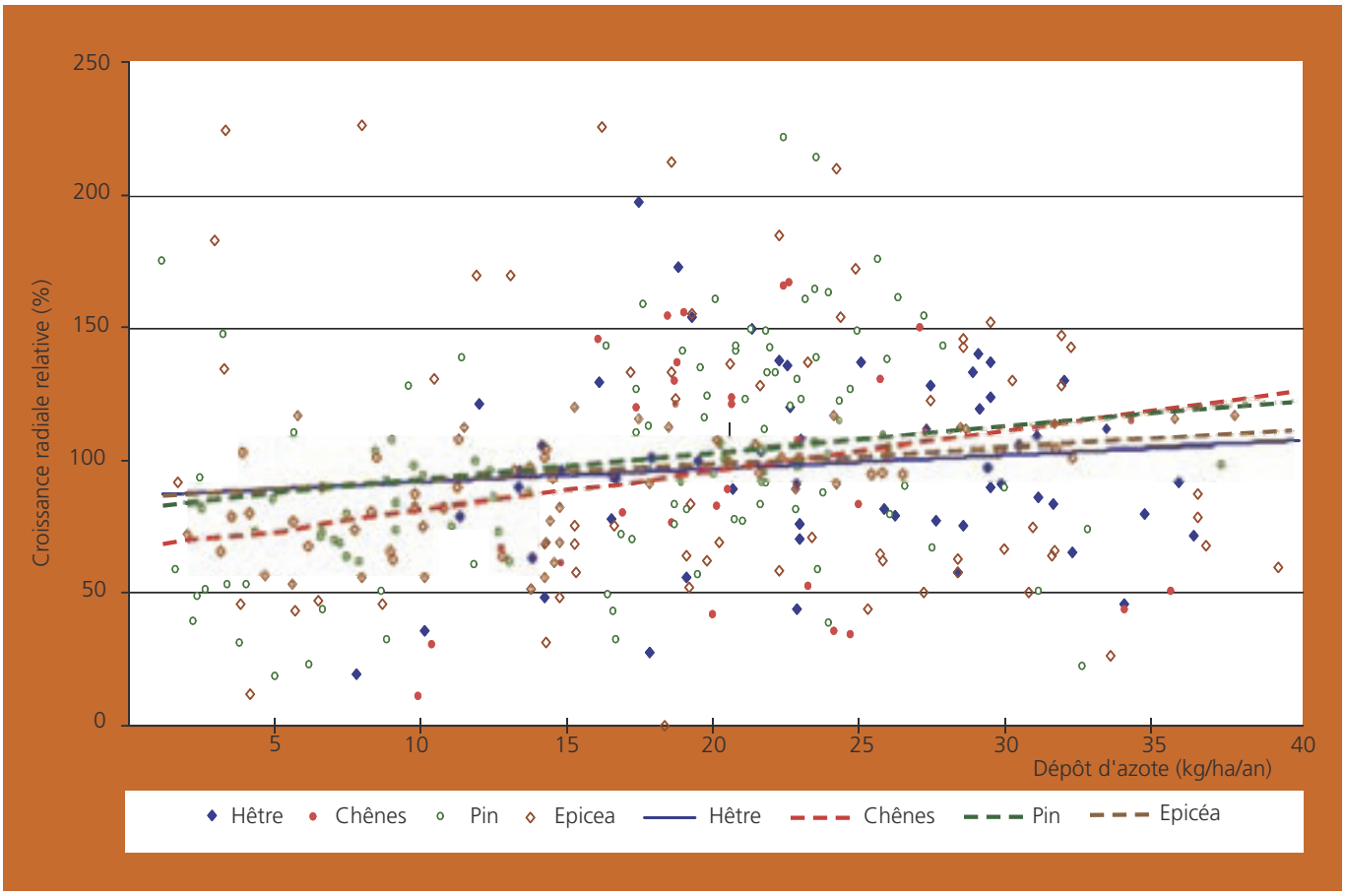


Fig. 6 : relation entre croissance radiale et dépôt d'azote dans le réseau européen de niveau II, dont fait partie RENECOFOR (source : Solberg et al., 2007)

vraies. De plus, ces dispositifs sont suffisamment anciens maintenant pour pouvoir y étudier le retour éventuel de l'écosystème à l'état antérieur à l'amendement. Ces résultats sont extrêmement précieux pour interpréter les suivis de végétation herbacée faits dans les réseaux. La confrontation des résultats expérimentaux avec les données d'observation reste fondamentale dans le processus d'élucidation de l'impact des changements environnementaux globaux sur les forêts.

Influence du changement climatique sur la phénologie des arbres et la migration des espèces

Les êtres vivants dans les écosystèmes naturels réagissent aux changements climatiques par acclimatation sur place, par migration et, à plus long terme, par adaptation génétique. De nombreux chercheurs se sont lancés dans la recherche d'effets déjà visibles du changement climatique en cours, avec un effet de loupe considérable. Les réseaux d'observation nous mettent enfin en situation de suivre certains de ces changements à long terme, de façon fiable et à grande échelle. Quelques modifications du fonctionnement des écosystèmes semblent déjà apparaître. De façon générale, la phénologie des arbres est affectée, avec un allongement de la durée de la saison de végétation d'une dizaine de jours depuis 30 ans. L'observation minutieuse de la pousse des aiguilles de mélèze, en Suisse, montre par exemple une mise en place plus précoce d'une dizaine de jours, depuis une vingtaine d'années (figure 7 page suivante). Ces décalages phénologiques peuvent avoir des effets en cascade sur toutes les composantes de l'écosystème, par exemple sur les insectes phyllophages puis leurs prédateurs. Les observations de déplacement d'espèces sont encore ponctuelles. Dans la végétation, les espèces dites lauriphylles (à larges feuilles pérennes comme le laurier) telle que le houx, semblent bénéficier particulièrement de la diminution du nombre de jours de gel (Cluzeau *et al.*, 2001). Les observations du réseau de surveillance du département de la santé des forêts (DSF), du Cemagref et de l'INRA d'Orléans montrent que cette baisse de la pression de gel a aussi permis la progression de la chenille processionnaire du pin à sa limite nord, de près de 90 km en 30 ans (figure 8).

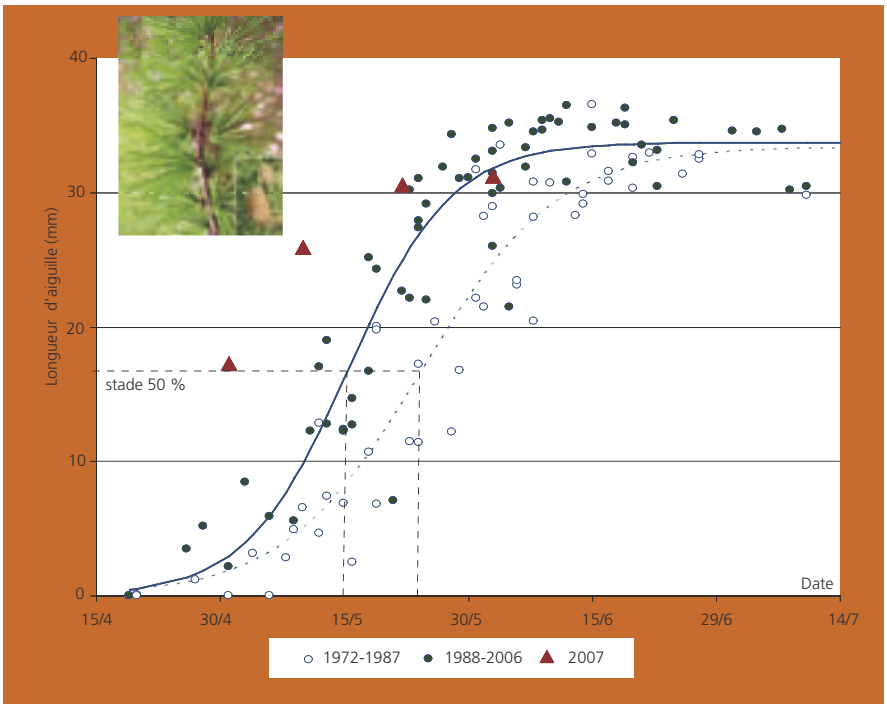


Fig. 7 : phénologie : la durée de la saison de végétation augmente ; exemple de l'allongement des aiguilles de mélèze en Suisse (source : Dobbertin et al., 2007)

Quelle résilience des forêts en réaction au changement climatique ?

Mais l'une des caractéristiques des espèces du sous-bois des forêts est leur très faible capacité de migration et, en conséquence, leur relative inaptitude à la colonisation de nouveaux milieux. C'est une des raisons pour lesquelles, par exemple, la flore des sites anciennement cultivés reste différente de celle des forêts adjacentes, même plusieurs centaines d'années après le retour des forêts sur ces zones précédemment cultivées (Dupouey *et al.*, 2002). On peut donc s'attendre à ce que de nombreuses espèces ne puissent pas, par migration, suivre le rythme prévu de déplacement de leur niche climatique au cours du prochain siècle.

Quand les individus atteignent les limites de leurs capacités d'acclimatation, ils meurent. C'est le cas des arbres lors des grandes sécheresses. Le recul de 15 années de suivi dans le réseau DSF a permis de montrer que l'année 2003 avait dépassé un seuil de sécheresse tel que des mortalités anormales sont apparues. Le taux de mortalité, qui se maintenait à 0,2 % des arbres par an depuis 1989, a grimpé à 0,8 % en 2004. Ce même réseau nous a aussi appris que toutes les espèces, même les plus thermophiles, pourraient souffrir de la remontée des températures. En effet, des mortalités significatives de branches sont apparues sur des essences telles que le chêne pubescent, et le chêne vert est l'une des essences qui a montré les plus fortes dégradations de l'état du feuillage.

Là encore, la faible résilience des écosystèmes forestiers est un facteur important à prendre en compte dans l'analyse de la réaction aux changements climatiques. On sait maintenant que les sécheresses extrêmes ont des impacts qui s'étalent sur de nombreuses années. L'année 1976 a été à l'origine de nombreux dépérissements qui ne se sont pleinement manifestés qu'au début des années 1980, plus de 5 ans après, et qui ont été à l'époque attribués à tort aux seules pluies acides. Mais cette « mémoire » des arbres peut être beaucoup plus longue. Lors d'une attaque en 1993 et 1994 du bombyx disparate en forêt de Haguenau, nous avons observé que, parmi les dominants, les chênes qui sont morts suite à cette défoliation se distinguaient déjà de ceux qui ont résisté, par une perte de croissance plus forte suite aux années de sécheresse des années 1940, et même des années 1920. Les causes de cette « mémoire » ne sont pas bien connues (faiblesse génétique intrinsèque ou affaiblissement des arbres dû aux sécheresses successives), mais elle montre que la compréhension des mécanismes qui affectent la santé des écosystèmes passe par des études sur le long terme.

Aller plus loin pour identifier, connaître et mieux comprendre ces évolutions et leur impact

■ Les réseaux permettent aujourd'hui de généraliser et spatialiser les résultats obtenus plus en amont par des chercheurs sur un nombre souvent très limité de cas, de sites, de placettes et avec des méthodes non standardisées. La télédétection permet parfois de jouer aussi ce rôle, mais pour un nombre de phénomènes encore très limité. Lorsqu'ils auront assez d'années de fonctionnement, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui, les réseaux permettront alors de mettre en évidence de nouvelles évolutions, de nouveaux impacts, jusqu'à là inconnus, en remplaçant avec avantage les études par rééchantillonnage d'anciennes observations de la recherche.

■ Nous ne comprenons pas encore avec suffisamment de précision les causes des changements observés

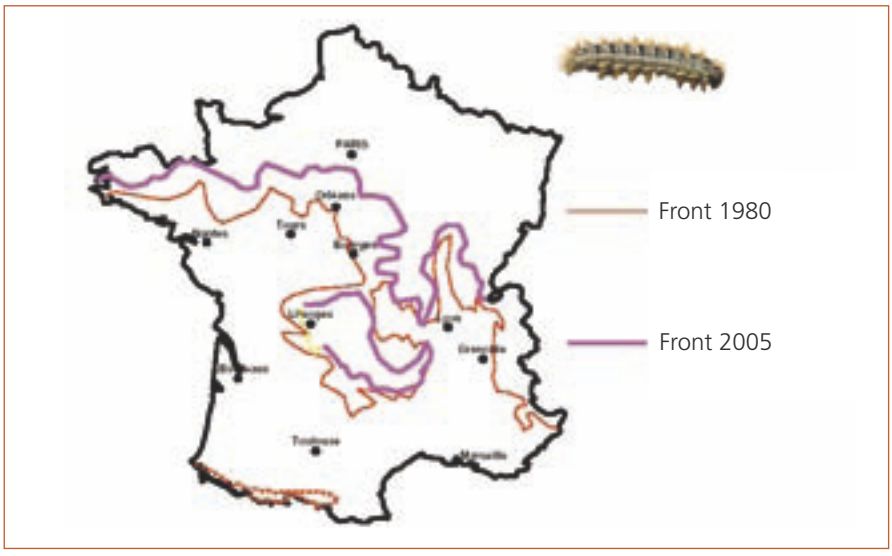


Fig. 8 : progression vers le nord de la chenille processionnaire du pin (source : Robinet et al., 2007)

dans les écosystèmes forestiers. Cette recherche des mécanismes d'évolution doit rester un des objectifs principaux des réseaux de suivi de l'environnement.

■ Le suivi de l'environnement nécessite l'établissement de référentiels, c'est-à-dire de gammes de valeurs établies sur de larges échelles spatiales et bien standardisées, qui seules permettent de juger si une situation est « normale » ou atypique, et si une évolution est en cours. Lorsque les premières alertes ont été lancées sur le jaunissement des épicéas et des sapins au début des années 1980, on s'est rapidement aperçu qu'on ne savait pas ce qu'était l'état du houppier d'un arbre « normal ». Il était ainsi très difficile de juger si les arbres étaient plus jaunes dans les Vosges qu'ils ne l'étaient dix ou vingt ans auparavant. C'est un des grands mérites de RENECOFOR d'avoir établi et publié les premiers référentiels homogènes pour de nombreuses caractéristiques de l'environnement forestier (dépôts atmosphériques, chimie des sols et des feuilles, diversité de la végétation du sous-bois, phénologie…). Ces référentiels devront, dans l'avenir, inclure des indicateurs et des mécanismes écologiques ou écophysiologiques de plus en plus précis. Leur valeur est d'autant plus grande qu'ils sont établis précocement, avant l'apparition de problèmes environnementaux. Il serait intéressant par exemple de construire des référentiels pour les teneurs en éléments traces dans les végétaux, en polluants organiques ou pour la teneur en divers isotopes stables ou radioactifs.

■ Nous ne pouvons pas effectuer de suivi à long terme sans normes précises de qualité. Les réseaux sont ainsi des laboratoires de mise au point, de test et de validation des procédures de standardisation et de contrôle qualité des mesures environnementales. RENECOFOR a par exemple permis pour la première fois la mesure précise de l'exhaustivité des observateurs dans les relevés floristiques. Un protocole standardisé de relevé, disponible sur Internet, a été appliqué à l'ensemble des placettes, une première dans les études de végétation à l'échelle nationale (Bourjot *et al.*, 2006).

■ Un seul réseau ne peut pas répondre à toutes les questions, en raison des échelles très variées auxquelles interviennent les changements environnementaux et auxquelles nous devons donc les étudier afin de les comprendre. Plusieurs systèmes de monitoring se sont progressivement mis en place pour répondre à ces besoins divers (figure 9 page suivante et Fort *et al.*, 2001). Ils ont été conçus, le plus souvent, indépendamment les uns des autres et ils nécessitent aujourd'hui une harmonisation afin de les rendre plus complémentaires. Mais qu'on se ne leurre pas. Ils sont encore, même dans leur globalité, largement insuffisants pour répondre à beaucoup de nos interrogations. Un seul exemple, celui du changement climatique. Aucun des réseaux existants n'est réellement apte à détecter de façon précoce des déplacements d'aire de répartition d'espèces. Il faudrait pour cela des suivis adaptés de dynamique des populations en limite de leur aire de répartition. Des observatoires régionaux, à développer, pourraient probablement mieux répondre à cette demande particulière.

■ Compte tenu des caractéristiques des changements environnementaux et, surtout, compte tenu des temps de réaction très longs des écosystèmes forestiers et de leur faible résilience, nous devons travailler dans le long terme. Mais long terme ne signifie pas obligatoirement continuité. On peut par exemple envisager dans le futur que des réseaux, après avoir joué leur rôle de construction de référentiels spatiaux pour certains paramètres clefs de l'environnement, puissent être mis en sommeil pour être réactivés à longue échéance, en fonction des besoins. Cela implique une gestion à très long terme des données récoltées dans les réseaux, qui se met lentement en place.

■ L'exigence d'un suivi continu aujourd'hui vient de notre ignorance du rythme des changements en cours dans les forêts et de l'opportunité qu'offre la varia-

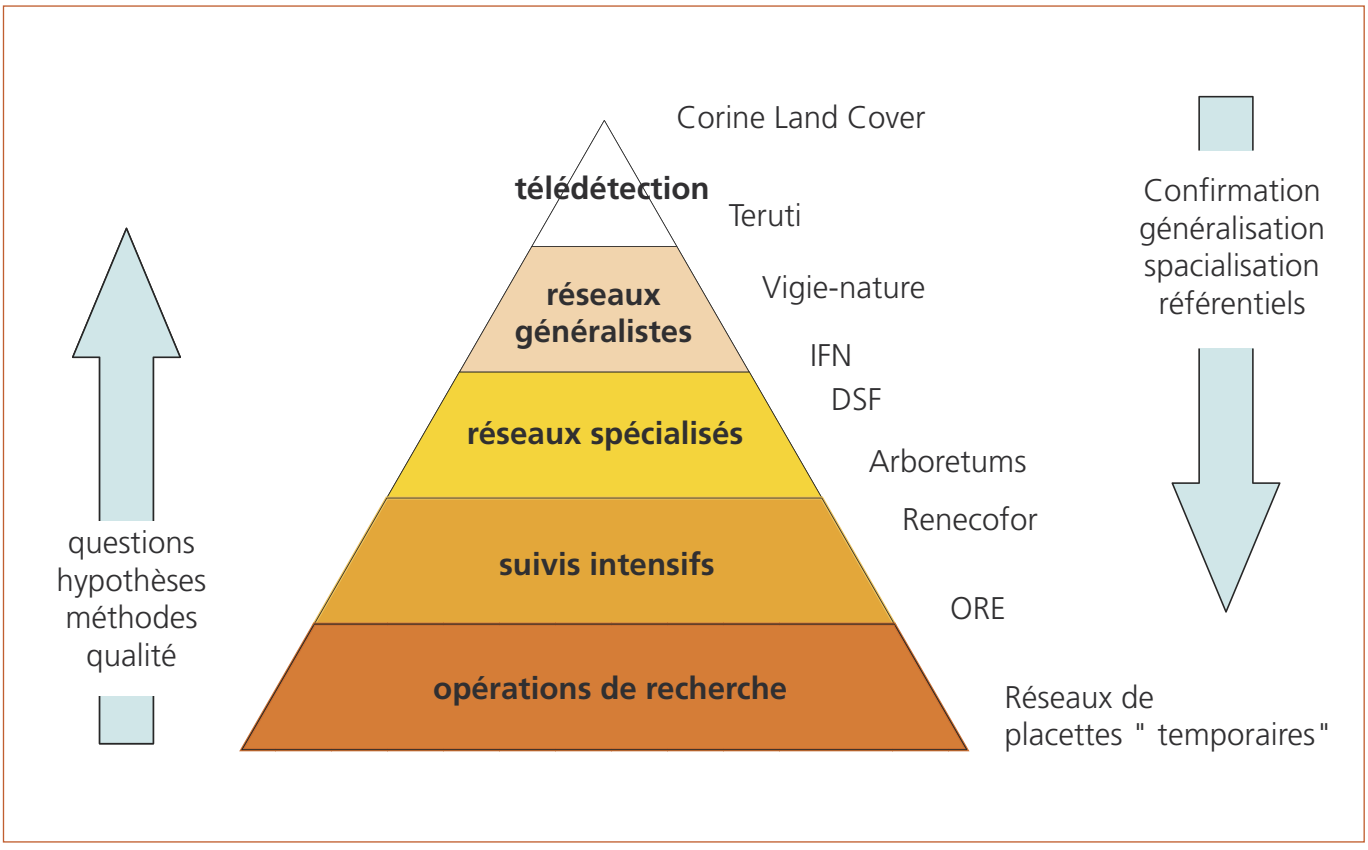


Fig. 9 : quelques outils actuels de suivi des écosystèmes forestiers à l'échelle de l'ensemble du territoire national
Teruti = Enquête annuelle sur l'occupation du territoire ; IFN = Inventaire forestier national ;
DSF = Département de la santé des forêts ; ORE = Observatoires de recherche en environnement.

bilité interannuelle pour mieux comprendre les causes de ces changements. Lorsqu'on compare le contenu chimique des feuilles de l'année 2008 avec ceux de l'année 1988, il faut connaître l'amplitude de la variabilité interannuelle avant de pouvoir conclure à l'existence d'une quelconque tendance à long terme. Il faut donc disposer de mesures pluriannuelles. De même, sans suivi continu, il aurait été beaucoup plus difficile et onéreux d'évaluer les impacts réels de la sécheresse-canicule de 2003.

Quelle place pour les réseaux d'observations dans notre société ?

Lors de la création de RENECOFOR, l'objectif enthousiaste visé par les scientifiques était un suivi sur une trentaine d'années, voire beaucoup plus. Quinze ans seulement après, faute de crédits, une réflexion est en cours afin de réduire les coûts. Ce processus nous paraît très regrettable, voire aberrant. Nos sociétés développées ont investi des sommes colossales dans des infrastructures, industrielles ou de transport par exemple. Ces infrastructures entraînent des coûts de fonctionnement tout aussi énormes. Or, nous savons aujourd'hui que ces activités sont responsables de la disparition plus ou moins rapide de notre capital de ressources environnementales (ressources énergétiques, ressources liées à la biodiversité…), par consommation directe ou en raison de sa détérioration par les pollutions diverses. Les investissements dans le suivi de l'environnement ne sont pas à la hauteur des enjeux, et des réseaux tels que RENECOFOR, devraient aujourd'hui être renforcés plutôt que « restructurés ».

Jean-Luc DUPOUEY
Équipe phytoécologie forestière
INRA-Nancy
jean-luc.dupouey@nancy.inra.fr

Matthias DOBBERTIN
Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage, WSL, Suisse
dobbertin@wsl.ch

Stephan HÄTTENSCHWILER
Équipe Bioflux
Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, Montpellier
stephan.hattenschwiler@cefe.cnrs.fr

Bibliographie

BADEAU V., DUPOUEY J.L., CLUZEAU C., DRAPIER J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. Forêt-entreprise n° 162, pp. 25-29

BONTEMPS J.D., VALLET P., HERVÉ J.C., RITTIÉ D., DUPOUEY J.L., DHÔTE J.F., 2005. Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : quelques conséquences sylvicoles. Revue forestière française vol. 57, n° 2, pp. 123-142

BOURJOT L., BRÊTHES A., CAMARET S., COQUILLARD P., CORRIOL G., DOBREMEZ J.F., DUMÉ G., DUPOUEY J.L., FORGEARD F., GAUBERVILLE C., GUEUGNOT J., LANIER M., PICARD J.F., SAVOIE J.M., SCHMITT A., ULRICH E., 2006. Manuel de référence n° 8 pour la caractérisation de la composition floristique (Placettes de niveau 1 du réseau RENECOFOR), 3ème édition. ONF, Fontainebleau, 41 p.

CANADELL J.G., LE QUÉRÉ C., RAUPACH M.R., FIELD C.B., BUITENHUIS E.T., CIAIS P., CONWAY T.J., GILLETT N.P., HOUGHTON R.A., MARLAND G., 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO_2 growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS, vol. 104, n° 47, pp.18866-18870

CLUZEAU C., DUPOUEY J.L., DRAPIER J., VIRION R., 2001. Étude des modifications à long terme de la végétation forestière à partir des données de l'IFN. Revue forestière française, vol. 53, n° 3-4, pp. 413-419

COUTELLIER A., 2003. L'artificialisation s'étend sur tout le territoire. Les données de l'environnement, Ifen. 4 p.

DOBBERTIN M., GIUGGIOLA A., LI M.H., CHERUBINI P., 2007. Klimawandel und die Lärchen im Engadin. Bündnerwald, vol. 60, n° 3, pp. 17-21

DUPOUEY J.L., THIMONIER A., LEFÈVRE Y., LE TACON F., BONNEAU M., DAMBRINE E., POSZWA A., LANDMANN G., 1998. Désaturation et enrichissement en azote des sols forestiers du Nord-Est de la France au cours des dernières décennies. Revue Forestière Française, vol. 50, n° 5, pp. 391-402

DUPOUEY J.L., SCIAMA D., KOERNER W., DAMBRINE E., RAMEAU J.C., 2002, La végétation des forêts anciennes. Revue Forestière Française, vol. 54 n° 6, pp. 521-532

DUPOUEY J.L., PIGNARD G., HAMZA N., 2006, La séquestration de carbone en forêt, Forêt-entreprise n° 168, pp. 15-18

DUQUESNAY A., DUPOUEY J.L., LE TACON F., CLÉMENT A., ULRICH E., 2000. Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. Tree Physiology n° 20, pp. 13-22

FORT C., BERGONZINI J.C., 2001. Les chemins de l'information forestière. GIP-Ecofor, CD-ROM.

GALSOMIÈS L., GOMBERT S., RAUSCH de TRAUBENBERG C., LEBLOND S., 2005. Pollution atmosphérique par les métaux – Biosurveillance des retombées. Paris : ADEME, EDP Sciences. 108 p.

HEADLEY A.D., BEAUDIN I., BATTY K., SEAWARD M.R.D., ASHMORE M.R., KALBEKKAN S., 2001. A new approach to detecting lichen response to changing air pollution. GANE Conference, Bangor, UK, http://gane.ceh.ac.uk/posters/NERTS199900065.pdf

LAMANDÉ M., RANGER J., LEFÈVRE Y., 2005. Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols. Coll. Les dossiers forestiers, n° 15. Paris : ONF. 131 p.

RENAUD J.-P., PICARD J.-F., RICHTER C., NYS C., 2000, Restauration de sols forestiers acides par un amendement calco-magnésien : cas du massif vosgien et des Ardennes. Rapport DERF-ONF-INRA, 47 p. + annexes

ROBINET C., BAIER P., PENNERSTORFER J., SCHOPF A., ROQUES A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (*Lep., Notodontidae*) in France. Global Ecology and Biogeography n° 16, pp. 460 – 471

ROMAN-AMAT B., 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport à MM. les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. 125 p.

SOLBERG S., DOBBERTIN M., REINDS G.J., DE VRIES W., 2007. Nitrogen deposition and high temperatures accelerate forest tree growth, *In* : Fischer R. (ed.), The condition of Forests in Europe, 2007 Executive Report. Genève : UN-ECE, p. 19

Pourquoi avoir créé le réseau RENECOFOR ? Quel avenir pour ce réseau aujourd'hui ?

La création en 1992 du réseau RENECOFOR (REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers) traduisait concrètement l'engagement pris par la France de mettre en œuvre la résolution S1 de la première conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe (Strasbourg décembre 1990). Cette conférence prenait place dans un certain contexte à la fois scientifique et politique, marqué par le phénomène des dépérissements forestiers attribués à la pollution atmosphérique à longue distance. Il est donc nécessaire de rappeler brièvement les conditions dans lesquelles est né le réseau RENECOFOR, les choix qui ont été adoptés à cette époque, avant d'aborder la situation actuelle et les missions que pourra, aujourd'hui et dans l'avenir, remplir ce réseau.

RENECOFOR, ONF

Depuis le milieu des années soixante-dix, le dépérissement forestier, constaté en particulier dans l'est de l'Europe, avait suscité plusieurs programmes de recherches et d'observations, on parlait de « maladie des forêts » (Walderkrankung) et même de « mort des forêts » (Waldsterben). Une convention sur la pollution atmosphérique transfrontière tenue à Genève en 1979, avait abouti à un « Programme international concerté sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts » (programme PIC Forêt) et des pays comme l'Allemagne, la Suède, la Norvège, l'Autriche ou la Belgique (Flandre) avaient engagé la création de réseaux de suivi à long terme des écosystèmes forestiers, dans les années 80. On relève aussi dans la littérature allemande la notion de places d'observation à plusieurs niveaux. Et, chez les décideurs forestiers, la question du fonctionnement et du dysfonctionnement des écosystèmes forestiers était au cœur des préoccupations.

Il n'est pas étonnant, dans ce contexte, qu'au cours d'une rencontre des ministres finlandais et français responsables des forêts,

soit apparue l'idée d'organiser des conférences ministérielles paneuropéennes consacrées à la protection et à la gestion durable des forêts. Il s'agissait de susciter, au niveau du continent européen tout entier, une dynamique politique qui appuie la mise en œuvre effective d'un nombre limité de projets concrets réunissant le double critère d'un bon état de maturité technico-scientifique (reflété par les travaux des groupes d'experts nationaux ou internationaux du continent européen) et d'une forte attention politique. Il était préconisé en particulier de généraliser les réseaux de surveillance intensive des écosystèmes forestiers, sur la base de protocoles harmonisés au niveau du continent. La résolution S1 de la Conférence de Strasbourg réunie à la suite de cette initiative franco finlandaise recommandait finalement la création d'un véritable réseau européen de placettes d'observation.

En France, le débat sur les « pluies acides », fortement médiatisé, avait obligé les décideurs forestiers à tenir davantage compte des remarques des scientifiques étrangers, et à développer une approche plus écosystémique des problèmes forestiers. Grâce aux conseils avisés notamment de Maurice Bonneau le projet RENECOFOR allait naître à la suite de la création du Service de santé des forêts et du GIP ECOFOR (groupement d'intérêt public pour la recherche sur les écosystèmes forestiers).

La résolution S1 fixait aux réseaux du type RENECOFOR quatre objectifs principaux :
1 - obtenir des informations approfondies sur l'évolution de certains écosystèmes forestiers 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 d'environnement et la réaction des écosystèmes forestiers ;
3 - déterminer le niveau de charge critique[1] en polluants susceptibles de déstabiliser un type donné d'écosystème forestier ;
4 - permettre de mieux interpréter les résultats issus des réseaux systématiques élémentaires du type du réseau européen.

Sous l'égide conjointe de la Commission européenne et du PIC Forêt (cf.supra), les experts se sont efforcés de négocier en 1991 et 1992 un socle commun européen de mesures et de méthodologies, visant ainsi à développer un véritable outil européen permettant des agrégations de données, des comparaisons et des synthèses à l'échelle du continent.

RENECOFOR répondant aux objectifs de la résolution S1 en même temps qu'aux propositions élaborées en 1991 et 1992, apparaît comme le troisième et dernier d'un ensemble cohérent de trois réseaux, comportant déjà le réseau des correspondants observateurs et le réseau européen de placettes de notation de l'état du feuillage, tous deux animés par le département de santé des forêts créé en 1988. Mais il fallait décider de l'implantation, du nombre des placettes et du catalogue des observations.

Il a semblé logique d'implanter les placettes en forêt domaniale, ce qui donnait une garantie de pérennité et, dans une certaine mesure, un support des contraintes d'un investissement continu sur une période estimée alors à trente ans. L'ONF semblait d'ailleurs bien dans son rôle de service public en portant le projet à la fois sur le plan technique et, pour une large part sur le plan financier, avec l'aide toutefois de la Commission européenne. Le nombre de placettes, leur répartition entre les différents types d'écosystèmes, le nombre des observations ont fait l'objet d'échanges approfondis tenant compte des objectifs poursuivis et des possibilités réelles de réalisation. Finalement RENECOFOR a été un réseau de 102 placettes. La priorité a été donnée aux interactions entre le peuplement, le sol, le climat et la pollution atmosphérique, chez des peuplements d'âge moyen d'une dizaine de grandes essences sociales, menés selon des règles sylvicoles représentatives des habitudes en usage dans les régions d'implantation des placettes.

Il ne s'agissait pas d'un réseau d'alerte, car il aurait fallu privilégier des placettes en région extrême. Il ne s'agissait pas non plus d'un réseau de recherche, même si certains projets de recherche pouvaient y trouver place moyennant un sérieux examen de compatibilité. La rigueur avec laquelle ce réseau a été animé et géré au cours de ces quinze dernières années doit beaucoup à l'efficacité et à la compétence d'Erwin Ulrich, recruté par l'ONF pour mener à bien cette opération.

1 Selon Nilsson et Grennfelt (1986), la première définition les indiquait comme étant « la valeur d'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle des effets significatifs indésirables portant sur des éléments sensibles de l'environnement n'apparaissent pas… » Aujourd'hui les charges critiques sont censées représenter le dépôt atmosphérique maximal admissible pour un écosystème et constituent un outil de référence internationalement reconnu pour raisonner la réduction des émissions de polluants, en l'état actuel des connaissances.

Dix ans après la Conférence de Strasbourg, les deux premiers points de la résolution S1, mentionnée précédemment, restent d'actualité, le débat sur les pluies acides, les accidents comme la tempête de 1999 ont montré que l'environnement n'était pas invariant, contrairement à ce que les forestiers supposaient plus ou moins implicitement. Aujourd'hui la perspective de changements climatiques, peut-être plus rapides qu'on ne le pense, en tout cas à des pas de temps brefs au regard des cycles forestiers, rend plus impérieuse la nécessité de disposer d'un système permanent de suivi et de surveillance des écosystèmes forestiers et, par conséquent, la nécessité d'un investissement régulier et permanent.

De la même façon, le troisième point de la résolution S1 demeure d'actualité. Quant au quatrième point, il peut retrouver sa pertinence dans la mesure où la Commission et les États membres prendront enfin au sérieux la lourde question du suivi des écosystèmes forestiers dans le contexte du changement climatique annoncé.

En conclusion, le réseau RENECOFOR garde tout son intérêt et on peut dire toute son actualité. Or sa situation est critique à cause notamment du désengagement financier communautaire annoncé dans le contexte des péripéties connues par les règlements communautaires intervenant précédemment (Règlement pollution atmosphérique, Forest focus, futur règlement LIFE +). Il s'agit là d'un dilemme familier des forestiers, à savoir la garantie des investissements lourds en forêt dans un contexte administratif et politique qui évolue à une vitesse et à des termes peu compatibles avec les objectifs forestiers. Ce dilemme s'est posé suffisamment dans l'histoire pour que l'on puisse tirer quelques enseignements sur la conduite à tenir. D'abord il faut se refuser à tirer un trait sur l'investissement lourd assumé depuis quinze ans, à considérer qu'il s'agissait d'une décision conjoncturelle prise dans un contexte historiquement daté, sans intérêt pour les problèmes qui se posent aujourd'hui et se poseront demain. Mais inversement, il serait illusoire de vouloir rester bloqué sur les arbitrages du début et de refuser un effort normal d'adaptation au contexte actuel, aux nouvelles questions scientifiques, aux priorités des décideurs. Il semble bien que ce soit précisément dans cet esprit qu'a été signé le nouveau contrat État-ONF pour la période 2007-2011 et qui mentionne explicitement le réseau RENECOFOR.

Il faut démontrer la capacité d'adaptation de RENECOFOR, mais aussi de ses gestionnaires, à la reformulation de certaines questions sur la base desquelles le réseau a été conçu, et cela sans perdre le formidable acquis de ces quinze dernières années. Le même travail devrait d'ailleurs être poursuivi par les réseaux européens équivalents. Cela suppose peut-être aussi un effort pour valoriser davantage les remarquables résultats et les potentialités de RENECOFOR et des réseaux similaires, auprès de la Commission européenne, de l'ensemble des états membres, ainsi qu'auprès des organes exécutifs et groupes d'experts de conventions mondiales sur la diversité biologique et sur les changements climatiques.

RENECOFOR doit et peut parfaitement s'adapter aux questions scientifiques et techniques actuelles, ainsi qu'aux nouvelles attentes des responsables des politiques de la forêt, de la diversité biologique. Devant la perspective de changement climatique important, hautement probable, peut-être rapide, garantir la pérennité de RENECOFOR est plus que jamais indispensable.

Georges TOUZET
Ancien directeur général de l'ONF
Ancien coordinateur de la préparation de la conférence de Strasbourg en 1990
Vice-Président de l'Académie d'Agriculture de France
georgestouzet@tele2.fr

Christian BARTHOD
Ancien collaborateur de G. Touzet pour la préparation de la conférence de Strasbourg
Sous-directeur des espaces naturels DNP-Ministère de l'Écologie et du Développement durable
christian.barthod@ecologie.gouv.fr

RENECOFOR et son articulation avec d'autres réseaux nationaux et européens

Cet article vise à décrire ce que le réseau RENECOFOR représente aujourd'hui, ou ce qu'il est devenu après 15 années d'existence. Il ne vise pas à répéter ce qui a déjà été dit par ses initiateurs (voir articles précédents). Les présents actes étant remplis de nombreux résultats, cet article n'a donc pas besoin d'y revenir.

Qu'est ce que RENECOFOR ?

RENECOFOR signifie « Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers ». Ce nom relativement neutre a été choisi pour ne pas donner de prépondérance à un domaine d'étude particulier. Il permet de traverser les décennies en s'adaptant au fur et à mesure aux besoins de suivi intensif en forêt, tout en gardant un fond constant de domaines d'étude.

RENECOFOR est un réseau atypique, composé avant tout de forestiers et de chercheurs. Il veut apporter des éléments de réponse aux grandes questions de la gestion forestière sur l'évolution de l'environnement. C'est un réseau d'**appui à la recherche** et non pas un réseau de recherche. C'est un réseau d'observation en même temps qu'un réseau d'études de cas parce que le nombre et le type de sites ne permettent pas de réaliser des calculs statistiques nationaux de type « réseau classique ». Il est caractérisé par son travail multidomaines et par le besoin de longues phases de prise de données avant qu'il puisse montrer sa vraie valeur. Sa valeur ajoutée augmente avec sa durée et il est ainsi devenu une référence dans beaucoup de domaines inexplorés auparavant à l'échelle nationale.

À quelles grandes questions ce réseau contribue-t-il à répondre ?

Ce sont actuellement surtout trois grandes questions :

1 - Quel est l'impact de la pollution atmosphérique sur la forêt ? Le réseau donne des éléments de réponse avec les mesures de dépôts annuels (surtout soufre, azote et acidité), de concentration et impact de l'ozone de l'air et de concentration de l'ammoniac dans l'air, avec aussi la mesure de la fertilité des sols et le suivi de la nutrition minérale des arbres (analyse foliaire, litière) ainsi que l'analyse continue des solutions du sol.

2 - Quelle est la réaction des peuplements aux évolutions météorologiques ? C'est avec les mesures dendrochronologique et dendrocli-

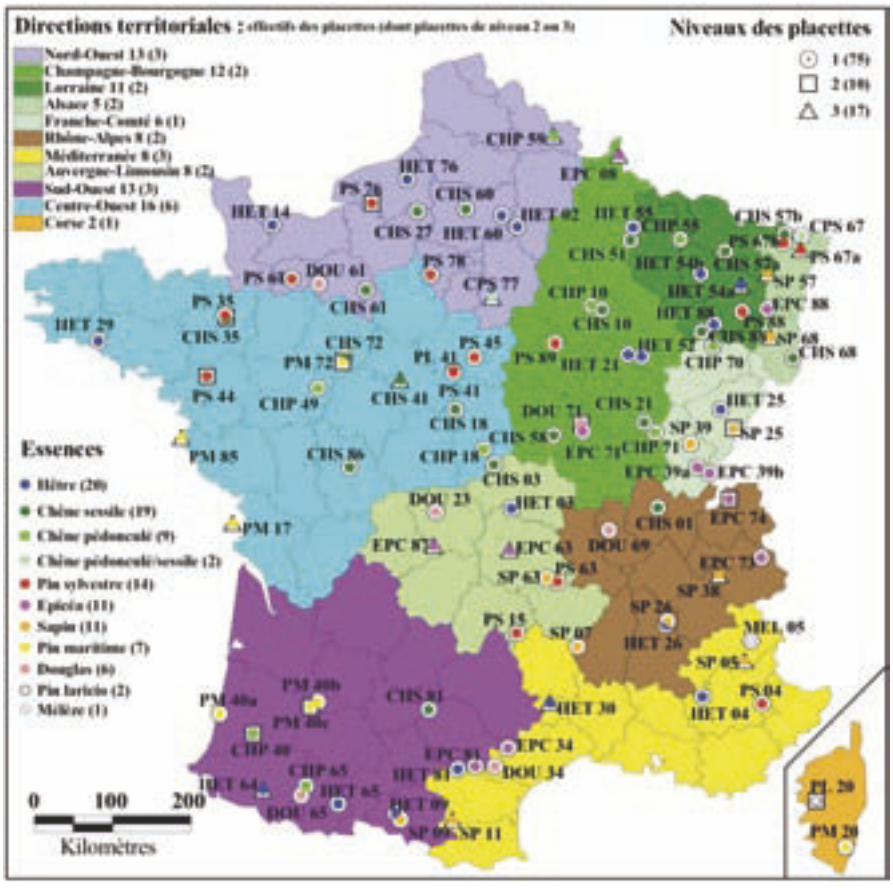


Fig. 1 : localisation et caractéristiques des 102 sites du réseau RENECOFOR

Codification : les premières lettres indiquent l'essence dominante, suivie du n° du département (20 = 2A ; L1 et L2 = Luxembourg) ; la dernière lettre distingue les placettes de même essence dans un même département (par exemple PM40a et PM 40b).CHP = Quercus robur L., CHS = Quercus petraea (Mattuschka) Liebl., CPS = mélange de CHP et CHS, DOU = Pseudotsuga menziesii (Mirbel) Franco, EPC = Picea abies (L.) Karsten, HET = Fagus sylvatica L., PL = Pinus nigra laricio Maire, PM = Pinus pinaster Aiton, PS = Pinus sylvestris L., SP = Abies alba Miller, MEL = Larix decidua Mill.

matologique, les observations de la phénologie des arbres et arbustes, l'observation des problèmes phytosanitaires et la mesure d'indicateurs météorologiques que le réseau contribue à répondre.

3 - Comment évoluent certains aspects de la biodiversité, que l'on peut surveiller dans des mini-observatoires ? Ce sont surtout les observations régulières de la composition floristique, des champignons supérieurs, des lichens et de la macrofaune du sol qui sont utiles. Beaucoup d'aspects de la biodiversité ne peuvent pas être traités à cause de la taille limitée des sites, mais RENECOFOR joue surtout un rôle dans le développement méthodologique pour une application plus large en dehors du réseau.

En quoi consiste le réseau concrètement ?

Le réseau repose sur 102 sites (également appelés placettes), dont chacun couvre une surface de 2 hectares et qui abrite une zone centrale d'un demi-hectare. Le choix des sites a été volontairement limité aux 10 principales essences françaises ayant une importance économique : hêtre (20 sites), chêne sessile (19), chêne pédonculé (9), mélange égal des deux chênes (2), pin sylvestre (14), épicéa (11), sapin (11), pin maritime (7), douglas (6), pin laricio (2) et mélèze (1) (figure 1). Il y a 3 niveaux d'intensité, du moins intensif (niveau 1) au plus intensif (niveau 3). Suite à l'évaluation du réseau et suite aux recommandations du comité scientifique de l'ONF, ce schéma changera un peu à partir de 2008.

Chaque site est clôturé sur le demi-hectare central (figure 2D). Toutes les mesures (voir les 3 questions ci-dessus) sont réalisées dans chacun des sites, à l'exception des mesures exclusives des sites de niveau 2 et 3, à savoir :

- niveau 2 (27 des 102 sites) : mesures des dépôts atmosphériques annuels, des concentrations et de l'impact de l'ozone de l'air, des concentrations de l'ammoniac dans l'air et relevés météorologiques automatiques,
- niveau 3 (17 des 27 sites) : en plus du niveau 2, analyse continue des solutions du sol.

À partir de 2008, les dépôts atmosphériques sous forêt, les solutions du sol et les paramètres météorologiques seront mesurés seulement dans les sites de niveau 3, qui ne seront plus que 14.

Que contient physiquement chaque site ?

Chaque placette de deux hectares est délimitée par 4 piquets d'angle afin de faciliter le repérage lors des travaux. À l'intérieur de la clôture (figure 2D), le demi-hectare est également délimité par 4 piquets d'angle (en bleu dans la figure 2A). Tous les arbres du demi-hectare clôturé sont numérotés (figure 2A, en haut à droite). Cela permet un suivi dendrométrique individuel. Un sous-ensemble de 36 arbres sert aux observations phytosanitaires et des stades phénologiques (figure 2A et 2D). Seize arbres de la zone neutre (espace entre la délimitation des 2 hectares et celle du demi-hectare) servent à l'échantillonnage foliaire (figure 2A). Les zones d'échantillonnage du sol sont matérialisées par des bornes de géomètre jaune et rouge, afin de permettre de les retrouver pour les campagnes d'échantillonnage successives (figure 2B ; première campagne 1993/95, deuxième campagne : 2007/11). Les 8 bandes d'observation de la composition floristique (50 x 2 m, dont 4 à l'intérieur et 4 à l'extérieur de la clôture) sont délimitées par des bornes de géomètre blanches (figure 2B, en bas). Jusqu'à fin 2007, toutes les placettes disposaient de 10 collecteurs de litière d'une surface individuelle de collecte de 0,5 m² installés de manière systématique (figure 2C). Depuis 2008, seuls 14 sites de niveau 3 en disposent, tout comme des collecteurs de récolte des pluviolessivats (précipitations ayant traversé les cimes des arbres) et des collecteurs de solutions du sol (figure 2E).

Des échantillons sont régulièrement prélevés surtout dans la zone neutre (échantillonnage de la macrofaune du sol, de certains champignons trop difficiles à déterminer sur le terrain, ou échantillons foliaires, afin d'être identifiés ou analysés en laboratoire ou pour la détermination de symptômes éventuels d'ozone).

Quelle gouvernance pour le réseau ?

Il existe un lien étroit entre la recherche et les gestionnaires du réseau pour définir et mettre à jour les paramètres à observer dans chaque domaine (cela se fait aussi via les groupes d'experts du PIC Forêt de l'ONU, et anciennement les règlements européens 3528/86 et Forest Focus). Au quotidien, le réseau repose sur une organisation stricte des opérations, avec des manuels de référence précisant les protocoles d'observation et de mesures, et sur des actions de formation, des échéances précises et un programme assurance qualité.

Le centre de coordination organise une partie de l'évaluation des données et la finance. L'autre partie de l'évaluation est faite par des organismes de recherche avec leurs fonds propres. Cet apport a conduit à de nombreuses publications et constitue la partie la plus dynamique de la valorisation des données, vu qu'elle se fait en dehors du circuit institutionnel et repose sur le volontariat et l'intérêt réel des scientifiques. Ainsi, il existe des partenariats très forts et durables avec la recherche, sans demande d'apports financiers supplémentaires. Toutes les données du réseau sont accessibles librement, et elles sont gratuites. La

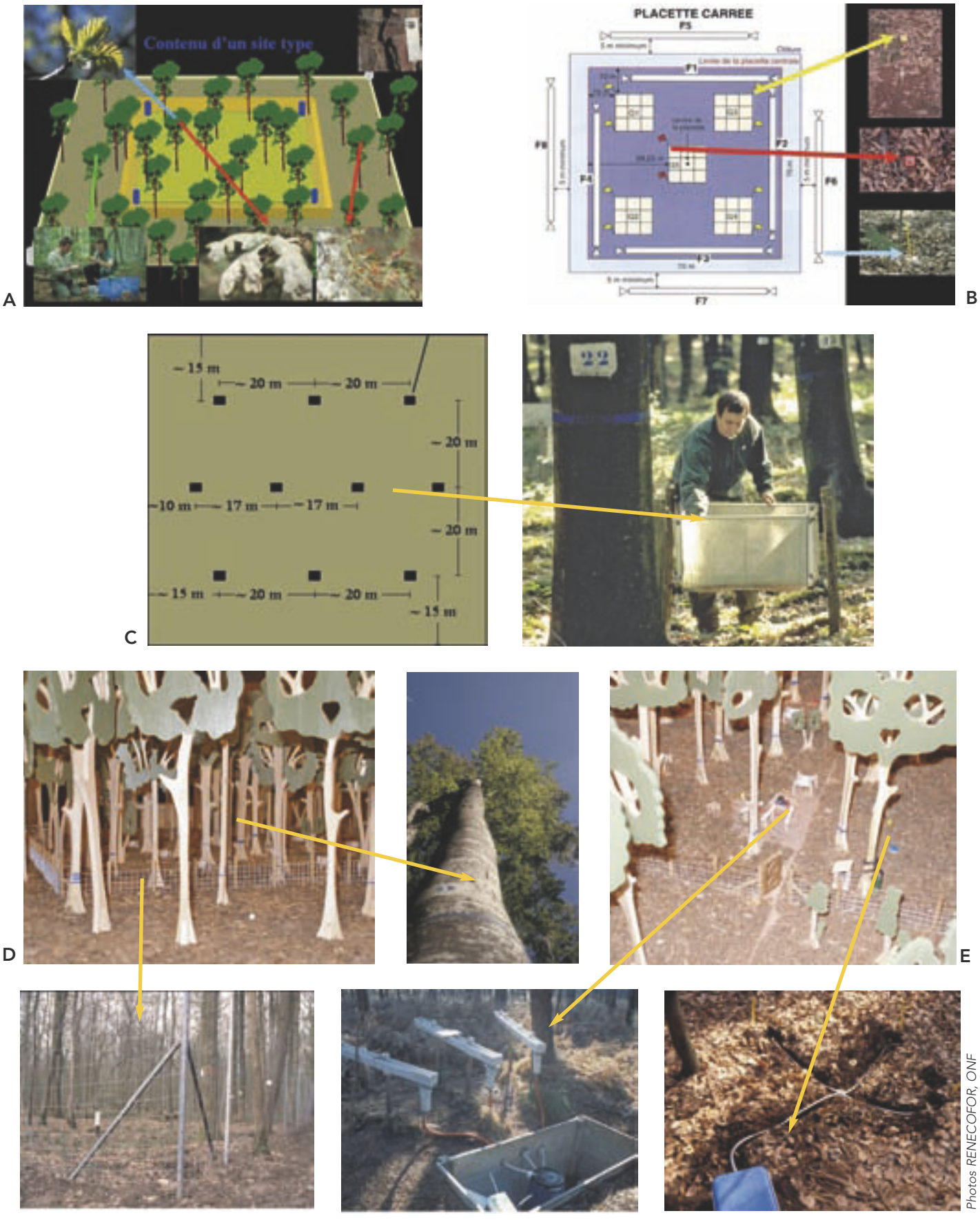


Fig. 2 : contenu des placettes (photos du terrain et d'une maquette fabriquée par l'atelier création du service études et développement de l'agence de Haute-Marne)

seule exigence du centre de coordination est que les demandeurs disposent d'un vrai projet de valorisation et mentionnent explicitement leurs sources de données.

Moyens et partenariats

Entre 1991 et 2006, RENECOFOR a disposé d'un budget d'environ 20 millions d'Euros hors taxes qui inclut tous les coûts de personnel ONF, de sous-traitance et une petite partie du coût de la valorisation des données. Au sein de l'ONF, 200 forestiers environ sont responsables locaux des 102 placettes pour lesquelles ils travaillent à temps partiel (entre 5 et 25 % du temps en moyenne). À ces forestiers s'ajoutent environ 80 correspondants observateurs (CO) du département de la santé des forêts du ministère de l'Agriculture et de la Pêche, qui réalisent le suivi sanitaire plusieurs fois par an. En outre, 15 techniciens forestiers spécialisés des directions territoriales de l'ONF (directions forêt) réalisent des mesures plus sophistiquées et sont responsables au niveau territorial (voir figure 1). Le centre de coordination compte 5 à 6 personnes.

Les partenariats privilégiés avec la recherche concernaient jusqu'en 2007 environ 55 chercheurs français appartenant à 25 organismes (INRA, CNRS, CEMAGREF, Universités, bureaux d'études, associations…) ainsi que 20 chercheurs étrangers (Allemagne, Belgique, Finlande, Italie, Suède, Suisse…).

La force de RENECOFOR ?

La force du réseau, c'est tout d'abord l'acquisition de longues séries de données couvrant actuellement 10 à 14 années selon le domaine concerné. Ce sont ensuite des centaines de paramètres dont environ 200 sont mis à jour régulièrement. Ce sont aussi les 30 documents publiés dans la série « jaune » RENECOFOR et les 234 auteurs et coauteurs qui ont publié des données du réseau, dont 130 sont français et 104 viennent d'autres pays européens. Le nombre de documents produits par les chercheurs français est de 102, dont 38 dans des revues scientifiques à comité de lecture. Au total, environ 16 000 pages liées au réseau ont été publiées (dont un certain nombre de documents d'ordre politique ou législatif n'émanant pas du réseau lui-même, mais qui ont fortement influencé sont destin).

Le réseau dispose d'un programme assurance qualité multi-domaines. Il contribue aux indicateurs de la gestion durable des forêts françaises et au bilan patrimonial de l'ONF. Il contribue au réseau européen de surveillance rassemblé sous l'égide du PIC Forêt (convention de Genève) et a contribué aux règlements « Pollution » (n°3528/86) jusqu'en 2002, puis « Forest Focus » (n°2152/2003) jusqu'à fin 2006.

La force la plus importante est certainement la longue liste de résultats inédits du réseau, dont une sélection est présentée dans ces actes du colloque. La principale clé de réussite de cette œuvre commune de longue haleine est de maintenir une ambiance de travail très amicale, malgré toutes les contraintes des uns et des autres.

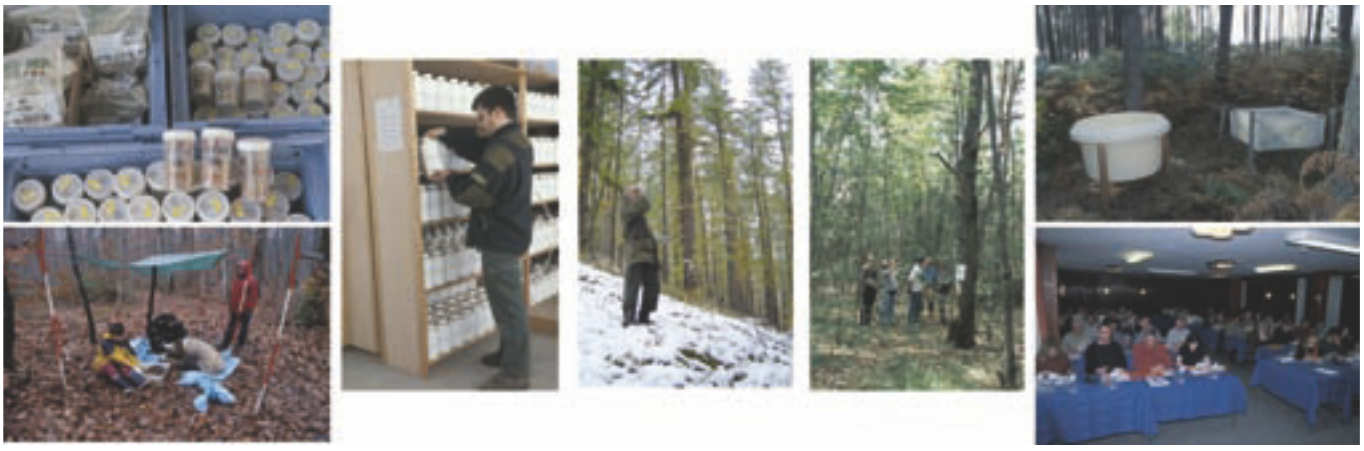
Qui utilise les données ?

La Commission européenne avec sa base de données « Forest Focus » et la Convention de Genève sur la pollution transfrontière à longue distance (PIC Forêt, centre de coordination de Hambourg) sont les premiers utilisateurs et sont également les plus prestigieux. Les chercheurs (INRA, ENGREF, CNRS, universités, METLA en Finlande, CNR en Italie) sont certainement les utilisateurs les plus fréquents. Ils sont suivis par les enseignants (ENGREF, écoles agricoles et forestières), les représentants des ministères chargés de l'agriculture, de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, certains bureaux d'études ainsi que ponctuellement par les gestionnaires forestiers (surtout pour les informations sur l'évolution météorologique et sur la fructification).

Quels liens avec d'autres réseaux en France, en Europe et dans le monde ?

Depuis des années, les liens avec les réseaux français (aussi bien d'hommes que de recherche) sont constants et forts, lorsqu'ils ont également un objectif de suivi à long terme dans des domaines proches de ceux du réseau RENECOFOR. Il s'agit surtout du réseau des correspondants observateurs du département de la santé des forêts (ministère de l'Agriculture et de la Pêche), du réseau systématique 16 x 16 km (réseau européen), du réseau MERA (Mesure des Retombées Atmosphériques), du réseau BRAMM (Biosurveillance des Retombées Atmosphériques Métalliques par les Mousses), du groupement de recherche « Systèmes d'Information Phénologique pour la Gestion et l'Étude des Changements Climatiques », du groupement d'intérêt public « ECOFOR », de l'observatoire de recherche en environnement F-ORE-T, et de la société mycologique de France en lien avec l'observatoire mycologique.

RENECOFOR a historiquement des liens forts avec les 700 autres sites du même type installés dans environ 30 pays européens (appelés level II dans la dénomination de la Commission européenne et du PIC Forêt). Il est référencé dans le GTOS – Global Terrestrial Observation System/TEMS –



Photos RENECOFOR, ONF

Quelques photos de la vie du réseau : échantillons pour analyse foliaire, échantillonnage de la macrofaune, à la pédothèque, mesures dendrométriques en hiver, observations phytosanitaires en été, comparaison de deux types de collecteurs de litière, réunion annuelle d'information pour les membres du réseau

Terrestrial Ecosystem Monitoring Site, système mondial d'observation terrestre (http://www.fao.org/gtos/tems/network_list.jsp).

Conclusions

RENECOFOR est un réseau à multiples facettes pouvant satisfaire des besoins assez variés. Depuis plusieurs années il est accepté comme une vraie base pour la recherche. À l'avenir il doit faire un grand effort pour produire des indicateurs simples et compréhensibles par un large public, et en développant la vulgarisation des résultats. L'adaptation du réseau aux besoins futurs de surveillance écologique doit se faire sans sacrifier ce qui a été fait dans le passé, car cela irait à l'encontre des objectifs à long terme du réseau. Il faut garder l'intégration dans le réseau européen, car cela ne peut qu'être un atout pour le devenir et les résultats du réseau.

Erwin ULRICH
ONF — Département Recherche
erwin.ulrich@onf.fr

Hommage aux pères du réseau

Je souhaite rendre ici hommage aux 4 pères de ce réseau : Les pères « penseurs » et « initiateurs scientifiques » Maurice BONNEAU et Guy LANDMANN et les pères de la mise en œuvre stratégique et politique Georges TOUZET et Christian BARTHOD. Ces 4 pères ont œuvré longtemps pour que la mise en place de ce réseau soit possible et le soutiennent encore 15 ans après. Qu'ils en soient sincèrement remerciés !

Remerciements à tous les contributeurs depuis 15 ans

Depuis la création du réseau j'estime à environ 500 le nombre de personnes ayant contribué concrètement au réseau. Il est impossible de les nommer ici. Je tiens personnellement à profiter de l'occasion des actes pour les remercier, que ce soient les responsables et suppléants des placettes, qui œuvrent tout au long de l'année pour que ce réseau existe matériellement, les ingénieurs et techniciens des anciennes STIR et des actuelles directions forêt des directions territoriales de l'ONF, les membres du centre de coordination et du département recherche, les nombreuses personnes dans les services administratifs métropolitains de l'ONF qui ont aidé à ce que tout puisse fonctionner, les très nombreux chercheurs et plusieurs sociétés d'ingénieurs, sans lesquelles ce réseau n'aurait jamais pu vivre en dehors de l'ONF et qui lui ont permis d'avoir le rayonnement actuel, les laboratoires d'analyse, qui travaillent toujours derrière la scène, mais sans lesquels aucune donnée analytique n'existerait, la société gérant le réseau météorologique, les ingénieurs de la DG, les directeurs techniques (et commercial bois) et les directeurs généraux successifs de l'ONF qui se sont beaucoup investis pour que ce réseau puisse être financé, même dans un contexte financier très tendu après les tempêtes de 1999 et finalement les bailleurs de fonds extérieurs à l'ONF qui ont été fidèles sur une si longue période : la Commission européenne, le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, l'ADEME et le ministère l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.

Votre engagement et aide constante prouve que « Quand on veut on peut ! ». Soyez-en remerciés vivement et sincèrement !

La base de données RENECOFOR, mémoire du réseau et maillon de la chaîne d'assurance qualité

Quand le réseau RENECOFOR a démarré en 1992, il est apparu très rapidement que de nombreuses données allaient être recueillies et qu'il faudrait pouvoir les gérer à long terme. L'organisation de la gestion des données peut être considérée comme l'aboutissement d'une multitude de programmes individuels d'assurance qualité, définis en premier lieu pour chaque domaine mais qui doivent également se retrouver dans la base centrale. C'est pourquoi la base de données a été créée et a accompagné au plus près le développement du réseau.

Les principales caractéristiques des données de RENECOFOR

RENECOFOR est un réseau de placettes : chaque placette est une entité indépendante, mais les observations et mesures effectuées sur chacune suivent des protocoles identiques. Si quelques données ont été recueillies au démarrage du réseau, elles sont pour l'essentiel produites au cours du fonctionnement du réseau de façon continue ou à intervalles plus ou moins réguliers. La base de données s'accroît donc constamment.

Les données concernent une douzaine de domaines, tous relatifs aux écosystèmes étudiés mais sans liens directs entre eux. Cependant le croisement des données de ces différents domaines est nécessaire pour tirer tous les enseignements possibles du réseau. D'un point de vue informatique le seul lien strict entre les données de différents types est le plus souvent l'entité « placette », parfois l'« arbre individuel ». Toutes les données recueillies depuis le début du réseau doivent être accessibles aisément, et on doit pouvoir extraire à la demande différents paramètres appartenant à un ou plusieurs domaines, sur une durée plus ou moins longue, et relatifs à une, plusieurs ou la totalité des placettes.

Avec le temps, de nouveaux paramètres sont mesurés dans les domaines existants, de nouveaux domaines sont explorés, les protocoles de mesure s'affinent et évoluent, les périodicités des mesures changent, le jeu de placettes sur lesquelles des mesures particulières sont effectuées est modifié. La base de données RENECOFOR, tout en assurant la continuité d'accumulation des données et sa cohérence d'ensemble, doit s'adapter en « temps réel » à tous ces changements.

Comment est faite la base de données RENECOFOR ?

L'ensemble de ces caractéristiques a conduit dès 1992 à choisir une base de données relationnelle (voir

Les bases de données relationnelles

D'après l'encyclopédie libre en ligne Wikipedia, une base de données est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données). Une base de données est dite relationnelle si les données sont réparties entre plusieurs tables mises en relation à l'aide de champs qui leur sont communs.

Une donnée est la valeur que prend un paramètre pour un objet déterminé. Cette valeur peut être de différents types : un nombre, un texte, une date, une image. Pour chaque paramètre un champ est défini dans la base. Une série de données de même composition est regroupée dans une structure appelée table qui comporte autant de champs que de paramètres différents et autant d'enregistrements que d'objets différents décrits (figure 1).

Dans cette table chaque ligne « enregistrement » constitue un objet indissociable : il n'est pas possible de déplacer le contenu d'une case sans déplacer toute la ligne, contrairement à un tableau dans un tableur. C'est une grande sécurité dans la manipulation des données. De plus, la plupart du temps, on n'intervient pas directement sur la table. Le logiciel de base de données comporte des outils de saisie (fiches), de consultation et extraction des données (requêtes) et d'impression (états).

L'exemple des mesures de la croissance des arbres (dendrométrie) montre la façon dont s'organise la base de données RENECOFOR (figure 2). Les données sont réparties en plusieurs tables suivant le niveau de mesure des différents paramètres : niveau placette (ex : date de mesure), tous les arbres (ex : circonférence), un échantillon d'arbres (ex : hauteur). À partir des données brutes, une table de synthèse est mise à jour : elle récapitule pour chaque inventaire des paramètres synthétiques par essence : surface terrière, diamètre moyen… La comparaison automatique pour chaque arbre des mesures successives permet de détecter des erreurs de mesure et de les corriger si possible.

	Champ «Code» (1)				Champ «PH deb10 esspr» (2)			
	Code	An	PH sous etage	PH sseta ess1	PH deb10 esspr	PH deb10 sset	PH deb90 esspr	PH obs
	EPC 81	2006	Non		01/05/2006		08/05/2006	hiver long (mi-novembre à fin mars) froid mais sans forte gelée
Enregistrement	HET 04	2006	Oui	hêtre	24/04/2006	17/04/2006	01/05/2006	nombreuses feuilles sèches en début septembre
	HET 25	2006	Non		08/05/2006		15/05/2006	hiver 2005-2006 particulièrement long, neige jusqu'au 15 avril

(1) code unique d'une placette RENECOFOR — (2) date à laquelle 10 % des arbres observés de l'essence principale ont débourré

Fig. 1 : exemple de table (extrait des observations phénologiques)

Explication des intitulés des champs :
Code = Code unique d'une placette RENECOFOR
An = Année
PH sous etage = présence de sous-étage dans la placette (Oui ou Non)
PH sseta ess1 = nom de la première essence du sous-étage
PH deb10 esspr = date à laquelle 10 % des arbres « observation » et « échantillon » de l'essence principale ont débourré. Toutes les dates sont des lundi et signifient que le phénomène a été observé dans la semaine qui commence à la date indiquée
PH deb90 esspr = date à laquelle 90 % de la première essence du sous-étage a débourré. Voir PH deb10 esspr
PH obs = Remarques complémentaires sur les observations phénologiques

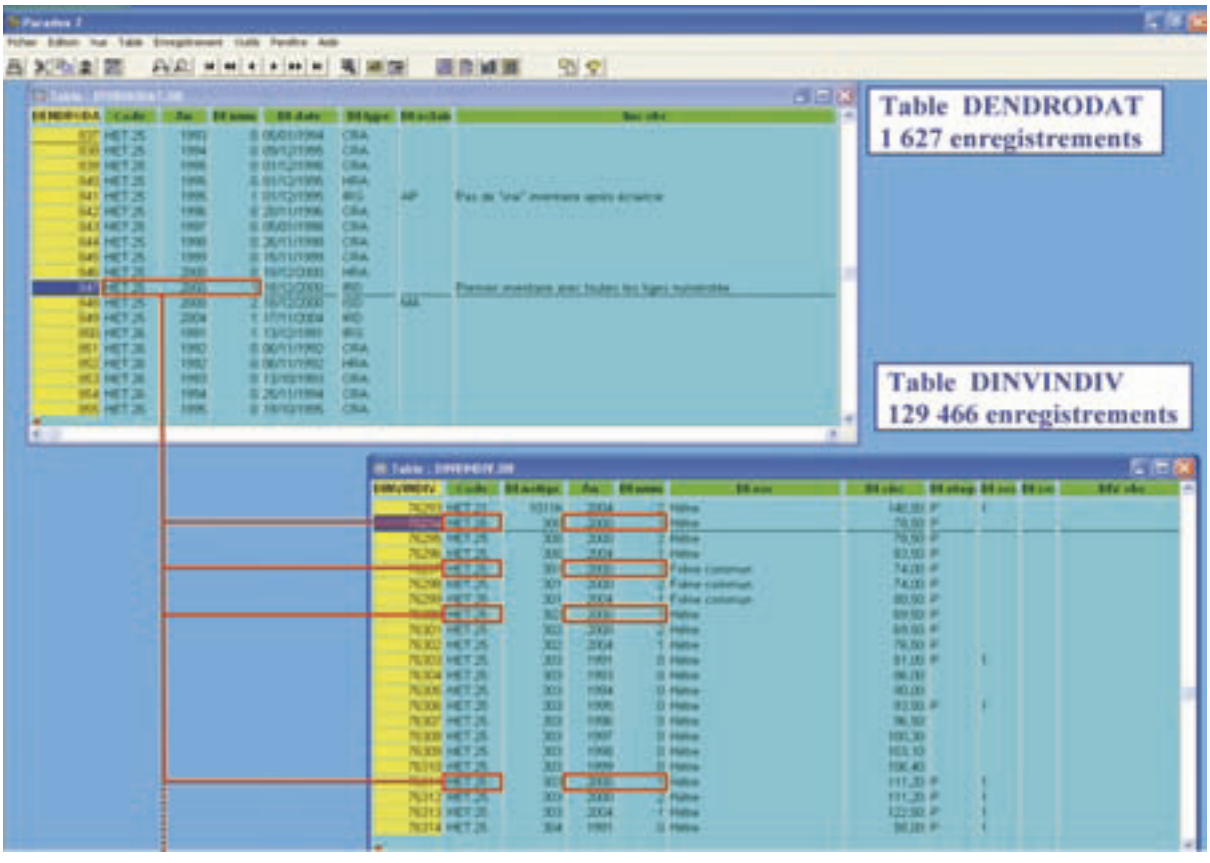


Fig. 2 : exemple de liens relationnels entre deux tables

La table DENDRODAT comporte un enregistrement pour chaque opération de dendrométrie sur une placette donnée à une date donnée ; la table DINVINDIV comporte un enregistrement pour chaque mesure individuelle de circonférence sur un arbre donné.
Ces deux tables sont liées par 3 champs communs : Code, An (Année) et DI num (Numéro de l'inventaire dans l'année). Un enregistrement de la table DENDRODAT est lié à plusieurs enregistrements (plusieurs centaines dans l'exemple ci-dessus) de la table DINVINDIV : on dit qu'il s'agit d'un lien de type « un à plusieurs » ou encore de type « parent-enfants ».

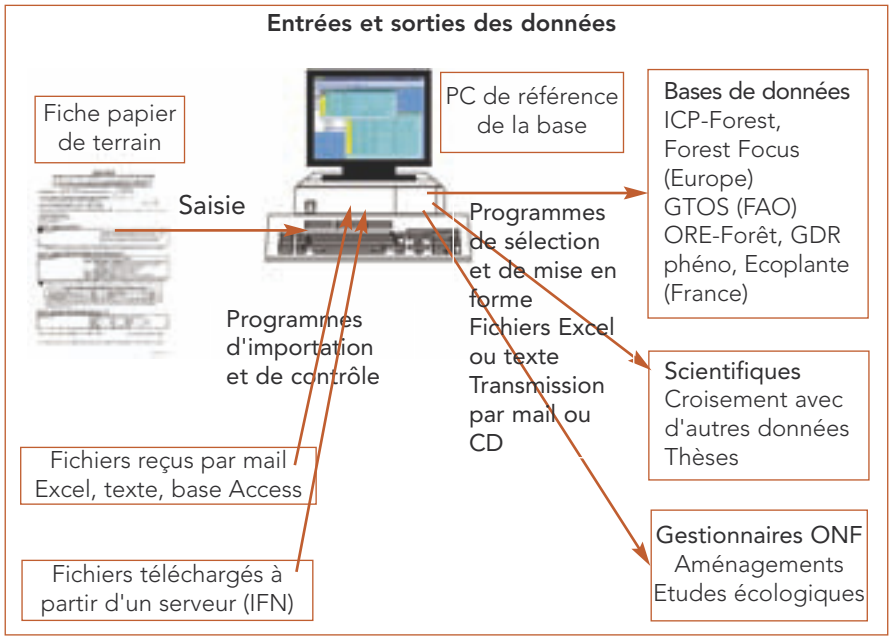


Fig. 3 : flux des données RENECOFOR

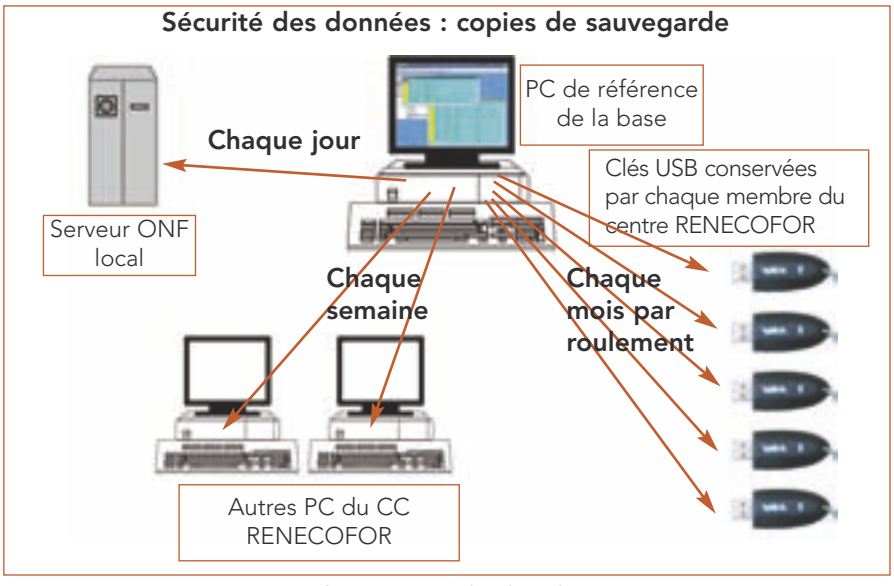


Fig. 4 : programme de sauvegarde des données RENECOFOR

encadré, figure 1 et figure 2) pour stocker et gérer l'ensemble des données RENECOFOR. Les moyens matériels et humains disponibles ont orienté le choix vers un logiciel fonctionnant sur un ordinateur de type PC. Le choix s'est porté sur le programme **Paradox** (voir encadré pour les spécialistes) qui est apparu à l'époque le plus approprié par son faible coût et sa facilité d'utilisation sur un PC de gamme moyenne.

Fin 2006, la base de données RENECOFOR rassemblait un peu plus de 60 millions de données brutes (données directement recueillies sur le terrain). Elle s'accroît d'environ 5 millions de données par an. Ces données sont réparties dans 68 tables comportant au total 850 champs.

La base possède, en outre, une centaine de tables annexes, ou de synthèse, regroupant environ un millier de champs.

Environ 300 pages de programmes spécifiques ont été écrites pour assurer le fonctionnement de la base : importation et contrôles de cohérence des données, production en routine de données synthétiques, utilitaires de gestion de la base, mise à jour de la description de la base, extraction et exportation de données sélectionnées.

Le stockage et la sécurité des données

La base de données RENECOFOR est implantée sur un ordinateur type PC classique (figure 3). Elle occupe environ 700 Mégaoctets y compris tous les modules annexes. Depuis le début du réseau quatre machines ont été utilisées successivement suivant l'évolution technologique. Le système d'exploitation est passé de Windows 3.1 à Windows 98 puis Windows XP. Bien que le logiciel Paradox soit ancien, il n'y a pas eu de problème pour le faire fonctionner sous ces différents systèmes. Il a été récemment vérifié que Paradox fonctionnait aussi sous Windows Vista.
L'ensemble de la base de données est sauvegardé quotidiennement sur un deuxième disque dur de l'ordinateur principal et sur le serveur ONF local. Hebdomadairement une sauvegarde est effectuée sur deux autres ordinateurs du centre de coordination. Ces deux machines étant également équipées de Paradox, il serait possible de reprendre «au pied levé» la gestion de la base en cas de panne complète de la machine principale. Ces sauvegardes sont effectuées *in extenso*, c'est-à-dire par copie des fichiers de la

Le logiciel Paradox (pour spécialistes)

Paradox est un Système de Gestion de Base de Donnée (SGBD) de type relationnel.
Ses premières versions fonctionnaient sous MS-DOS avant l'apparition de Windows 3.1.
Il est capable de gérer les tables de son format spécifique, mais aussi les tables au format Dbase.
Outre les tables il comporte :
- des requêtes de type Query By Exemple (QBE), immédiatement traduisibles en SQL ;
- des fiches permettant les saisies (équivalent des formulaires d'Access), mais aussi support de programmation ;
- des scripts et des bibliothèques pour programmation (analogue aux modules de VBA) ;
- des états principalement utilisés pour l'impression de données ;

Il est muni d'un langage de programmation orienté objet : ObjectPal.
L'importation de données peut se faire à partir de fichiers texte, de feuilles Excel, de tables Dbase, de tables Access.
L'exportation peut se faire vers un fichier texte ou Excel.
Les différents objets d'une base sont des fichiers séparés au niveau de Windows ; une table correspond même généralement à plusieurs fichiers Windows à partir du moment où elle est indexée et/ou comporte des champs « mémo ». Cette caractéristique demande une bonne vigilance de la part du gestionnaire mais a l'avantage de rendre beaucoup plus rapide les sauvegardes différentielles journalières. En outre la corruption d'une table n'a aucune incidence sur le reste de la base : on peut récupérer le(s) fichier(s) sauvegardés de la table concernée et tout rentre dans l'ordre.

base sans compression. Mensuellement, par roulement, une sauvegarde compressée des fichiers de la base est effectuée sur des clés USB conservées par les 5 membres du centre de coordination à leur domicile (figure 4).

La base RENECOFOR communique avec l'extérieur

De nombreuses données sont reçues par mail sous forme de fichiers. Les fichiers de type texte ou Excel et les tables Access s'importent facilement dans la base. Certaines de ces importations sont automatisées par des programmes qui effectuent également certains contrôles de cohérence ou de vraisemblance des données. De même l'ensemble des données peut être exporté soit en fichier texte, soit en fichier Excel, soit en tables de format dBase ou Access pour être utilisées par toute personne ayant à effectuer une étude à l'aide de ces données (figure 3).

Les données RENECOFOR étant recueillies à l'aide de fonds publics, elles doivent être disponibles…
La plupart des données brutes sont transmises à l'Union européenne sous des formats et des délais définis. Des programmes de la base de données assurent cette fonction. Les données alimentent les bases de données suivantes : ICP-Forest, Forest Focus (Europe) ; GTOS (FAO) ; ORE-Forêt, GDR phéno, Ecoplante (France). Au-delà, la disponibilité n'est actuellement assurée que par une mise à disposition des données suite à une demande faite auprès du centre de coordination.

La base RENECOFOR continue à évoluer

Au cours du temps des évolutions ont eu lieu dans le réseau RENECOFOR : mesures ou observations de nouveaux paramètres, amélioration des protocoles de mesures, apparition de nouveaux domaines observés.

Dans le domaine de la surveillance phytosanitaire le protocole d'observation a été révisé en 2004-2005. Ceci a entraîné une refonte complète de la structure de la base concernant ce domaine pour pouvoir d'une part conserver et maintenir accessibles les anciennes données, d'autre part accueillir les nouveaux paramètres. Pour les inventaires dendrométriques, jusqu'en 1999 les arbres de chaque placette n'étaient pas numérotés individuellement à l'exception des quelques arbres servant à des observations plus intenses (phytosanitaires et analyses foliaires notamment). Lors de l'inventaire général de 2000, toutes les tiges d'une circonférence supérieure à 15 cm ont été numérotées ce qui a nécessité également une refonte de la structure de la base dans ce domaine.

La demande croissante de fourniture de données à l'extérieur du réseau doit conduire à une plus grande automatisation de l'extraction des données ainsi qu'à la fourniture de ces données accompagnée systématiquement de commentaires sur les méthodes de mesure et d'observation. Cette fonctionnalité est en cours de développement en 2008/2010. D'ici 2010, la mise à disposition via une interface Internet est prévue, permettant aux utilisateurs ayant reçu un mot de passe de télécharger les données à leur guise.

Marc LANIER
ONF, Département Recherche
marc.lanier@onf.fr

Innovation en matière d'assurance qualité : la base de saisie en ligne « RenecoFlore »

Les relevés floristiques des placettes du réseau RENECOFOR sont réalisés par une dizaine d'équipes réparties dans toute la France. Au cours des deux premières campagnes de relevés, en 1995 et 2000, chaque équipe a saisi ses données localement puis les a envoyées à un coordinateur chargé de les rassembler et de les préparer en vue de leur traitement statistique. La correction des erreurs de saisie, la standardisation et l'homogénéisation de l'ensemble du jeu de données a nécessité un volume de travail beaucoup plus important que prévu initialement.

La résolution de ce problème s'est opérée en deux étapes : en 2000, le développement d'une base de saisie indépendante au format MS Access puis, en 2005, le développement de la base de données en ligne «RenecoFlore» basée sur une architecture Web PHP/MySQL.

Première étape : une base de saisie appropriée

La base de saisie conçue spécialement par l'université de Savoie (S. Camaret) et livrée sur CD aux équipes de botanistes a permis d'**améliorer la qualité des données saisies** grâce à :

- la diminution de la saisie proprement dite par l'utilisation de tables de référence (table des espèces, des strates, des indices, des perturbations), l'utilisateur choisissant les éléments dans des listes déroulantes au lieu de les saisir individuellement. Cela induit une diminution très nette des erreurs tout en améliorant le confort de saisie.
- la suppression des différences de dénomination, liées à l'utilisation de flores différentes, par l'utilisation d'une table des espèces représentant une référence taxonomique unique (Flora Europaea).

Restait cependant un gros travail de coordination pour le recueil et l'agrégation des contributions des équipes.

Deuxième étape, la base de données en ligne «RenecoFlore»

Le dispositif « RenecoFlore » a repris toutes les fonctionnalités de la base précédente en apportant les nouveautés que permet une base de données en ligne.

Centralisation et meilleure accessibilité du jeu de données

Les données ne sont désormais plus dispersées mais situées dans un endroit unique et accessible par tous. Chaque équipe peut dorénavant consulter et saisir ses relevés en temps réel. Elle a ainsi la maîtrise permanente de son jeu de données et peut vérifier sa cohérence (notamment temporelle) et apporter des corrections à tout moment, ce qui n'était pas possible auparavant.

Archivage des corrections et proposition de modifications

Deux procédures ont été mises en place pour permettre aux équipes d'intervenir sur les données anciennes.

1 - Chaque équipe peut apporter des corrections aux relevés anciens qu'elle a elle-même réalisés grâce à un module d'archivage. Un historique de toutes les modifications apportées est ainsi conservé.

2 - Pour les sites ayant changé d'observateur, la nouvelle équipe peut proposer des corrections, après vérifications et recoupement d'informations, pour les relevés qui ont été faits précédemment par d'autres à partir du module de proposition de modifications.

Sylvaine CAMARET
Laboratoire d'Écologie Alpine (LECA)
Université de Savoie, UFR CISM
camaret@univ-savoie.fr

Pour en savoir plus

Consulter le compte de démonstration :
URL : http://www.leca.univ-savoie.fr/db/rncflr/
Login : demo
Mot de passe : demoflore

Mode d'emploi :
http://www.leca.univ-savoie.fr/db/rncflr/aide/

Etienne Dambrine

Patrice Coddeville

Manuel Nicolas

Manuel Nicolas

Jean-Paul Party

Etienne Dambrine

Maurice Bonneau

Laurence Dalstein

Laurence Dalstein

Madeleine Günthardt-Goerg

Madeleine Günthardt-Goerg

Jean-François Dobremez

Frédéric Archaux

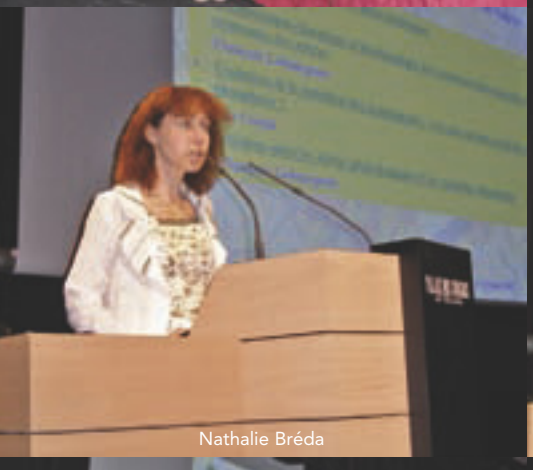
Frédéric Archaux

Nuria Ruiz Camacho

Nuria Ruiz Camacho

Régis Courtecuisse

Intervenants de la 4ème session présidée par Jean-François Dobremez


Nathalie Bréda

Vincent Badeau

François Lebourgeois

Luc Croisé

François Lebourgeois

Atelier « bioindication » : Laurence Dalstein, Jean-Claude Gégout, Madeleine Günthardt-Goerg

Atelier « Modélisation » : Vincent Badeau, Jean-François Dhôte, François Lebourgeois

Jacques Valeix

Atelier « Comment améliorer l'observation des effets des changements globaux en forêt ? » : Jean-François Dobremez, Guy Landmann, Myriam Legay

Myriam Legay, Guy Landmann, Jean-François Dobremez

Intervenants de la 7ème session présidée par Brigitte Pilard-Landeau

Claude Parini

Allocution « inaugurale » du père intellectuel de RENECOFOR : Maurice Bonneau

Comment en est-on venu à l'idée de créer RENECOFOR ?

Dès le début de 1985, deux causes de dépérissement des peuplements d'épicéa et de sapin des Vosges étaient clairement identifiées : des arrière-effets de la sécheresse de 1976 sur des peuplements insuffisamment éclaircis et sur sols superficiels, et des carences en magnésium et calcium sur les sols les plus pauvres. Un peu plus tard, on s'est interrogé sur de possibles effets de doses élevées d'ozone dans l'air.

Si les deux premières causes avaient été détectées avant le dépérissement, il aurait été possible de l'éviter en procédant à des éclaircies et amendements dolomitiques, ces derniers ayant prouvé leur efficacité dans des essais de recherche et des essais pilotes sur plusieurs dizaines d'hectares.

De cela il est facile de déduire l'intérêt d'observations régulières des peuplements qui permettraient de déceler à temps des risques de dépérissement.

Encore faut-il bien s'entendre sur ces observations. Les deux causes évoquées ci-dessus ne sont pas les seules qui peuvent conduire à des dysfonctionnements de la forêt : des froids intenses à certaines saisons, des pollutions diverses, des erreurs sylvicoles, dans le choix des essences par exemple, peuvent avoir de fâcheuses conséquences. Les observations à pratiquer doivent donc être « multi-directionnelles ».

Il faut de plus avoir bien conscience de ce que l'on cherche pour mettre en place un réseau de type « RENECOFOR » :

- ce ne sont pas les premiers signes de dépérissement qui sont intéressants car, lorsqu'on les perçoit, il est déjà trop tard ; ce qu'il faut c'est pouvoir détecter les évolutions qui vont conduire à ces premiers signes. Pour cela il faut saisir non pas l'état à un moment donné de divers caractères, mais une évolution temporelle de ces caractères.
- il faut avoir conscience de ce que les peuplements les plus fragiles, situés dans des conditions écologiques limites, vont varier très rapidement, à des pas de temps courts, d'un état annonciateur de dysfonctionnement à un dysfonctionnement patent, ou bien revenir, si les conditions s'améliorent, à un fonctionnement normal. Ce qu'il est souhaitable au contraire d'observer, ce sont des évolutions à pas de temps assez long. Il ne faut donc s'adresser ni à des peuplements en conditions difficiles, ni à des peuplements en situation de fertilité ou d'exposition excellente dont la santé est toujours bonne.

Enfin la détection de tendances au dysfonctionnement n'a d'intérêt pratique pour une prévention que si les causes qui les produisent peuvent être mises en évidence…

Quelles conditions ce réseau devait-il remplir ?

En résumé RENECOFOR, dès l'instant où sa création a été décidée, devait être constitué de peuplements situés en conditions moyennes. Comme il était difficile de créer un trop grand nombre de placettes d'observation (102 c'est déjà beaucoup !) il a été décidé de privilégier les grandes régions forestières productives et les grandes essences qui concourent le plus à l'économie du bois. Il était d'entrée évident que ce choix ne conduirait pas à un réseau représentatif de l'ensemble des forêts françaises : 102 placettes n'auraient pas suffi pour un tel objectif et il y avait déjà un projet en cours, le « réseau européen » de 520 points d'observation qui, beaucoup plus dense, pouvait être représentatif de l'ensemble de nos forêts.

RENECOFOR, ONF

Le programme d'observations s'est inspiré du manuel européen du PIC Forêt qui prévoyait déjà

des placettes de niveau I (réseau européen) et des placettes de niveaux II et III (RENECOFOR). Les observations à faire dans ces deux types de placettes ont été décidées évidemment au préalable, en fonction des recommandations du PIC et après consultation de spécialistes français de bioclimatologie et sylviculture. Un cahier des charges précis a été établi portant sur :

- le peuplement lui-même, à savoir l'état du feuillage, la présence de parasites ou de ravageurs, la productivité : accroissement en diamètre et abondance des litières produites, la phénologie (dates de débourrement et de jaunissement automnal), la composition foliaire ;
- son environnement, à savoir diverses caractéristiques de fertilité physique et chimique des sols, le climat (pluviométrie, température, hygrométrie), la pollution et la flore du sous-bois et faune des humus.

Il fallait aussi se garder du danger que l'activité de suivi et d'observation influe sur le peuplement ou son environnement. D'où l'idée d'une zone périphérique entourant la placette d'observation et où puissent être conduits, sans causer de dommage au peuplement, les prélèvements de litière, de feuillage ou de carottes de bois par exemple. Ne doivent être effectuées dans le peuplement lui-même que des activités non modificatrices et ne nécessitant qu'un nombre limité d'intrusions annuelles. Les prélèvements de sols ont été une exception : ils ont été faits dans la placette proprement dite mais ne se renouvellent que tous les 10 à 15 ans.

Voilà, brièvement, mais suffisamment exposées les réflexions qui ont présidé à la rédaction des directives de création et de fonctionnement de RENECOFOR. S'y ajoutaient, mais Georges Touzet l'a déjà dit et un très bref rappel suffit donc : l'assurance de la pérennité des placettes, l'assurance de la pérennité de l'organisme gestionnaire, l'assurance enfin de la qualité de la mise en place du réseau et de son fonctionnement. D'où respectivement le choix de forêts domaniales ou communales, le choix de l'ONF et le choix enfin d'un responsable connaissant bien le problème, bon organisateur, méticuleux, intéressé par le sujet. La personne qui a été choisie donnait a priori toutes assurances sur ces différents points et les résultats ont totalement confirmé les espérances.

Maurice BONNEAU
Initiateur intellectuel du réseau RENECOFOR
Ingénieur Général du GREF
Directeur de recherche honoraire de l'INRA
maurice.bonneau@tele2.fr

RENECOFOR, ONF

Collection des résumés des posters

Les participants, en particulier ceux qui ne sont pas directement impliqués dans le réseau RENECOFOR, étaient invités à présenter un poster. Pour des raisons pratiques, nous ne reproduisons pas ici les posters eux-mêmes, mais les résumés proposés par leurs auteurs.

Seule la série des posters « RENECOFOR » exposés dans le hall d'accueil est reproduite telle quelle à la fin de ce volume.

Diversité floristique des sites RENECOFOR dans les Alpes françaises : les plus riches de France

Le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers comprend 9 sites situés dans les Alpes françaises. Un dispositif d'enclos protège la partie centrale de la placette et ses 4 bandes de relevés floristiques des interactions avec la grande faune sauvage ou domestique. Elles font l'objet de relevés depuis 1994-1995 (PS 04, HET 04, MEL 05 et SP 38 : 4 campagnes de relevés, 9 passages ; SP 05, SP 26, HET 26, EPC 73, EPC 74 : 12 campagnes de relevés, 26 passages). À chaque passage, 8 relevés de 100 m² ont été faits, selon la méthode Braun-Blanquet, sur des bandes repérées et matérialisées de 50 m x 2 m (4 relevés dans l'enclos, 4 relevés à l'extérieur de l'enclos). Chaque espèce est notée dans l'une ou plusieurs des 5 strates prédéfinies. La méthode des quadrats (1 m²) et la méthode des points contacts ont été mises en œuvre lors de 2 campagnes et 4 passages dans le site SP 26. Le jeu total de données comporte 166 relevés Braun-Blanquet, 800 quadrats, 6 000 points contact, et recense 550 espèces de végétaux.

Les sites des Alpes françaises sont les plus riches de France en espèces végétales (en moyenne 93 espèces par site comparées aux 65 espèces des sites de montagne en général, aux 45 espèces des sites atlantiques et aux 45 espèces des sites continentaux – données de l'année 2000) et parmi les plus riches d'Europe. La méthode Braun-Blanquet est la plus performante des 3 méthodes comparées,

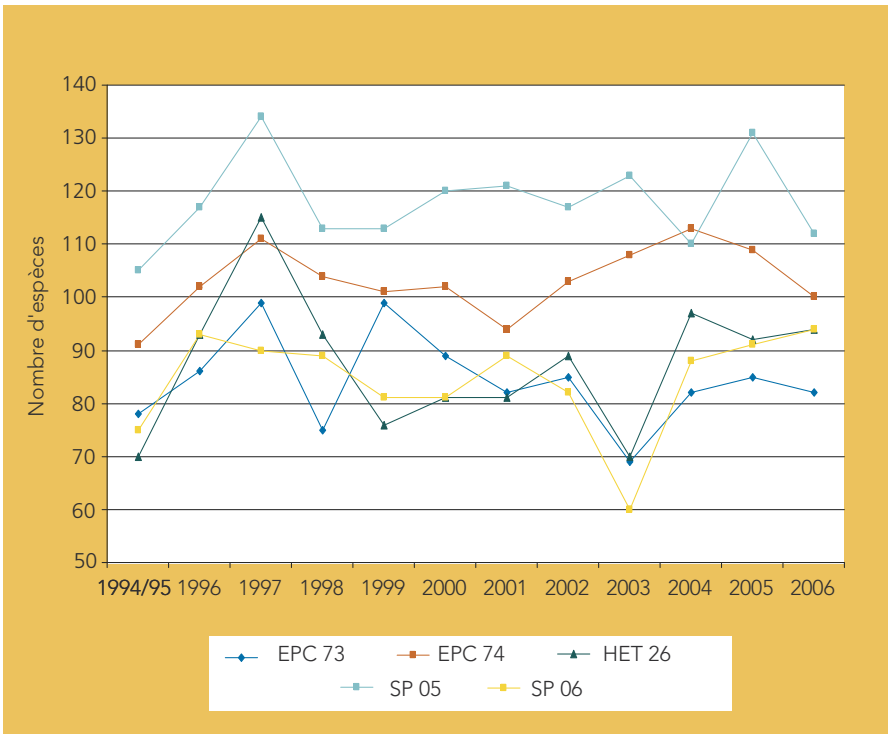


Fig. 1 : évolution du nombre d'espèces observées sur 5 sites des Alpes en été montrant l'effet de la sécheresse 2003 de façon irrégulière

tant pour le nombre d'espèces décelées que pour le temps nécessaire.

De nombreuses espèces sont observées de façon très irrégulière (espèce nouvelle pour une campagne ou espèce disparaissant après une ou plusieurs observations), mais elles ont toujours un indice d'abondance-dominance faible. Les éclaircies dans les peuplements sont la première raison des apparitions/disparitions sans être l'unique raison. À chaque passage le nombre cumulé d'espèces rencontrées augmente.
Les placettes des Alpes françaises ont enregistré la sécheresse de 2003 de façon irrégulière (figure 1 page précédente), seulement après l'été. En 2004, la méthode des relevés n'indique aucun effet de l'épisode sec de l'année précédente.

Après 4 ou 12 campagnes, la seule évolution certaine est due à la protection par le grillage de l'enclos. Le passage tous les 5 ans masque de nombreuses variations interannuelles qui permettraient, peut être de montrer des tendances d'évolution à long terme. Le traitement des données en cours devrait confirmer la *montée en altitude* des espèces.

Laurence BOURJOT
Bourjot Environnement
laurence.bourjot@free.fr

Sylvaine CAMARET
Laboratoire d'Écologie Alpine,
Université de Savoie
camaret@univ-savoie.fr

Jean François DOBREMEZ
jf.dobremez@free.fr

Interactions ongulés-forêts dans les sites RENECOFOR des Alpes françaises

Le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers comprend 9 placettes situées dans les Alpes françaises. Un dispositif d'enclos protège la partie centrale de la placette et ses 4 bandes de relevés des interactions avec la grande faune sauvage ou domestique. Elles sont suivies depuis 1994-1995 (PS 04, HET 04, MEL 05 et SP 38 : 4 campagnes de relevés, 9 passages ; SP 05, SP 26, HET 26, EPC 73, EPC 74 : 12 campagnes de relevés, 26 passages). À chaque passage, 8 relevés de 100 m^2 ont été faits, selon la méthode Braun-Blanquet, sur des bandes repérées et matérialisées de 50 m x 2 m (4 relevés dans l'enclos, 4 relevés à l'extérieur de l'enclos). Chaque espèce est notée dans l'une ou plusieurs des 5 strates prédéfinies. Les méthodes des quadrats de 1 m^2 et des points contacts ont été mises en œuvre lors de 2 campagnes et 4 passages dans la parcelle SP 26. Le jeu total de données comporte 166 relevés Braun-Blanquet, 800 quadrats, 6 000 points contact et recense 550 espèces de végétaux.

Au total, 6 espèces d'ongulés fréquentent régulièrement les forêts abritant les placettes : mouton domestique, cerf élaphe, chevreuil, chamois, mouflon, sanglier. Ni bovins, ni caprins et ni équins domestiques, ni daims, ni cerfs sika ni bouquetins, pourtant présents à proximité au moins pendant une partie de l'année, n'ont pénétré dans les placettes.
À chaque passage, ont été recensés systématiquement et notés tous les indices de présence d'ongulés sauvages et domestiques : vue directe, raires et bêlements, empreintes et traces, poils, broutis et vermillis… Les indices suivants : frottis et écorçages, abroutissements, traces de dents sur feuilles ou tiges… sont inclus dans la base de données générale, sous forme d'exposant à la valeur d'abondance-dominance. Ces données fournissent des indications sur les espèces et leur densité.

L'observation des différences d'aspect entre enclos et extérieur, surtout concernant les ronces et les très jeunes arbres apporte la preuve des interactions, mais seul le traitement des données qualitatives et quantitatives obtenues essentiellement par la méthode Braun-Blanquet permet d'analyser précisément les conséquences des interactions.

Les interactions ongulés-forêts se matérialisent sous différentes formes :
- consommation totale ou partielle : *Abies alba, Prenanthes purpurea, Rosa pendulina, Sorbus aria subsp. aria*… La liste est variable d'une placette à l'autre : des espèces sont prélevées systématiquement, d'autres non. Les données recueillies ne permettent pas de préciser les choix ou les stratégies alimentaires. La non-observation de traces de consommation n'est pas une preuve de non-consommation.
- Apparition ou disparition d'espèces : elles sont rares et difficiles à caractériser surtout pour les espèces à faible abondance dont la présence peut être liée à d'autres influences. Seul *Abies alba* peut disparaître sous l'effet des abroutissements répétés ;
- Diminution ou augmentation de l'abondance-dominance ; c'est le cas général des interactions, mais pas toujours mis en évidence par les techniques de relevés. *Rubus fruticosus* augmente en enclos et diminue à l'extérieur (figure 1).

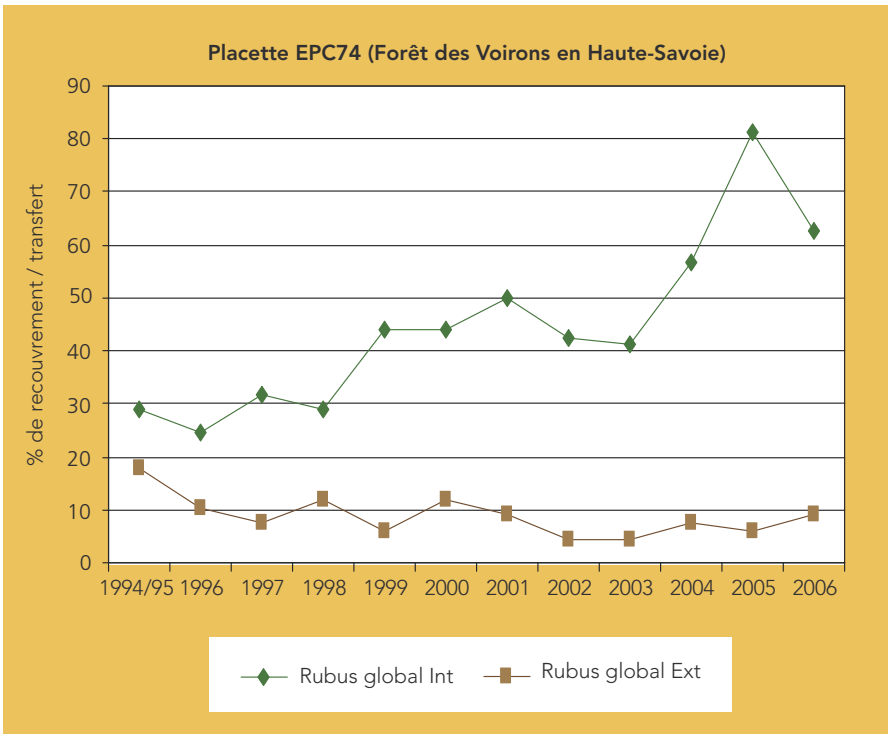


Fig. 1 : évolution du recouvrement des ronces (Rubus sp.) à l'intérieur et à l'extérieur de l'enclos

Cette modification est souvent à l'origine de toutes les autres : augmentation de *Hordelymus europaeus* à l'extérieur en raison de la diminution de la compétition, diminution de nombreuses espèces sous le couvert de *Rubus fruticosus* dans les enclos. Lorsque *Prenanthes purea* est consommé systématiquement à l'extérieur, son indice d'abondance-dominance ne change pas forcément si seules les parties supérieures de la plante sont prélevées.

Les interactions ongulés-forêt peuvent donc modifier les structures spécifiques et spatiales de la forêt, mais modifient-elles le fonctionnement de l'écosystème et changent-elles son avenir ? Seul le suivi à long terme pourra apporter une réponse claire. Dès à présent, les modifications fortes des populations de jeunes arbres, tant dans les enclos qu'à l'extérieur, peuvent orienter l'évolution des peuplements. L'augmentation du recouvrement de *Rubus fruticosus* marque fortement le fonctionnement des strates inférieures des écosystèmes.

Jean François DOBREMEZ
jf.dobremez@free.fr

Laurence BOURJOT
Bourjot Environnement
laurence.bourjot@free.fr

Les éléments traces métalliques : apports par les précipitations et disponibilité au sein des sols du réseau RENECOFOR

Lors d'une thèse, la dynamique des éléments traces métalliques (ETM) sera étudiée dans les sols, solutions de sol et les précipitations hors et sous couvert forestier des placettes RENECOFOR. Cette étude participera à la définition des charges critiques en métaux pour les écosystèmes forestiers français.

La présence d'éléments traces métalliques (ETM : As, B, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni, Zn et Pb) dans l'atmosphère résulte de processus naturels (ré-envolement de particules terrigènes, émissions volcaniques), mais surtout d'activités anthropiques (activités minières et industrielles, transport routier, agriculture). Transportés majoritairement sous formes de particules micrométriques, ces éléments peuvent parcourir de longues distances et affecter des régions *a priori* indemnes de pollution, tels que les écosystèmes forestiers. Ceux-ci sont particulièrement sensibles aux pollutions atmosphériques : le couvert forestier interagit avec les apports atmosphériques et peut les concentrer. Lessivés, les éléments traces métalliques atteignent le sol. Certains (As, B, Cu, Mo, Ni, et Zn) sont des oligoéléments pouvant devenir toxiques à forte concentration, et d'autres n'ont pas de fonction biologique connue et sont toxiques à très faible concentration (Cd, Cr et Pb). C'est pourquoi, l'effet de ces apports cumulés doit être évalué.

La solution du sol : un compartiment clef de l'écosystème forestier

Le compartiment de l'écosystème considéré comme le plus sensible, est la solution du sol. En effet, les plantes y puisent les nutriments mais également les contaminants,

et c'est aussi à partir de la solution du sol que s'effectuent les transferts vers les eaux souterraines et superficielles. L'impact de ces éléments sur l'environnement est lié à leur disponibilité, c'est-à-dire leur potentiel d'assimilation par la faune et la flore. Celle-ci est régie d'une part, par leur spéciation en phase solide (nature des phases porteuses de ces éléments) qui fixe leur capacité à passer dans la solution du sol et d'autre part, à leur spéciation en phase aqueuse (formes chimiques des éléments en solution). C'est sous la forme d'ion libre (Mz +) ou de petits complexes organiques que les ETM sont potentiellement assimilables.

Les charges critiques en métaux pour les écosystèmes forestiers

Définition de la charge critique : valeur d'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle il n'apparaît pas d'effets significatifs indésirables sur des éléments sensibles du milieu en l'état actuel des connaissances.

La réduction des pollutions atmosphériques est décidée en Europe dans le cadre de la convention des Nations unies sur la pollution atmosphérique à longue distance, qui a retenu le concept de charge critique pour déterminer les seuils des dépôts atmosphériques.

Au sein des écosystèmes forestiers français, les données actuellement disponibles sur les métaux concernent les teneurs mesurées dans les mousses dans le cadre du réseau BRAMM (voir article dans ce volume), et la phase solide des sols (Février-Vauléon, 2000, Hernandez, 2003, Probst *et al.*, 2003). Dans l'objectif d'une cartographie précise des charges critiques pour les métaux, il est nécessaire de poursuivre ces travaux et d'acquérir des données d'une part sur les apports atmosphériques en milieu forestier, et d'autre part sur les concentrations et le type de métaux dans les solutions du sol d'écosystèmes forestiers.

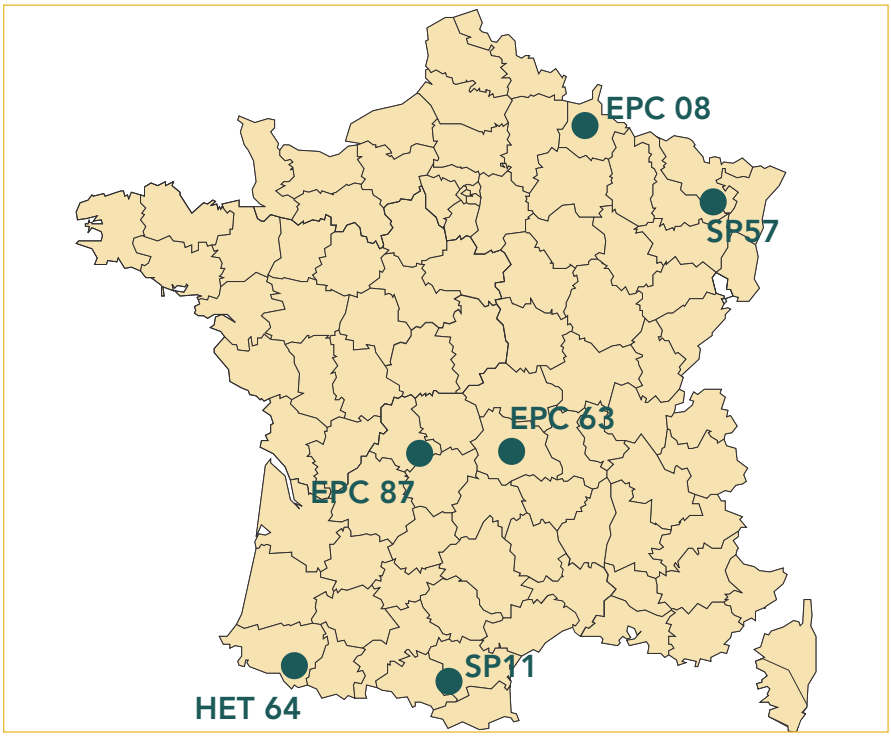


Fig. 1 : localisation des sites d'étude

Suivi de terrain des ETM dans les précipitations et solutions du sol

L'étude présentée ici concerne l'étude des métaux dans les solutions du sol et les précipitations hors et sous couvert forestier des placettes RENECOFOR. Les teneurs et les formes chimiques des ETM seront déterminées en relation avec les paramètres de la solution (pH, matière organique dissoute, ligands inorganiques) et les différentes phases porteuses (particulaires, dissoutes et colloïdales). Le suivi des flux atmosphériques permettra de préciser le rôle de différents types de couverts forestiers. Ce suivi a été engagé sur six placettes (EPC 08, EPC 63, EPC 87, HET 64, SP 11, SP 57 ; figure 1) grâce au soutien logistique du réseau RENECOFOR et de son sous-réseau CATAENAT.

Des bougies en téflon/quartz et en nylon permettront de suivre précisément les concentrations en ETM et matière organique dissoute. Hors couvert forestier, une jauge d'Owen dédiée sera utilisée afin d'effectuer un suivi du dépôt total, alors que sous couvert forestier, les collecteurs des précipitations sous forêt (pluviolessivats) en place seront utilisés. Parallèlement, des mesures de teneurs en ETM dans les mousses seront effectuées en collaboration avec le réseau BRAMM.

L'ensemble de ces suivis seront effectués durant un an à partir de septembre 2007, après une période de mise en place et rodage du matériel (printemps 2007). Les solutions de sol sont également extraites par centrifugation de sol frais afin d'établir les coefficients de partage entre les phases solides et liquides des ETM pour les différents sols forestiers étudiés. Les solutions ainsi récoltées permettront d'acquérir des données de concentration et de

spéciation (déterminée directement ou par modélisation) en ETM pour différents compartiments (sol, solution du sol et précipitations) d'écosystèmes forestiers français.

Résultats attendus

L'objectif de ce travail de thèse soutenu par l'Ademe, est de déterminer quels paramètres du sol et de la solution du sol contrôlent la concentration en ions libres (potentiellement toxique) dans la solution du sol, afin d'établir des fonctions de transfert de ces éléments reliant cette concentration en ions libres (difficilement accessible) à des paramètres clefs du sol plus facilement mesurables (pH, MO…). Cette étape de modélisation permettra d'étendre l'étude à d'autres sols forestiers français en vue d'une cartographie des charges critiques en éléments trace métalliques. Les apports atmosphériques actuels seront comparés aux charges critiques établies.

Laure GANDOIS, Anne PROBST, Camille DUMAT
EcoLab UMR 5245 CNRS-INPT-UPS-ENSAT
laure.gandois@ensat.fr

Références

FÉVRIER-VAULÉON C., 2000. Évaluation de la sensibilité aux éléments traces métalliques des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg. 241 p.

HERNANDEZ L. (2003) Dynamique des éléments traces métalliques dans les sols de différents écosystèmes forestiers français. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse. 260 p.

PROBST A., HERNANDEZ L., FÉVRIER VAULÉON C., PRUDENT P., PROBST J.-L., PARTY J.-P., 2003 : RENECOFOR — Éléments traces métalliques dans les sols des écosystèmes forestiers français : distribution et facteurs de contrôle - utilisation du réseau RENECOFOR. Fontainebleau : ONF. 69 p.

Danger potentiel du nématode du pin, Bursaphelenchus xylophilus, pour les conifères d'Europe

Au cours de ces 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers en France, le nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer, 1934, Nickle, 1970), n'a pas forcé l'attention des observateurs. Ce nématode de la famille des *Aphelenchoididae* est responsable d'une affection grave des conifères, décrite aux USA en 1934. Elle s'est étendue, depuis, au Japon dès 1969, puis à la Chine, pour arriver au Portugal en 1999. La Communauté européenne a inscrit ce nématode comme organisme de quarantaine dès 1977 (directive 93/77). Jusqu'à présent la France est restée indemne de ce parasite, comme les autres pays européens à l'exception, donc, du Portugal. Dans ce dernier pays, on redoutait son extension, à partir du foyer initial situé au sud de Lisbonne, vers le million d'hectares de plantations de pin maritime, *Pinus pinaster* Aiton. Cependant tout le matériel végétal contaminé de ce foyer initial semble avoir été détruit à temps. Comme le million d'hectares de plantations du même *P. pinaster* dans les Landes, en France, n'est qu'à 900 km de cet unique foyer européen, il y a lieu de supputer les risques d'infestation.

Rappelons que *B. xylophilus* est transporté par un insecte xylophage, du genre *Monochamus* Dejean, 1821, Coléoptère, *Cerambycidae*, de la sous-famille des *Lamiinae*, vulgairement appelés longicornes. Les insectes adultes transportent des juvéniles du nématode, sous leurs élytres (ailes antérieures de certains insectes) et dans leurs trachées, lorsqu'ils effectuent leur vol initial vers un conifère nouveau, après l'émergence. Lors de la prise de nourriture de l'insecte sur les jeunes rameaux, les juvéniles du nématode quittent l'insecte et pénètrent dans le bois par les blessures de nutrition. Ils reprennent alors leur croissance vers le stade adulte dans les canaux à résine en se nourrissant des cellules épithéliales (cellules jointives et solidaires les unes des autres grâce à des jonctions intercellulaires). Trois semaines plus tard, l'arbre présente des symptômes de dessèchement. Les nématodes peuvent alors se déplacer et se multiplier dans tout l'arbre, qui meurt 30 à 40 jours après l'infection. Les larves de l'insecte se sont développées de leur côté, après l'éclosion des œufs pondus dans l'écorce, en se nourrissant aux dépens du phloème et du cambium. Au terme de ce développement, les nymphes de l'insecte, localisées dans des loges pratiquées dans l'aubier, exercent une attraction sur les juvéniles du nématode, qui se rassemblent à proximité. Les adultes de *Monochamus* se contaminent par contact lorsqu'ils émergent activement des loges, avant de prendre leur envol pour un nouveau cycle.
Le longicorne vecteur au Portugal

n'est autre que le *Monochamus galloprovincialis* (Olivier, 1795), natif de l'Aquitaine et fréquent dans les Landes. Au cours d'une enquête conduite dans les Landes, dans les années 1970, le nématode *Bursaphelenchus mucronatus* a été trouvé dans des troncs de pin maritime morts de dépérissement. On a montré depuis que cette espèce n'est qu'un pathogène mineur. La même enquête, d'ailleurs, mettait en doute la nocuité possible de tels nématodes dans les Landes, tant la différence des conditions écologiques entre les Landes et les zones atteintes par le nématode du pin au Japon semblait alors importante. Des longicornes contaminés peuvent migrer ou être transportés accidentellement depuis le Portugal jusqu'en France, mais le nématode peut aussi bien être introduit en un autre lieu d'Europe par la réception de bois contaminé. Si ce nématode atteignait néanmoins les Landes, où se trouve déjà son insecte vecteur, une situation analogue à celle du Portugal serait-elle possible ?

L'abondance du nématode dans les tissus du pin, résultant d'un nombre élevé de générations successives, conditionne les dégâts, et dépend directement de la température. Celle-ci détermine en effet la longueur du cycle de ce poïkilotherme (être vivant dont la température corporelle varie), qui est de 12 jours à 15 °C, 6 jours à 20 °C et 3 jours à 30 °C. On estime aujourd'hui que les dégâts ne sont graves que si la température estivale moyenne dépasse 20 °C. Cette température moyenne de 20 °C est dépassée pendant plus de 4 mois à Lisbonne et à Kagoshima (Latitude : 31,2° N), sur l'île Japonaise de Kyushu, où les dégâts dus à cette affection sont considérables. Par contre elle n'est dépassée que durant un mois à Hakodate (Latitude : 41,8° N), sur l'île Japonaise d'Hokkaido, aujourd'hui épargnée. Les températures estivales moyennes des Landes (illustrées par Mont-de-Marsan), pour la normale climatique 1961-1990, ne dépassent ce seuil de 20 °C que pendant un mois et demi, 47 jours précisément.

Toutefois l'analyse de l'évolution du nombre de jours au-dessus de 20 °C à Mont-de-Marsan témoigne de leur augmentation sur les dernières décennies : entre 40 et 50 dans les décennies cinquante, soixante et soixante-dix, 56 dans les années quatre-vingt, 62 dans les années quatre-vingt-dix et 71 depuis le début des années 2000. On s'achemine donc, au terme d'un petit nombre de décennies, vers des températures moyennes favorables à des dégâts importants si une contamination avait lieu. Si cette éventualité devait être confirmée, une difficulté viendrait de la biodiversité des nématodes trouvés dans les troncs de pins morts après dépérissement. Plusieurs espèces de nématodes peuvent être présentes, incluant des espèces de *Bursaphelenchus*, mais seul *B. xylophilus* est pathogène. Son identification doit être certifiée avant d'appliquer les sévères mesures exigées dans le cas de cet organisme soumis à quarantaine. Le diagnostic précis de cette espèce par des techniques de biologie moléculaire est au point et déjà utilisé par le laboratoire national de la Protection des Végétaux de Rennes pour surveiller les entrées de bois en France.

Georges REVERSAT
Institut de Recherche pour le Développement
Laboratoire d'Écologie des Sols Tropicaux
Georges.Reversat@bondy.ird.fr

Gérard TAVAKILIAN
IRD-Muséum National d'Histoire Naturelle
tava@mnhn.fr

Yves RICHARD
Centre de Recherche de Climatologie
UMR5210 CNRS, Université de Bourgogne
yrichard@u-bourgogne.fr

Géraldine ANTHOINE
Laboratoire National de la Protection des Végétaux, Nématologie
geraldine.anthoine@rennes.inra.fr

La résistivité électrique : une nouvelle méthode de cartographie de certaines propriétés des sols forestiers et des formes d'humus

Pourquoi mesurer la résistivité électrique des sols ?

L'hétérogénéité spatiale des sols forestiers doit être prise en compte tant par le gestionnaire que par le scientifique, notamment lorsqu'il s'agit d'étudier d'éventuelles modifications sur le long terme. Actuellement, les méthodes qui permettent de rendre compte de cette hétérogénéité sont peu nombreuses et conduisent la plupart du temps à l'altération, voire la destruction, du milieu étudié. Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont montré des relations entre les propriétés physiques et chimiques du sol et sa résistivité électrique. La résistivité électrique (ρ) est définie comme suit : $\rho = K.\Delta V/I$ où K est un facteur géométrique qui dépend de la configuration utilisée lors de la mesure, ΔV la différence de potentiel et I l'intensité (donc $\Delta V/I$ la

résistance). La majorité des études actuelles sont menées sur les sols agricoles alors que les études sur les sols forestiers sont très rares. Le but de notre étude est : (i) d'identifier dans quelle mesure les propriétés des sols forestiers influencent la résistivité électrique ; (ii) de préciser les éventuelles implications pour la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du sol lors de la mise en place de protocoles expérimentaux.

Comment mesure-t-on la résistivité électrique des sols ?

Les mesures de résistivité sur une maille de 5x10 m sur l'ensemble de la placette nous ont permis de tracer une carte de résistivité électrique du sol. Cette carte est ensuite utilisée pour définir un protocole d'échantillonnage du sol équilibré entre les différentes classes de résistivité et relier ainsi les propriétés mesurées du sol à une valeur de résistivité *in situ*. La campagne de mesure se déroule sur 2 jours : la mesure de résistivité le premier jour ; le prélèvement des 24 échantillons de sol le second jour, la localisation des points d'échantillonnage étant définie à partir de la carte de résistivité. Pour que ces mesures soient valables, il ne doit pas pleuvoir entre les 2 phases de travail. Les résultats présentés ont été obtenus sur la placette RENECOFOR EPC 74, située dans la forêt domaniale des Voirons, en Haute-Savoie (figure 1).

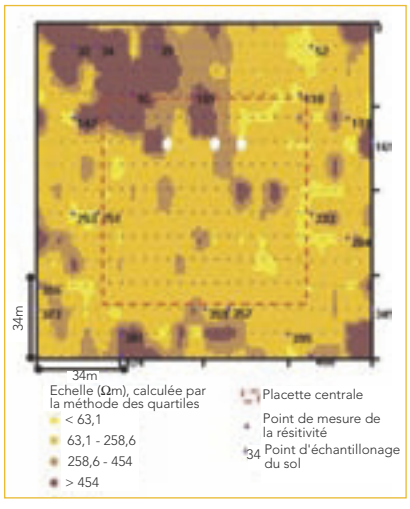


Fig. 1 : carte de résistivité de la placette EPC 74 et points d'échantillonnage du sol

Deux exemples de caractérisation des variations des propriétés du sol : la teneur en argile et la forme d'humus

On observe des corrélations significatives entre certaines propriétés du sol et la résistivité mesurée sur la placette. Ainsi, la résistivité traduit 57 % des variations de la teneur en argile du sol et 41 % des variations des formes d'humus (figure 2). La résistivité représente une mesure indirecte et non destructive des propriétés du sol qui permet d'établir une cartographie assez précise de ces propriétés. Sur la placette EPC 74, les zones de forte résistivité (brun foncé) correspondent à des sols sableux drainants, pauvres en cations échangeables et à humus peu actifs (Dysmull), probablement issus de la désagrégation de moraines glaciaires. Les zones de faible résistivité (jaune) correspondent à des

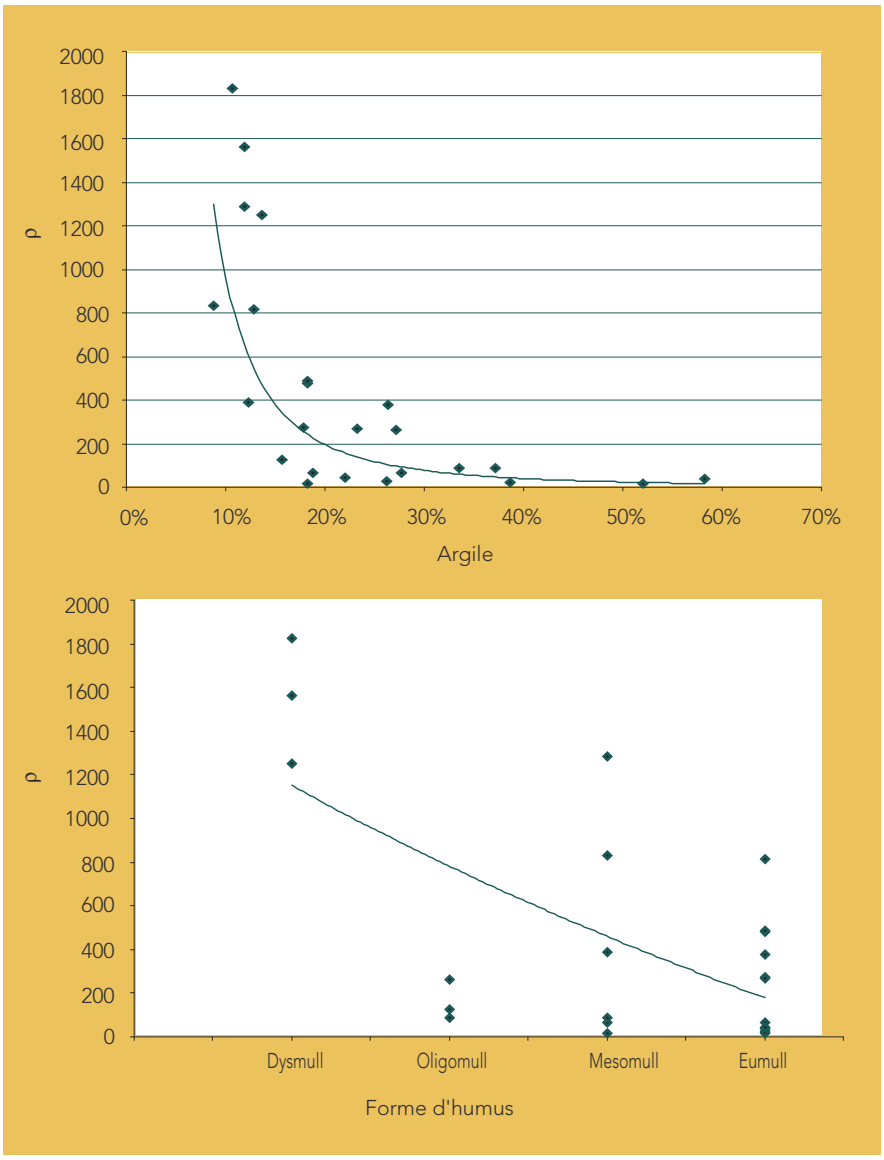


Fig. 2 : exemples de relations entre résistivité (ρ) et propriétés du sol
Coefficients de corrélation :
ρ = f(%Argile): R^2 = 0.57, p<0.0001 ;
ρ = f(Forme d'humus): R^2 = 0.41, p<0.001.

sols argileux riches en cations et à formes d'humus actives (Eumull).

Nos résultats confirment ceux obtenus en terrains agricoles pour les propriétés intrinsèques du sol (texture, chimie). La corrélation avec la forme d'humus est plus originale et permet une cartographie de ce compartiment clé du milieu forestier qui assure de nombreuses fonctions de l'écosystème. Cependant, la calibration des mesures de résistivité par au minimum 6 échantillons de sol doit être reproduite pour chaque site étudié car les variations spatiales et temporelles de propriétés telles que l'humidité influencent fortement les mesures et ne permettent pas de construire un modèle général de relation résistivité/propriétés du sol.

Implications pour le réseau RENECOFOR

L'utilisation de la résistivité électrique a un triple intérêt car elle permet : (i) d'obtenir des informations spatialisées sur la placette étudiée ; (ii) de définir des protocoles expérimentaux qui prennent en compte la variabilité spatiale des propriétés du sol ; (iii) de réaliser des suivis dans le temps dans le but de détecter des modifications de fertilité.

Yoan PAILLET, Nathalie CASSAGNE, Lauric CECILLON, Vincent BRETON, Éric MERMIN, Pascal TARDIF, Jean-Jacques BRUN
CEMAGREF Grenoble
Unité de Recherche Écosystèmes Montagnards
prénom.nom@cemagref.fr

Cartographie des caractéristiques chimiques des sols forestiers en Saxe (Allemagne)

Une connaissance fine des caractéristiques chimiques des sols est nécessaire pour une gestion forestière raisonnée. En l'absence d'analyses de sol en tout point du territoire, des techniques statistiques utilisant les corrélations spatiales des mesures entre elles permettent d'estimer ces valeurs entre les points de mesure. Une approche géostatistique a été utilisée pour estimer certaines caractéristiques chimiques des sols forestiers en Saxe. Les analyses ont porté sur des échantillons prélevés sur environ 280 profils du sol de la grille systématique 4 x 4 kilomètres (réseau de niveau I). Pour améliorer les estimations des caractéristiques de sol, un effort important a porté sur la mise en évidence de corrélations entre des variables topographiques (altitude, pente, exposition, index d'humidité…) et le statut chimique des sols (pH, quantité d'éléments nutritifs, capacité d'échange cationique, saturation en cations basiques : Ca, Mg, K, Na). En plus de ces variables topographiques, la classification en types de sols et des caractéristiques stationnelles issues de l'inventaire national disponible sur

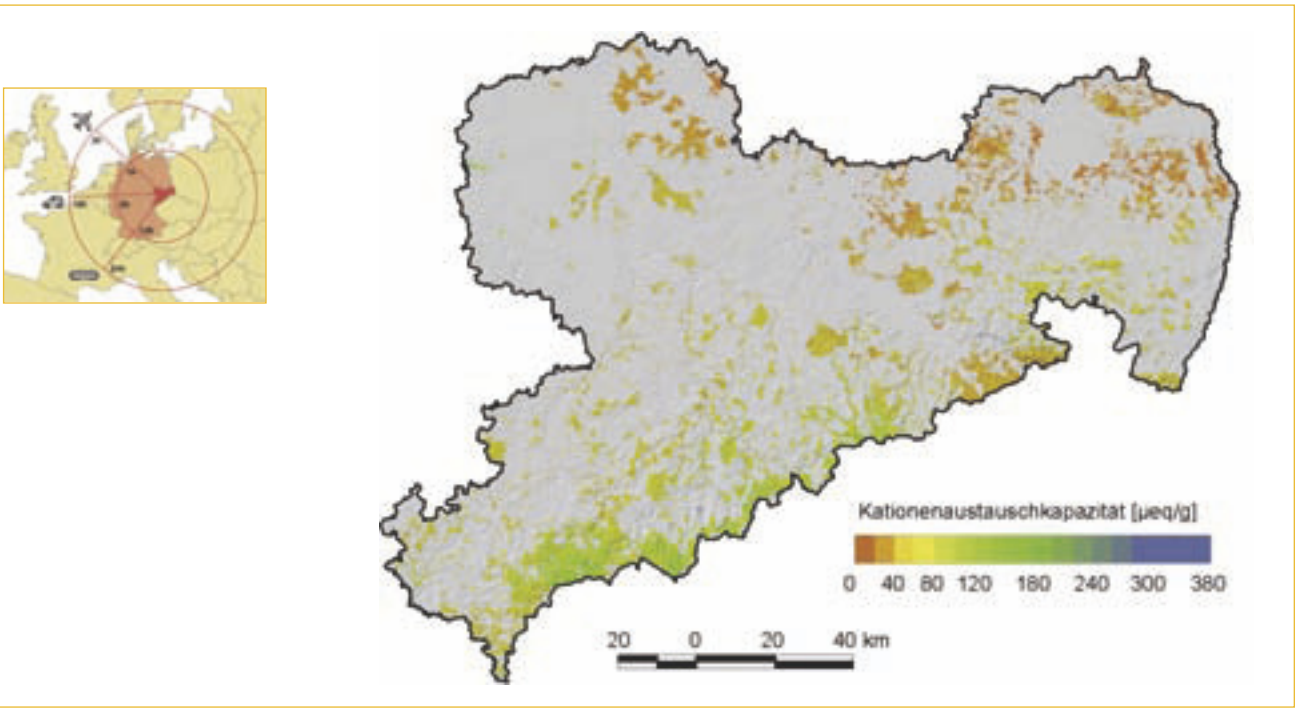


Fig. 1 : capacité d'échange cationique (CEC, µeq/g) dans les sols des forêts du Land de Saxe (Allemagne)

l'ensemble de la surface forestière de Saxe ont pu être utilisées pour améliorer les estimations en tout point des caractéristiques chimiques des sols.

Les résultats ont montré que les données chimiques de sol sont bien corrélées aux variables topographiques testées. La variabilité des données expliquée par les modèles géostatistiques est comprise entre 79 % et 85 % pour la capacité d'échange cationique (CEC ; figure 1), et entre 61 % et 75 % pour le taux de saturation en cations basiques. Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible de régionaliser des données de la surveillance des sols à une échelle appropriée pour les besoins en matière de sylviculture et de gestion forestière.

Les techniques statistiques utilisées pourraient également être appliquées pour caractériser, par exemple, l'influence des essences forestières sur les propriétés des sols, l'effet des chaulages en forêt, etc.

Gerhard RABEN,
Markus WEISE
Staatsbetrieb Sachsenforst
gerhard.raben@smul.sachsen.de

Dietmar ZIRLEWAGEN
INTERRA, Büro für Umweltmonitoring
d.zirlewagen@interra.biz

Exportations d'éléments nutritifs et gestions sylvicoles de la hêtraie : quelles limites pour une gestion durable ?

Des mesures de biomasse et de minéralomasse ont été réalisées dans 5 peuplements de hêtre, âgés d'environ 150 ans. Les sols varient depuis le podzol jusqu'à la rendzine, avec une forte variabilité de la richesse minérale. Les mesures ont permis des estimations des stocks de biomasse, carbone, azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium dans les branches, les troncs et parfois les racines. Les compartiments correspondants aux découpes pratiquées (7 cm et 4 cm) permettent d'évaluer les exportations et les retours au milieu par les rémanents.

Les résultats montrent une forte hétérogénéité de la répartition de la biomasse et des éléments minéraux en fonction des compartiments et du site. Ceci ne permet pas de définir des lois généralisables sur un effectif aussi réduit de mesures pour les nutriments, bien que cela soit possible pour l'estimation de la biomasse en fonction des critères de circonférence à 1,30 m et de hauteur.

Nos résultats concernent uniquement des peuplements au stade des coupes finales. Les travaux sur la chronoséquence (= étude en parallèle de peuplements de hêtre de plusieurs âges dans les mêmes conditions stationnelles) du site atelier de Fougères (35) permettent d'estimer que les valeurs pour les différents éléments, cités plus haut, pour fabriquer 1 kg de biomasse devraient être en réalité doublées. En effet, dans l'étude du peuplement au stade de la coupe finale, les exportations lors des éclaircies, conduites tout au long de la vie du peuplement, ne sont pas prises en compte. Nous sous-estimons donc ici le risque vis-à-vis de la fertilité minérale du peuplement.

Pour les peuplements de faible fertilité (stations en milieu acide), les valeurs relatives d'exportation et de rémanents montrent qu'un passage de la découpe 4 cm à la découpe 7 cm, qui se traduirait par une diminution des exportations, ne rendrait pas la gestion plus durable (et il en irait de même d'un passage à la découpe 12 cm), car les systèmes sont trop dégradés pour pouvoir rétablir « naturellement » un bon fonctionnement du cycle biogéochimique. Sur ces stations acidifiées, un coup de pouce (amendement) est indispensable pour le maintien de l'objectif de production de bois.

Pour les peuplements considérés comme de bonne fertilité minérale, les estimations montrent que la nutrition en azote et en phosphore peut devenir limitante.

Ces données sont une première base pour réfléchir aussi à la question du bois énergie et à l'application d'une sylviculture plus dynamique.

Claude NYS,
Antoine CAROLE,
Serge DIDIER,
Louisette GELHAYE,
Christian HOSSANN,
Arnaud LEGOUT,
Jacqueline MARCHAND
INRA, Centre de Nancy
nys@nancy.inra.fr

Marc LANIER,
Christian MAROCHAIN,
Erwin ULRICH,
François VERNEVAUT
Office national des forêts
prenom.nom@onf.fr

La surveillance de l'état des forêts en Finlande : principaux résultats

La Finlande participe depuis 1985 au « Programme international concerté sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts » (PIC-Forêts) et depuis 1995 au programme de surveillance des forêts financé par l'UE. L'Institut national de la recherche forestière (METLA) est responsable de la surveillance nationale de l'état des forêts et réalise le suivi annuel de l'état des cimes (défoliation, décolorations, dommages biotiques et abiotiques) sur un réseau national comprenant environ 11 000 arbres sur 609 placettes d'échantillonnage permanentes (niveau I). Ce réseau comprend des placettes sur sols minéraux (499) et tourbeux (110). Le réseau intensif de suivi des écosystèmes forestiers (niveau II) a été mis en place en 1995 et comprend actuellement 17 placettes d'observation de pins sylvestres, 12 d'épicéas communs et 2 de bouleaux. Les dépôts, les chutes de litière, les solutions de sol, la météorologie et la phénologie sont suivis de manière continue sur 17 placettes de niveau II. L'état des cimes, l'accroissement, la couverture végétale, la composition chimique des feuilles et les dommages dus à l'ozone sont suivis tous les 1 à 5 ans sur les 31 placettes.

Principales conclusions concernant l'état des forêts en Finlande sur le réseau de niveau I durant ces 20 dernières années :

- malgré une petite augmentation du taux de défoliation au début du programme, il n'y a pas eu de changement notable dans l'état des forêts au cours des 15 dernières années ;
- au cours de ces dernières années, aucun changement majeur dans le taux de défoliation des différentes essences n'a pu être décelé ;
- aucune relation claire n'a pu être établie entre la pollution de l'air et l'état des cimes au niveau national ;
- la santé et l'état des forêts de Finlande sont principalement menacés par les facteurs abiotiques comme les tempêtes, la sécheresse, les conditions extrêmes en hiver ainsi que les facteurs biotiques qui leur sont associés comme les gradations d'insectes et le développement de champignons pathogènes.

Les relations entre les teneurs en éléments nutritifs des feuilles, les niveaux des dépôts atmosphériques et les propriétés du sol ont été étudiées sur les placettes de niveau II :

- du fait de la diminution importante des émissions et des dépôts de soufre, la teneur en soufre des aiguilles a nettement diminué par rapport aux teneurs mesurées vers la fin des années 1980 ;
- il existe des relations claires entre la composition chimique des aiguilles et les concentrations en éléments nutritifs de la couche organique du sol ;
- le fort gradient climatique sud-nord en Finlande semble être la cause principale des gradients correspondants de teneur en azote total et de teneur en soufre total, ainsi que du rapport C/N de la couche organique ;
- cependant, il existe aussi un gradient sud-nord fortement décroissant des dépôts d'azote et de soufre et un gradient croissant du pH moyen des précipitations incidentes.

Les conditions climatiques ainsi que les dépôts de soufre et d'azote devraient être pris en compte dans les études concernant les propriétés chimiques du sol forestier.

Päivi MERILÄ[1], Egbert BEUKER[2], John DEROME[3], Kirsti DEROME[3], Martti LINDGREN[4], Antti-Jussi LINDROOS[4], Seppo NEVALAINEN[5], Pekka NÖJD[4], Antti POUTTU[4], Maija SALEMAA[4], Sirkka SUTINEN[5], Liisa UKONMAANAHO[4]
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA)
[1]Centre de Recherche de Parkano
[2]Centre de Recherche de Punkaharju
[3]Centre de Recherche de Rovaniemi
[4]Centre de Recherche de Vantaa
[5]Centre de Recherche de Joensuu
méls : prenom.nom@metla.fi

Production de litière et apport d'éléments nutritifs au sol dans des peuplements de pin sylvestre et d'épicéa commun en Finlande

La chute de litière constitue généralement un flux important dans le cycle biologique d'un écosystème forestier. Dans cette étude, nous nous efforcerons d'établir la quantité annuelle d'éléments nutritifs retournant dans le sol forestier grâce à la chute de litière, par rapport à la quantité d'éléments nutritifs emmagasinée dans les parties aériennes des peuplements d'arbres. Six placettes de pins et 8 d'épicéas faisant partie du programme PIC Forêts niveau II sont intégrées dans cette étude. La litière a été recueillie à l'aide de collecteurs en forme d'entonnoir (12 par placette) placés à environ 1,5 m du sol et ayant une surface de réception de 0,5 m^2. Les collectes ont été réalisées toutes les 2 à 4 semaines durant la période de

croissance, mais en hiver, cette opération n'a été effectuée qu'une seule fois. La litière a été triée en quatre fractions : les aiguilles de pin, les aiguilles d'épicéa, les feuilles et le reste de la litière.
Cinq arbres échantillons par placette ont été abattus. Sur chaque arbre une rondelle à hauteur de poitrine et des échantillons de branches vivantes et mortes ont été prélevés. L'écorce des rondelles de bois a été séparée en fraction à part. Les échantillons d'aiguilles ont été prélevés sur chaque placette dans le tiers supérieur du houppier de 10 arbres de l'essence principale entre octobre et novembre.

Les éléments totaux de ces échantillons séchés (+ 40 °C) et broyés en laboratoire ont ensuite été déterminés. La biomasse du peuplement a été calculée à l'aide de fonctions de biomasses selon Marklund.
Les tableaux 1 et 2 montrent pour le site de Kivalo en Finlande septentrionale le rapport entre la biomasse de la partie aérienne des peuplements et la quantité de deux éléments pris à titre d'exemple : un élément majeur, le calcium, et un élément trace, le cuivre. Les flux de calcium et de cuivre dans les chutes de litière sont également indiqués. Les quantités retournant annuellement avec la chute de litière par rapport aux réserves de la partie aérienne du peuplement sont modestes particulièrement dans les pessières.

Tiina MAILEENA NIEMINEN[1], Pekka NÖJD[1], Liisa UKONMAANAHO[1], Päivi MERILÄ[2]
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA)
[1]Centre de Recherche de Vantaa, Finlande
[2]Centre de Recherche de Parkano, Finlande
méls : prenom.nom@metla.fi

	Matière sèche	Ca	Cu
aiguilles	13000	72	0,023
branches et rameaux	23200	108	0,090
bois de tronc	46000	37	0,062
écorce de tronc	6300	87	0,017
Stock total	**88500**	**304**	**0,192**
Chute de litière	**1270**	**1,3**	**0,004**

Tab. 1 : biomasse et minéralomasse (kg ha^{-1}) versus apport par la chute de litière (kg ha^{-1} an^{-1}) dans un peuplement d'épicéa de 75 ans (hauteur moyenne 12 m, surface terrière 23 m^2 ha^{-1}) à Kivalo en Finlande septentrionale

	Matière sèche	Ca	Cu
aiguilles	4700	13	0,013
branches et rameaux	11500	25	0,034
bois de tronc	60300	37	0,075
écorce de tronc	7200	34	0,019
Stock total	**83700**	**109**	**0,141**
Chute de litière	**1340**	**6,5**	**0,004**

Tab. 2 : Biomasse et minéralomasse (kg ha^{-1}) versus apport par la chute de litière (kg ha^{-1} an^{-1}) dans un peuplement de pin sylvestre de 60 ans (hauteur moyenne 13 m, surface terrière 25 m^2 ha^{-1}) à Kivalo en Finlande septentrionale

Composition de la litière : quelle part vient des arbres et quelle part du sous-bois ?

Dans un écosystème forestier, l'impact écologique de la litière produite par un peuplement d'arbres et par la végétation de sous-bois est considérable. La chute de litière a des conséquences sur le bilan nutritif des plantes et le cycle des éléments nutritifs. Elle fournit également un substrat physique et une source d'éléments nutritifs aux micro-organismes du sol. Sur un sol forestier, la litière réduit les pertes d'humidité de l'humus et du sol minéral en dessous d'elle et représente un apport considérable d'énergie et d'éléments nutritifs au sol. Un grand nombre d'études a été consacré à la mesure de la quantité et de la composition de la litière produite par un peuplement d'arbres, mais la litière produite par la végétation de sous-bois a, pour des raisons pratiques, été le plus souvent négligée.

Nous avons déterminé la proportion de litière produite par les différentes plantes (arbres et végétation de sous-bois) dans la litière de surface (L) sur des placettes de 30 x 30 m situées sous des peuplements de pins sylvestres et d'épicéas communs. Nous avons ensuite voulu savoir s'il existe des différences dans la composition totale de la litière sous les peuplements de pins et d'épicéas et sous des peuplements situés à différentes latitudes.

Des échantillons (vingt-huit carrés de 30 x 30 cm par placette) ont été prélevés dans la couche organique (L, F, H) sous 3 peuplements de pins et 3 d'épicéas dans le Sud, et sous 3 peuplements de pins et 3 d'épicéas dans le Nord de la Finlande, soit 12 placettes au total. La végétation vivante (parties aérienne et souterraine) a été enlevée et conservée pour une étude future. Le sous-horizon L a été séparé du sous-horizon F et classé en litière d'arbres (aiguilles, feuilles, écorce, branches, bois morts, cônes etc.) et litière de végétation de sous-bois (feuilles et tiges d'arbustes nains morts par espèces, parties mortes jaunes/brunes de mousses et de lichens, plantes herbacées et graminées mortes) et le poids sec des fractions individuelles a été déterminé.

Huit de ces peuplements proviennent de régénération naturelle après coupe à blanc, deux proviennent d'ensemencement artificiel et deux de plantation. Après régénération, la placette a été gérée selon le régime sylvicole en vigueur en Finlande. L'âge moyen d'exploitation des peuplements de pins varie entre 70 et 140 ans et celui des peuplements d'épicéas entre 69 et 90 ans.

Les plantes herbacées et les graminées étaient plus abondantes sur les placettes du Sud que sur celles du Nord de la Finlande. La couverture de mousses était relativement identique dans les peuplements de pins et d'épicéas d'une même région et variait entre 60 et 100 %. La couverture d'arbustes nains variait entre 15 et 40 % à l'exception d'une placette du Sud de la Finlande où elle n'était que de 2 %. La proportion moyenne de la litière de végétation de sous-bois dans le sous-horizon L était supérieure à 50 % sur toutes les placettes avec par échantillon un minimum de 32 % et un maximum de 73 %. La production de litière par la végétation de sous-bois constitue donc une contribution importante au cycle du carbone et des éléments nutritifs dans nos écosystèmes forestiers.

Ceci dit, la quantité de litière présente dans la litière de surface ne correspond pas exactement à la quantité de litière produite par le peuplement d'arbres et la végétation de sous-bois, car les différentes composantes de la litière ont des vitesses de décomposition différentes et l'âge de la litière encore identifiable varie fortement : de quelques mois à plusieurs années. Malgré cela, nous pouvons penser que la litière produite par la végétation de sous-bois (par ex. graminées, herbacées, feuilles d'arbustes décidus nains) se décompose à un rythme plus rapide que celle produite par les arbres (par ex. aiguilles, écorce, cônes, branches). En conséquence, la part de la litière produite par la végétation de sous-bois a été sous-estimée. Sur toutes les 12 placettes, la proportion de la litière produite par la végétation de sous-bois a probablement été plus importante que celle produite par le peuplement d'arbres.

Sari HILLI[1],
John DEROME[1],
Sari STARK[1],
Maija SALEMAA[2],
Päivi MERILÄ[3]
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA) ;
[1]Centre de Recherche de Rovaniemi
[2]Centre de Recherche de Vantaa
[3]Centre de Recherche de Parkano
méls : prenom.nom@metla.fi

Suivi « Biosoil » en Finlande

La Finlande participe depuis 1985 au « Programme international concerté sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts » (PIC Forêts) et depuis 1995 au programme de surveillance des forêts (Forest Focus) financé par l'Union européenne. Le réseau « Biosoil » est une structure constituée de placettes permanentes de surveillance destinée à évaluer la biodiversité et l'impact du réchauffement de la planète sur les écosystèmes forestiers. Il doit également permettre de fournir des résultats harmonisés au sein de toute l'Europe. Chaque pays faisant partie de l'Union européenne est responsable de la réalisation du suivi de ses forêts.

L'Institut National de la Recherche Forestière (METLA) est responsable de la surveillance nationale du réseau « Biosoil » en Finlande. Le suivi a commencé en 2006 avec l'évaluation du stock de carbone et des éléments nutritifs dans les sols forestiers, de la composition floristique, ainsi que la quantité de bois mort afin d'estimer le niveau de la biodiversité. Grâce aux surveillances antérieures, l'évolution des réserves carbonées dans le sol et des éléments nutritifs, ainsi que les changements floristiques au cours des 20 dernières années peuvent être analysés. Les échantillons de sol et les relevés floristiques ont été réalisés sur les mêmes placettes qu'en 1986 et 1995.

Au début de l'année 2006, les équipes de terrain ont été constituées. Huit équipes ont réalisé l'échantillonnage des sols, la description des profils de sol, et les inventaires dendrométriques. Onze autres équipes ont réalisé la description de la flore forestière et l'estimation du couvert de la strate arbustive. Au cours des quatre mois estivaux, les équipes ont mesuré au total 600 placettes sur deux réseaux : l'un systématique à maille carrée 16 km x 16 km dans le Sud de la Finlande, et l'autre de 32 km x 24 km en Laponie. Les observations des 30 placettes restantes vont être réalisées durant l'été 2007. Le traitement et l'analyse des données sont actuellement en cours et seront intégrés dans le rapport de synthèse de l'année 2007.

Hannu ILVESNIEMI, Leila KORPELA, Pekka TAMMINEN, Tiina TONTERI, Tiina M. NIEMINEN
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA)
Centre de Recherche de Vantaa
méls : prenom.nom@metla.fi

Eléments méthodologiques pour suivre les modifications des stocks de carbone dans les sols forestiers

Les changements climatiques actuellement en cours mettent clairement en cause les émissions humaines de CO_2. Cela rend nécessaire une meilleure compréhension du cycle de carbone, et pose en particulier la question de l'estimation fiable des modifications des stocks de carbone dans le sol au cours du temps. Comparées à la variabilité spatiale généralement forte du carbone dans le sol, ces modifications sont de faible amplitude et sont de ce fait difficiles à mettre en évidence. Cela pose le problème d'une technique d'échantillonnage adaptée pour révéler avec la meilleure précision possible ces modifications temporelles des stocks de carbone. Des modèles permettent d'estimer les modifications de stocks de carbone (C) dans le sol. On peut utiliser ces prédictions pour classer les échantillons de sol en un effectif plus ou moins grand de classes homogènes (stratification). Nous avons également développé des méthodes statistiques permettant la comparaison des données anciennes et nouvelles pour l'estimation des modifications de stock de C dans le sol, et nous avons analysé la variation spatiale intrasite des stocks de carbone dans le sol. Nous avons ensuite cherché des réponses aux questions suivantes : Quel est le nombre de classes homogènes d'échantillons de sol nécessaire pour améliorer l'efficacité de l'échantillonnage du sol ? Combien de parcelles doivent être remesurées pour pouvoir détecter des modifications significatives dans les stocks de carbone ? Quels sont la position et le nombre de points d'échantillonnage nécessaires à l'intérieur d'une parcelle pour obtenir une estimation fiable du stock de carbone ?

La constitution de classes homogènes d'échantillons de sol a été réalisée sur une grille de placettes d'inventaire forestier déjà en place, et pour un intervalle d'échantillonnage supposé de 10 ans. Cette technique a amélioré l'efficacité de l'échantillonnage tout en conservant des écarts importants entre les mesures et les estimations du modèle. La stratification avec une répartition optimale des placettes peut réduire l'erreur standard de la moyenne de 20 à 34 % par rapport à un échantillonnage aléatoire simple (EAS), avec différentes hypothèses sur les incertitudes du rythme des récoltes (et des éclaircies). L'usage de la répartition opti-

male (Neyman) est recommandé pour la planification de l'échantillonnage de l'évolution du C dans le sol, car son taux de réussite peut être jusqu'à 10 % meilleur (par rapport à l'EAS) qu'avec une répartition proportionnelle ou égale.

Les analyses de sol antérieures portent le plus souvent sur des échantillons composites. Différents sous-échantillons sont prélevés en différents points du site puis un échantillon composé unique, représentatif du site, est constitué pour l'analyse. Dans l'échantillonnage composite, la référence spatiale des emplacements de prélèvement et l'information sur la variabilité interne au site sont perdues alors qu'elles auraient pu être utilisées pour améliorer le potentiel de détection du changement au cours du temps. Nous avons réalisé un échantillonnage de sol spatialement explicite (40 échantillons de sol analysés individuellement) sur 38 placettes qui avaient été mesurées il y a 16 à 18 ans avec un échantillonnage composite. Des échantillons de la couche humifère ont été collectés dans des peuplements de classes d'âge intermédiaire où l'on peut s'attendre à des teneurs en C très élevées. Les données ont été analysées à l'aide de techniques géostatistiques et nous avons détecté des teneurs en carbone en hausse statistiquement significative dans 7 des 38 placettes. Sur l'ensemble des placettes ré-échantillonnées une augmentation significative de 23 ± 10 g C m^{-2} a^{-1} a été mise en évidence. Avec un intervalle d'échantillonnage de 10 ans, et dans des forêts gérées de classes d'âge intermédiaires, ces changements peuvent être détectés avec moins de 100 placettes échantillonnées.

La variation spatiale intrasite du stock de carbone dans la couche humifère a fait l'objet d'une analyse plus détaillée portant sur 1 107 échantillons de sol recueillis dans 11 peuplements (6 peuplements de pins et 5 d'épicéas communs). Selon le site, l'auto-corrélation spatiale du stock de carbone disparaissait au-delà d'une distance comprise entre 0,7 et 8,2 m. Cela signifie que dans ce type de milieu, des points d'échantillonnage ne sont plus corrélés spatialement à partir d'une distance minimale de l'ordre de 8 m. Plus de 20 sous-échantillons par site devraient être prélevés pour atteindre au niveau de la placette une estimation sûre de la moyenne du stock de carbone de la couche humifère.

Les apports méthodologiques issus de ce projet permettent, d'une part, de caractériser les évolutions statistiques des stocks de carbone dans le sol, et d'autre part, de donner des lignes directrices pour la planification des prélèvements ultérieurs d'échantillons de sol. De plus amples informations sur ce projet sont disponibles sur http://www.metla.fi/hanke/843002/index-en.htm.

Raisa MÄKIPÄÄ, Juha HEIKKINEN, Margareeta HÄKKINEN, Petteri MUUKKONEN, Mikko PELTONIEMI
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA)
Centre de Recherche de Vantaa
méls : prenom.nom@metla.fi

Flux de carbone et d'azote organiques dissous (COD et AOD) dans les dépôts atmosphériques et dans l'eau de percolation des sols forestiers

Les flux de COD et d'AOD dans les dépôts apportés par les précipitations hors forêt (ou dépôts incidents, DI), les précipitations récoltées sous peuplement (pluviolessivats, PL) et l'eau de percolation du sol (EP) jouent un rôle important dans les bilans de carbone et d'azote des écosystèmes forestiers. Il est possible d'utiliser ces flux pour calculer les bilans de carbone et d'azote des écosystèmes forestiers. Ces estimations sont d'actualité et leur importance est fondamentale pour la prédiction des changements de capacité de stockage du carbone et de l'azote des écosystèmes liés au réchauffement de la planète.

Pour cette étude, l'échantillonnage a été fait à l'aide de collecteurs de pluie et de lysimètres sans tension sur 7 placettes de pin sylvestre et 5 placettes d'épicéa commun en Finlande entre 1998 et 2004. Ces placettes font partie d'un réseau intensif de suivi de placettes forestières (niveau II) mis en place dans le cadre des programmes de surveillance de l'état des forêts « Forest Focus » de l'UE et du PIC Forêts de la CEE-ONU. Le flux d'eau est le facteur essentiel déterminant l'ampleur des flux de COD et d'AOD. Les précipitations (DI) sur les pessières et les pineraies ainsi que la quantité d'eau atteignant le sol forestier (PL) étaient relativement similaires pour les deux types de peuplements. Par contre, le flux d'eau à 40 cm de profondeur était plus élevé dans les pinèdes que dans les pessières. Ceci est principalement dû au fait que les pinèdes se trouvent sur des sols sableux relativement grossiers et stratifiés alors que les pessières croissent sur des sols qui ont une proportion plus élevée de matériaux fins.

Les flux moyens de COD et d'AOD étaient plus élevés dans les pluviolessivats sous peuplement (PL) que dans les dépôts incidents (DI). Les flux plus élevés dans les pessières sont probablement dus à un cou-

vert plus dense des épicéas permettant une interaction plus importante avec l'eau de pluie qui traverse ce filtre. Les flux de COD et d'AOD dans l'eau de percolation étaient plus élevés dans les pinèdes. Ceci est principalement dû à des flux d'eau plus importants, mais les différences entre les pins et les épicéas dans la répartition spatiale des racines et dans la capacité de rétention du couvert peuvent aussi avoir une influence sur les différences entre les flux de COD et d'AOD de l'eau de percolation.

Les flux de COD et d'AOD dans les PL augmentent du Nord au Sud aussi bien pour les placettes de pins que pour les placettes d'épicéas, principalement à cause de précipitations plus fortes, de températures et de dépôts d'azote plus élevés dans le Sud. L'interception de l'AOD par le couvert est également corrélée avec la rétention de l'azote inorganique par le couvert forestier. Les flux des deux composés dans l'eau de percolation à 40 cm de profondeur ne sont pas corrélés avec le pH de l'eau de percolation, ni avec le rapport C/N de la litière, les flux d'AOD/COD dans les PL ou la latitude.

Les flux d'AOD dans le PL sont corrélés avec les flux de COD indépendamment de l'essence de la placette, mais aucune corrélation n'a été observée entre les flux d'azote et de carbone organique dissous des précipitations hors et sous forêt. Cela suggère que la régulation des flux d'AOD et de COD dans les dépôts des précipitations hors forêt (DI) et dans l'eau de percolation (EP) dépend de processus différents. Les résultats montrent aussi l'importance des facteurs climatiques ainsi que l'effet de l'essence dans la détermination des flux de COD et d'AOD dans les écosystèmes forestiers. Le rôle de l'AOD est, avec les formes inorganiques de l'azote, important à prendre en compte pour caractériser les flux d'azote dans les écosystèmes forestiers.

Kaisa MUSTAJÄRVI[1], Antti-Jussi LINDROOS[2], John DEROME[3], Päivi MERILÄ[1], Liisa UKONMAANAHO[2]
Institut National de la Recherche Forestière Finlandaise (METLA) ;
[1]Centre de Recherche de Parkano
[2]Centre de Recherche de Vantaa
[3]Centre de Recherche de Rovaniemi
méls : prenom.nom@metla.fi

Impact probable du chevreuil sur les cycles de l'azote et du phosphore en milieu forestier

Il est aujourd'hui largement reconnu que les herbivores peuvent jouer un rôle important dans les cycles biogéochimiques des nutriments essentiels. Dans le parc national de Yellowstone, par exemple, les populations de wapiti et de bison américain excrètent entre 800 et 4 600 g N/m^2.an, ce qui représente jusqu'à 30 % de l'azote minéralisé au sein de cet écosystème. En prairie haute, sujette à une perte annuelle importante d'azote par le feu, une telle remobilisation d'azote de la végétation vers le sol par les herbivores avant incendie peut contribuer à une meilleure conservation du stock d'azote (de l'ordre de 0,1 g N/m^2.an en cas de pâture extensive par les bovins), menant à une production primaire plus importante.

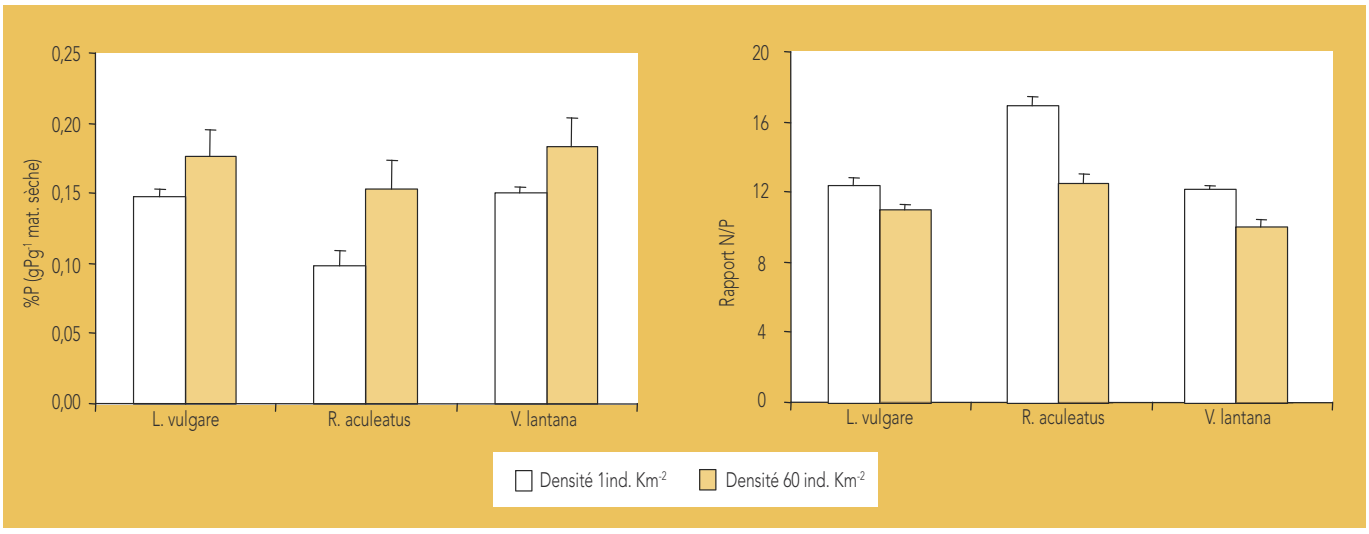


Fig. 1 : teneur foliaire en phosphore (à gauche) et rapport azote/phosphore pour trois espèces du sous-bois, avec densité faible (blanc) ou forte (jaune) de chevreuils

La barre d'erreur indique l'erreur standard. Après transformation logarithmique des données pour homogénéiser les variances, les différences entre densité faible et forte sont significatives pour chaque espèce ($p < 0.05$).

En forêt tempérée, l'impact des ongulés sauvages sur les cycles des nutriments a été peu étudié. Une étude récente (Carline *et al.*, 2005) a néanmoins montré un impact notable du cerf élaphe sur les cycles de l'azote et du phosphore en bétulaie (*Betula pubescens*) : le cerf tend à augmenter la disponibilité en phosphore, ce qui entraîne une limitation de la croissance des jeunes arbres par l'azote, et une diminution du ratio N/P dans les feuilles. Nous avons voulu tester la généralité de ce résultat sur un bois de chêne pubescent (*Quercus pubescens*) abritant deux densités contrastées de chevreuils, une densité de l'ordre de 1 individu/Km^2 et une densité de l'ordre de 60 individus/Km^2 depuis 6 ans. Durant la période de croissance, nous avons mesuré la teneur foliaire en azote et en phosphore de trois espèces du sous-étage (*Ligustrum vulgare, Ruscus aculeatus, Viburnum lantana*) modérément consommées ou pas consommées par le chevreuil. Les mesures chimiques étaient faites sur des échantillons de feuilles broyées et séchées.

Nos résultats indiquent (figure 1 page précédente) qu'en présence d'une densité élevée de chevreuil la teneur en azote et en phosphore des feuilles est accrue, avec une tendance plus marquée pour le phosphore. Nos résultats suggèrent donc un processus comparable avec ce qui est observé en bétulaie, avec une augmentation de la disponibilité en phosphore en présence du chevreuil. Des analyses de sol sont en cours pour étayer ce résultat. Nous discutons de la cohérence de cette « signature » des ongulés sur le cycle des nutriments en forêt en confrontant nos résultats empiriques avec les prédictions d'un modèle mécaniste simple sol-plante-herbivore.

Tanguy DAUFRESNE,
Joël MERLET
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA),
Comportement et Écologie de la Faune Sauvage (CEFS)
tanguy.daufresne@toulouse.inra.fr

Référence

CARLINE KA, JONES HE *et al.*, 2005. Large herbivores affect the stoichiometry of nutrients in a regenerating woodland ecosystem. Oikos n°110, pp. 453-460

Réponse de la strate arbustive basse à la pression du chevreuil : importance du degré d'ouverture du milieu forestier

L'impact des ongulés sauvages sur la diversité végétale forestière a fait l'objet de nombreuses études, mais le plus souvent sans distinguer le rôle de chacune des espèces animales, en n'intégrant qu'une approximation de leur densité et de leur occupation de l'espace, et sans prendre en compte l'hétérogénéité de la forêt. Sur le site expérimental INRA/CEFS de Gardouch (31), nous avons étudié dans un enclos l'influence de la pression du chevreuil (*Capreolus capreolus*) sur l'évolution de la strate arbustive basse (0-1,2 m) d'une chênaie pubescente de 9 ha. Celle-ci est composée de 2 zones caractérisées par une dynamique forestière fortement contrastée : une zone éclaircie et une zone fermée. De 2003 à 2005, cette chênaie a été soumise à la pression d'une très forte densité de chevreuils (équivalent à 50 animaux par km^2) suivis individuellement par système GPS.

À l'issue de cette période, les premiers résultats indiquent que l'évolution des espèces végétales consommées dépend d'une part de la pression liée à la fréquentation des 2 zones par les chevreuils, et d'autre part du degré d'ouverture des milieux. Ainsi, quelle que soit la pression exercée par les animaux, la biomasse végétale diminue systématiquement dans la zone fermée, à cause du manque de lumière qui ne permet pas de compenser l'impact de la forte pression du chevreuil. Par contre, lorsque la pression est relativement moins importante, tout en restant très élevée par rapport aux conditions naturelles, la biomasse augmente au sein de la zone éclaircie, qui bénéficie de plus de lumière et de précipitation.

L'impact du chevreuil est donc lié à une interaction entre la densité d'animaux et la dynamique de la biomasse végétale, elle-même conditionnée par le degré d'ouverture du milieu forestier.

Denis PICOT
INRA/CEFS, Laboratoire de comportement et écologie de la faune sauvage
denis.picot@toulouse.inra.fr

Dynamique de l'azote dans un écosystème forestier

Avant d'être disponible pour les plantes, l'azote contenu dans la litière fraîchement tombée doit subir toute une série de transformations. La formation de la matière organique des sols dans un écosystème forestier est un processus qui passe par la transformation des résidus végétaux (feuilles, branches, racines, bois) en particules organiques de plus ou moins grande taille. Ces particules s'accumulent dans l'humus et dans les horizons minéraux plus profonds des sols. Cette accumulation dépend fortement du type de sol, du climat, du type de végétation et de l'activité de la faune du sol. Leur transformation produit de l'azote minéral dont les plantes ont besoin pour leur croissance. Quel est le devenir de l'azote des litières et quels processus sont mis en jeu dans cette redistribution et ces transformations ? Telles sont les questions posées dans ce projet.

La technique de marquage isotopique permet de répondre à une partie de ces questions. Nous avons déposé une litière de hêtre fortement enrichie en ^{15}N sur le sol de nombreuses hêtraies, dont 9 sites RENECOFOR (Zeller *et al.*, 2000, 2001, Nicolas *et al.*, 2006) représentant la diversité des conditions écologiques françaises. Nous avons ensuite suivi son devenir à court et à moyen terme dans les sols et les plantes. Le facteur âge du peuplement a également été pris en compte par l'approche d'une « chronoséquence » (Caner *et al.*, 2004). Voici les principaux résultats de nos travaux.

- La vitesse de décomposition de la litière diminue avec l'altitude, c'est-à-dire avec la température moyenne, mais varie peu en fonction de l'âge du peuplement. La libération de l'azote constitutif des litières est proportionnelle à la vitesse de décomposition.

- La dynamique de l'azote dans la litière en décomposition diffère en fonction du type d'humus. De l'azote contenu dans les champignons et bactéries, ou provenant de la pluie, rentre dans les litières. Sous mull cette incorporation d'azote externe dans la litière et plus faible et moins durable que sous moder.

- La profondeur d'incorporation de l'azote de la litière dans le sol dépend de l'activité des lombrics (Nicolas *et al.*, 2006). Sans lombrics, l'azote des litières reste dans la partie la plus superficielle de l'humus de type moder ; Inversement, les lombrics incorporent rapidement les particules organiques et l'azote qu'elles contiennent dans le sol minéral. Les feuilles mortes disparaissent rapidement de la surface du sol, formant un humus de type mull.

- La quantité d'azote minéralisé, que la végétation peut prélever, ne dépend pas du type d'humus ou de l'activité des lombrics. Dans les sols à moder, en l'absence de lombrics, l'azote minéralisé provient essentiellement de l'humus. Dans les sols à mull, avec des lombrics, l'azote incorporé profondément est stabilisé par sa liaison à la matière minérale. Il se minéralise moins et par conséquent s'accumule sous la forme d'un stock plus important. Le taux de minéralisation de ce stock est faible mais comme le stock est important, la minéralisation totale est équivalente à celle mesurée dans les sols à moder. Contrairement aux dogmes classiquement admis, la forme d'humus influe peu sur la quantité d'azote minéralisé, mais en change l'origine.

- La capacité de la végétation de sous-bois à prélever préférentiellement l'azote de l'humus ou du sol minéral dépend de la physionomie des plantes. Les espèces de printemps, à croissance rapide, et les espèces dites nitrophiles absorbent préférentiellement l'azote dans l'humus. Les jeunes arbres, et certaines espèces, dites de forêts anciennes, sont moins compétitives.

Les données accumulées forment un jeu unique permettant de calibrer un modèle de circulation de l'azote dans les écosystèmes forestiers. La construction de ce modèle devrait déboucher fin 2007. Un suivi sur le long terme de ces expériences est nécessaire pour mesurer l'incorporation de l'azote dans les arbres du peuplement et son incidence sur la croissance. Des prélèvements spécifiques, en particulier de champignons devraient permettre de mieux caractériser leur écologie.

Bernd ZELLER,
Etienne DAMBRINE,
Séverine BIENAIMÉ,
Manuel NICOLAS
INRA Nancy, UR Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers
zeller@nancy.inra.fr,
dambrine@nancy.inra.fr,
mnicolas@nancy.inra.fr

Bibliographie disponible chez les auteurs

Symptômes d'ozone dans le feuillage des hêtres des sites RENECOFOR

En 2001, 2002, 2004, 2005 et 2006 le GIEFS, le WSL et l'Office national des forêts (ONF) se sont associés pour répertorier et valider les symptômes d'ozone sur 36 des 102 sites du réseau RENECOFOR. Dans le cas du hêtre (*Fagus sylvatica* L.), les symptômes d'ozone visibles à l'œil nu ont été échantillonnés dans 4 sites en forêt fermée, ainsi que dans des clairières bien ensoleillées, adjacentes à 14 sites en forêt.

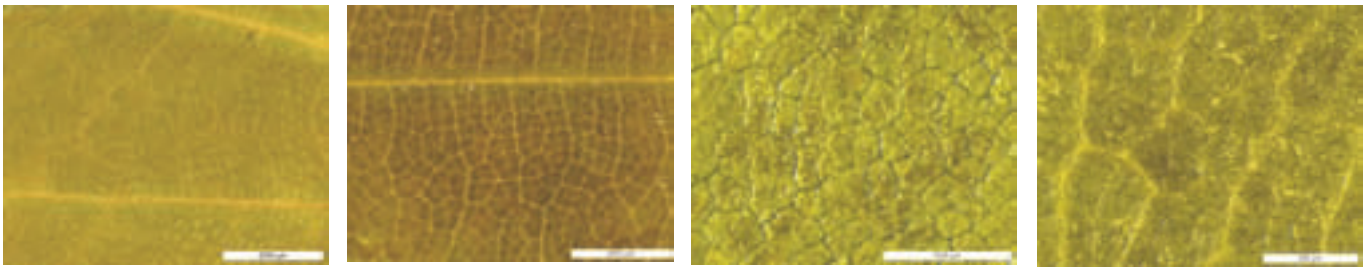
Les symptômes d'ozone font leur apparition entre les nervures de la feuille dans la partie du feuillage directement exposée à la lumière. Ils sont plus marqués dans les feuilles à la base des pousses longues annuelles qui ne sont pas ombrées par la superposition de feuilles adjacentes. L'effet d'ombrage est dû à l'interaction entre l'ozone et la lumière qui entraîne la production de symptômes visibles. Les symptômes d'ozone sont caractérisés morphologiquement par une altération de la couleur normalement bleu-vert du feuillage suite à l'apparition de gradients de décoloration de la chlorophylle (bleaching) ou de bronzage (bronzing) et par l'apparition de petits points brunâtres (stippling) ou carrément de zones nécrotiques à la fin d'une période très riche en ozone. Il est à noter que les nécroses ponctuelles vert clair, détectées lors d'expositions expérimentales de jeunes hêtres en conditions contrôlées, n'ont jamais été observées en forêt. Il suffit de deux semaines de beau temps (les UV-B sont nécessaires à la formation de l'ozone, mais l'humidité suffit à sa neutralisation) pour qu'apparaissent des symptômes sur les feuilles de hêtre. Des symptômes typiques d'ozone ont été observés dans les échantillons prélevés dans le site HET 30 (Gard) en 2005 et 2006, dans la clairière adjacente en 2001, 2004 et 2005 ainsi que dans la placette PS 15 (Cantal) en 2006 (cf. illustration).

Les changements dans la structure des feuilles dus à l'ozone (stress d'ozone) ont été analysés en microscopie photonique à lumière transmise ou réfléchie (fluorescence). Il a ainsi été établi que le phénomène de décoloration (bleaching) est causé par la dégénérescence des chloroplastes (organelles contenant la chlorophylle) suite à la sénescence accélérée des cellules. Cette dernière est aussi caractérisée par une condensation du noyau cellulaire et une augmentation du volume de la vacuole. Le brunissement (bronzing), lui, s'explique par une augmentation de la concentration et de l'oxydation des tannins, particulièrement dans la partie apicale des cellules assimilatrices les plus directement exposées à la lumière. L'intensité de l'ensemble des symptômes microscopiques est d'ailleurs étroitement dépendante de l'ensoleillement respectif des structures altérées. Le pointillé (stippling), enfin, signale la nécrose de petits groupes de cellules isolées au sein de l'assise supérieure du parenchyme palissadique. La nécrose et le collapsus partiel de ces cellules assimilatrices sont causés par un phénomène de défense cellulaire appelé réponse hypersensible (hypersensitive-like response), lequel est défini par une mort cellulaire rapide et une dégradation seulement partielle du contenu cellulaire. Celui-ci est caractérisé par la présence de corpuscules apoptotiques (apoptotic-like bodies), qui sont des agglomérats formés du fait de la fragmentation et condensation de l'ensemble de la cellule et contenant des organites cellulaires.

Les symptômes d'ozone détectés dans les différentes placettes présentaient les mêmes caractéristiques microscopiques sans qu'une influence de la variabilité des conditions climatiques ou édaphiques puisse être établie. Toutes ces modifications sont localisées dans les tissus assimilateurs du limbe de la feuille (mésophylle). Selon l'étendue de ces symptômes, nous pouvons nous attendre à ce que les altérations physiologiques et structurales causées par l'ozone aient une influence sur les performances de l'arbre entier car elles affectent directement le flux des substances organiques produites et exportées vers la tige et les racines de l'arbre.

Madeleine S. Günthardt-GOERG, Pierre VOLLENWEIDER
Institut Fédéral de Recherches WSL
madeleine.goerg@wsl.ch ;
pierre.vollenweider@wsl.ch

Laurence DALSTEIN
Groupe International d'Études des Forêts Sud-européennes (GIEFS)
ldalstein@aol.com



Symptômes dus à l'ozone à la surface des feuilles de hêtre, de gauche à droite, léger et fort brunissement en 2005 et en 2006

Nouveaux outils pour l'évaluation des potentialités spatiales des essences forestières : présence et production

Parmi les nombreuses questions posées par les changements climatiques actuellement en cours, on peut s'attendre à des évolutions d'aires de répartition des essences forestière et des changements de productivité sans que les outils cartographiques actuellement mis en œuvre puissent répondre à ces questions de manière satisfaisante.

Nous proposons une nouvelle méthode de cartographie à l'échelle nationale des potentialités de présence et de production des essences forestières. Elle repose sur l'utilisation de deux bases de données nationales (EcoPlant, IFN), de couvertures spatialisées (climat, modèle numérique de terrain) et du caractère bio indicateur des plantes forestières.

EcoPlant et la base de données de l'IFN contiennent respectivement 7 000 et 100 000 placettes avec des inventaires floristiques et des données écologiques ainsi que, pour l'IFN, des données dendrométriques et, pour EcoPlant, des analyses de sols réalisées en laboratoire.

De ces bases de données sont extraites les informations de présence/absence et la hauteur et l'âge dominants des essences. Hauteur et âge sont utilisés pour calculer l'indice de fertilité, défini comme la hauteur dominante à un âge de référence (par ex, 100 ans pour le hêtre), qui est étroitement corrélé à la production. La présence/absence et l'indice de fertilité sont mis en relation avec des données écologiques mesurées sur les placettes (rôle bio-indicateur de la flore) ou issues de traitements sous SIG de couvertures climatiques pour établir les modèles de distribution ou de productivité.

Les modèles de distribution et de productivité sont ensuite utilisés pour prédire la probabilité de présence et l'indice de fertilité sur l'ensemble des 100 000 placettes de l'IFN. L'interpolation sous SIG des valeurs prédites permet d'obtenir des cartes de distribution ou de productivité potentielles des essences (figure 1). Ces cartes révèlent des disparités régionales voire locales (à l'échelle de gros massifs forestiers) en lien avec les variations des conditions climatiques et édaphiques.

Les modèles réalisés, couplés à des scénarios climatiques, permettront de simuler l'impact des changements climatiques sur la distribution et la productivité future des essences forestières françaises.

Jean-Claude GÉGOUT,
Christian PIEDALLU
AgroParisTech, LERFoB UMR INRA-ENGREF 1092
gegout@engref.fr,
piedallu@engref.fr

Ingrid SEYNAVE
INRA, LERFoB UMR INRA-ENGREF 1092
seynave@engref.fr

Jean-Christophe HERVÉ
Inventaire Forestier National
jean-christophe.herve@ifn.fr

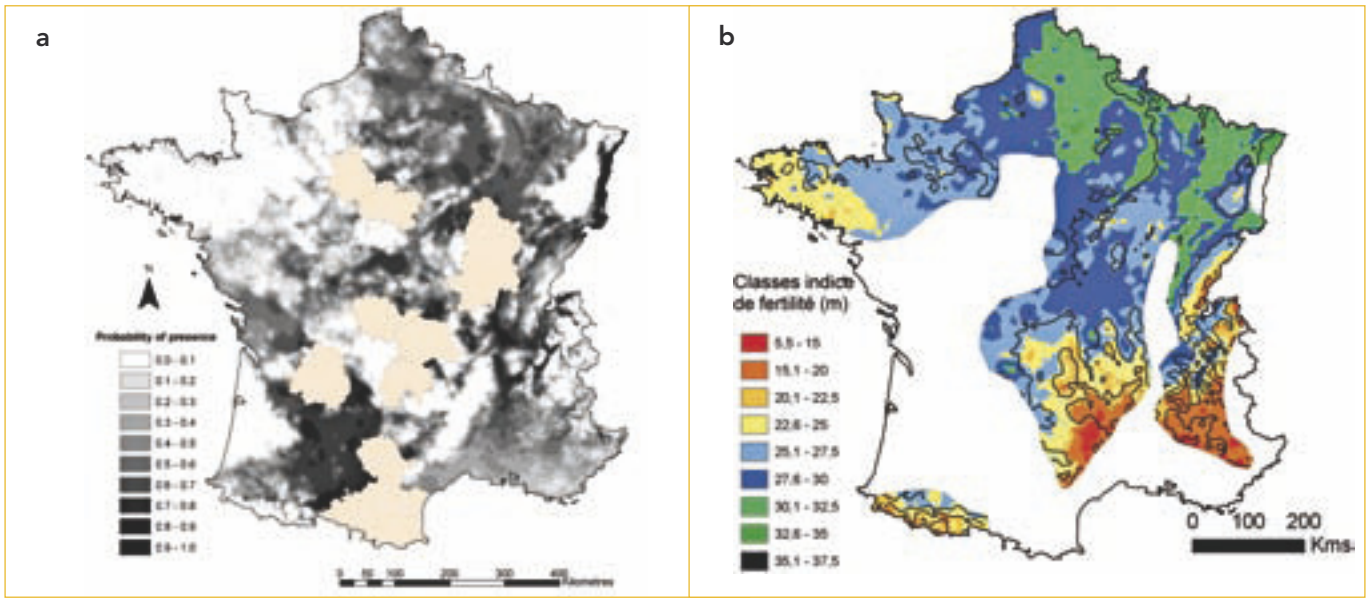


Fig. 1 : cartes de distribution de l'érable champêtre (a) et d'indice de fertilité (hauteur dominante à 100 ans) du hêtre (b)
Zones blanches : pas de données suffisantes.

Forestiers Sans Frontières… pour une terre solidaire

Ils étaient une poignée, au mois de septembre 2003, de forestiers de métier implantés en Corse, témoins des dégâts occasionnés par la sécheresse au Sahel. Dans ce pays dont les 2/3 du territoire subissent plus de neuf mois de période sèche, une rencontre entre ces forestiers et la communauté touarègue a suscité une prise de conscience commune : la perte progressive du patrimoine arboré dans un milieu qui constitue le principal élément de survie de la population.

L'arbre c'est la vie

Suite à de multiples rencontres locales, un projet communautaire de restauration du couvert végétal a été initié autour de l'école d'Echag au nord-est du Mali près de Gao. En 2005, « Forestiers Sans Frontières… pour une terre solidaire » a permis la réalisation d'une clôture contre l'ensablement et d'un mur en banco (brique de terre locale) matérialisant ainsi la future pépinière et la cour d'école. En mars 2007, l'opération « un enfant pour un arbre, une école pour une forêt » a été lancée avec le concours de la FALEP (Fédération des Associations Laïques et de l'Éducation Permanente) et le soutien du conseil général de la Corse du Sud. Une formation du jardinier d'école et le lancement de la pépinière vont permettre la création d'un arboretum « *in situ* » avec des espèces locales menacées d'extinction, sur une surface d'environ 1,5 ha. D'autres actions en parallèle, une tentative réussie de maraîchage au sein de la pépinière, permettront une extension future avec des techniques d'économie de l'eau.
L'université de Corse par l'intermédiaire de l'équipe de recherche « Énergies Renouvelables » de l'UMR CNRS 6134 a engagé deux actions avec « Forestiers Sans Frontières… pour une terre solidaire » qui entrent parfaitement dans les objectifs du projet structurant « Énergies Renouvelables ». Il s'agit d'une part de la mise à disposition d'un condenseur radiatif de rosée portatif tels qu'ils sont étudiés au sein du laboratoire de recherches (protocole OPUR Organisation Pour l'Utilisation de la Rosée). L'objectif est d'étudier la rosée comme ressource alternative en eau potable, dans une zone dénuée de toute eau salubre pour les enfants. D'autre part, il s'agit de la mise en place d'un système photovoltaïque pour l'électrification d'une école. De petits systèmes de pompage pour l'irrigation ont également été installés. Cet éclairage adapté, ainsi que l'économie du temps destiné à la collecte d'eau, ont permis d'augmenter la durée de la journée scolaire et donc d'améliorer l'éducation des enfants. L'Université de Corse a fourni à l'association des panneaux solaires adaptés, et Gilles Notton de l'équipe « Énergies Renouvelables » de l'UMR CNRS 6134 apportera un appui technique à la réalisation de ce projet.

L'avenir

À terme « Forestiers Sans Frontières… pour une terre solidaire » pérennisera ses actions dans la zone subsaharienne par des techniques d'économie et de production d'eau (granulés rétenteurs d'eau, récupération d'eau potable par le système OPUR, alimentation électrique par moyens solaires…).
Cette volonté s'inscrit dans une logique de consolidation partenariale entre « Forestiers Sans Frontières… pour une terre solidaire » et l'université de Corse. Le rapprochement semble vital pour le développement futur de différents projets : observation et recueil de données météorologiques, suivi des techniques

d'amélioration de la réserve en eau du sol… D'ailleurs, un appel à candidature est lancé auprès des étudiants de Corte afin de promouvoir le secteur recherche et ses applications dans les milieux en proie à la désertification.

Bien évidemment, un autre rapprochement semble s'affirmer de lui-même avec ces contrées arides : celui concernant la désertification localisée (mais extensive) de notre île car l'élargissement de ces applications écologiques et fonctionnelles trouvera certainement un large écho auprès de nos éco citoyens et acteurs ruraux.

« a grana di a vita viaghja incu lu ventu u incu u tempu »

« La graine de la vie part avec le vent ou avec le temps » (Citation d'un paysan corse)

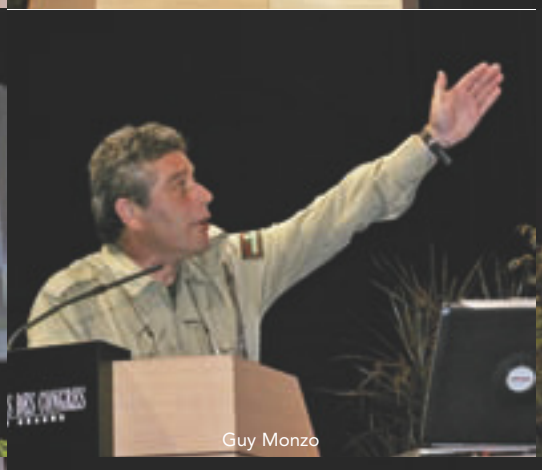
Christophe SALAS
responsable de la placette
RENECOFOR PL 20
avec Forestiers Sans Frontières…
pour une terre solidaire
forestiersansfrontieres@caramail.com

Sébastien Leblond

Sébastien Leblond

François Mouchot

François Mouchot


Guy Monzo

Jean-Luc Fiol

8ème session présidée par Guy Landmann

Myriam Legay

Myriam Legay

Guy Landmann

Guy Landmann

Yves Birot

Pierre-Olivier Drège

Pierre-Olivier Drège

Table ronde présidée par Yves Birot : « Quels enjeux pour les dispositifs d'observation forestière à long terme et quels partenariats ? »

Quelles sont les tendances globales des dépôts atmosphériques humides en France ?

Les évolutions présentées par Patrice Coddeville avaient déjà fait l'objet d'un article d'Erwin Ulrich (et al.) dans le n° 15 des Rendez-vous techniques sous le titre : "Evolution de l'acidité, des concentrations de soufre et de l'azote dans les précipitations analysées dans le réseau RENECOFOR (période 1993 à 2005)". Nous ne faisons ici que reproduire cet article, sous le titre de la présentation faite au colloque, et en corrigeant au passage l'erreur qui s'était glissée dans la figure 4.

Le suivi général de la qualité des précipitations est un des volets importants de la surveillance de la qualité de l'air en France et en Europe. Ce suivi est devenu incontournable avec l'impact important des émissions industrielles, automobiles, domestiques et agricoles. Ces émissions ont augmenté très fortement entre les années 60 et le début des années 80 (voir Croisé *et al*, 2005, Rendez-vous techniques n°7). Depuis, afin d'éviter des effets néfastes à long terme sur la population et les écosystèmes, d'importants efforts ont été accomplis dans les limites des possibilités techniques et financières. Aujourd'hui les émissions de soufre ne sont plus que de 30 à 40 % de leurs valeurs des années 80. Mais ce n'est pas le cas pour toutes les sources, notamment celles qui émettent de l'azote… En France, il n'existe que deux réseaux nationaux analysant en continu depuis 1993 la qualité desprécipitations : le réseau Mera (Mesure des retombées atmosphériques), géré par l'École des Mines de Douai pour l'ADEME* et le sous-réseau Cataenat* du réseau RENECOFOR*, qui s'intègre dans le suivi européen des écosystèmes forestiers. Cataenat a également comme vocation de contribuer de manière précise à l'établissement des charges critiques* en composés acidifiants (acidité directe, sulfates, nitrates, ammonium), eutrophisants (surtout azote) ou contaminants (métaux lourds) sur les forêts. Dans Cataenat, les précipitations* sont analysées depuis fin 1992 dans 27 des 102 sites du réseau RENECOFOR (figure1) aussi bien

Repères*

- ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- Cataenat : Charge acide totale d'origine atmosphérique sur les écosystèmes naturels terrestres
- RENECOFOR : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers
- Charge critique : c'est le seuil de contamination au-delà duquel des effets nocifs peuvent survenir; voir article « Le suivi des dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers en France » par L. Croisé, E. Ulrich, P. Duplat et O. Jacquet, dans Rendez-vous techniques n°7, pages 4-10, 2005.
- Les précipitations comprennent la pluie, la neige, la grêle, la rosée, le givre, les dépôts secs sous forme de gaz ou de particules.
- Dépôt annuel : c'est le produit de la concentration (en milligramme par litre =mg/L) et de la pluviosité (en millimètre, avec 1mm =litreau m^2). Il s'exprime donc en mg/L x mm =mg/m^2 (une concentrationde 1mg/L apporte 1mg de dépôt par m^2 pour 1mm de précipitation) ou, en divisant par 100, en kg/ha.
- Le pH est la valeur négative de l'exposant de la concentration des protons (H^+). Par exemple un pH de 7 est égal à une concentration de protons de 10^{-7}, et un pH de 4 est à 10^{-4}.

hors forêt (clairières) que sous le couvert forestier. Les 13 années d'analyses dont nous disposons à ce jour permettent, entre autres, de faire le point sur le devenir de trois paramètres majeurs :

- l'acidité, qui a longtemps été considérée comme l'élément phare de l'acidification des sols et comme la source du « dépérissement » des forêts en Europe (elle n'est selon nos connaissances actuelles qu'une petite partie des causes des problèmes phytosanitaires),
- le soufre, qui était alors souvent à l'origine de l'essentiel de cette acidité et qui est majoritairement d'origine industrielle et domestique et
- l'azote, dont l'effet eutrophisant s'est révélé être à l'origine de réactions lentes mais profondes des forêts.

Les précipitations contiennent quantité d'autres composés, comme le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, les chlorures, les bicarbonates, les acides organiques… Ces composés ont en règle générale un effet plutôt bénéfique sur les forêts via l'alimentation nutritive. Bien sûr, l'azote et le soufre sont également nécessaires pour l'alimentation nutritive, mais dans un certain nombre de cas, leur apport massif par les précipitations a provoqué une certaine saturation des sols et une dérégulation de la croissance (azote). La saturation des sols provoque alors un drainage accru vers les eaux souterraines, voire de surface, et donc une contamination qui se traduit par une eutrophisation de milieux.

Recueil des données

Les précipitations sont récoltées sur le terrain dans deux collecteurs hors couvert et une série de trois gouttières sous le couvert forestier (voir figure 2E, page 31).

Les résultats présentés ici regroupent les prélèvements réalisés sur 27 sites pendant 13 ans. Chaque année, dans chaque site et par type d'échantillon (hors ou sous couvert forestier) 13 échantillons sont analysés par an. Chaque échantillon regroupe les précipitations de 4 semaines (récolte hebdomadaire, puis mélange dans un échantillon en proportion de la pluviosité hebdomadaire). Le laboratoire d'analyse (SGS-Multilab, Evry) est un des meilleurs laboratoires au niveau européen dans le domaine de l'analyse des précipitations (eaux très diluées) et dispose d'un programme assurance qualité performant et spécialement adapté aux solutions qui lui sont confiées.

Types de résultats présentés

Les mesures de concentrations dans les échantillons de précipitation ne sont pas directement comparables entre sites et entre années du fait des différences de pluviosité. Dans cette étude nous avons donc calculé des indicateurs nationaux, intégrant les quelque 9 000 résultats d'analyse pour chaque composé et type de précipitation (hors ou sous couvert forestier). Ces indicateurs annuels prennent en compte les concentrations des 27 sites et les pondèrent par les valeurs de pluviosité entre les sites. Ainsi chaque concentration moyenne annuelle « nationale » exprimée par litre (= par mm de précipitation) est indépendante des grandes différences pluviométriques qui existent en France métropolitaine. Elle donne une idée des caractéristiques chimiques moyennes des précipitations. En plus des concentrations, nous avons également calculé le dépôt annuel* moyen observé en France, aussi bien hors que sous le couvert forestier. Ce dernier joue un rôle non négligeable sur les dépôts

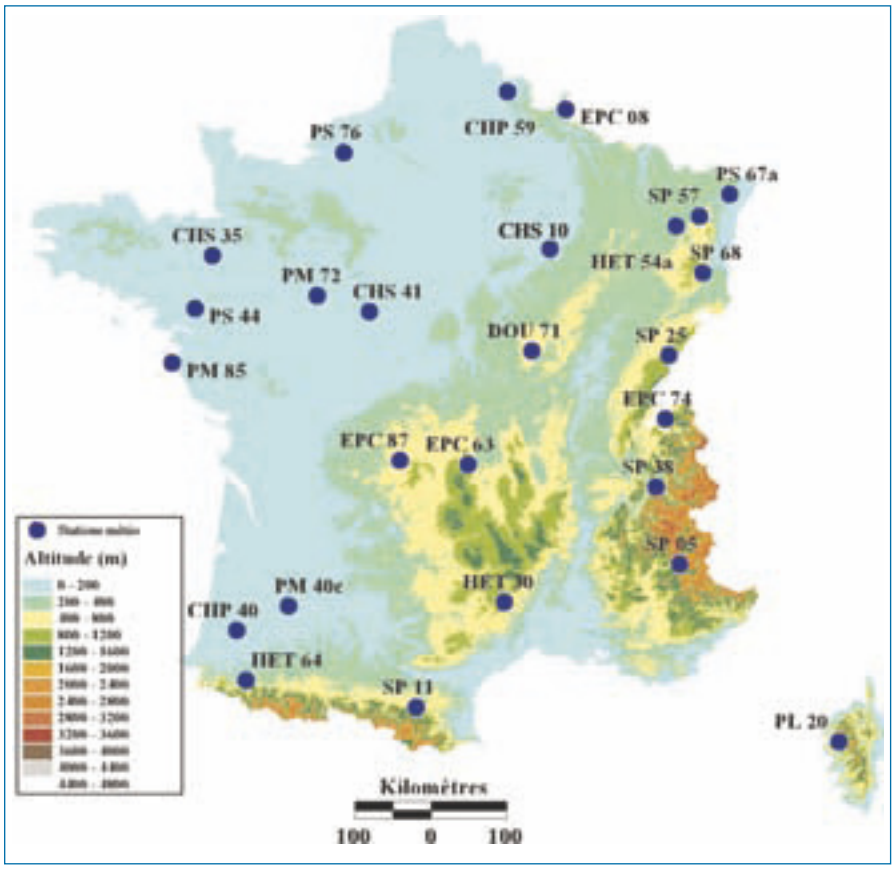


Fig. 1 : localisation des 27 sites de mesure des dépôts atmosphériques humides (sous-réseau Cataenat) faisant partie des 102 placettes permanentes d'observation du réseau Renécofor.

annuels, car la surface réceptrice du feuillage et des branches est en moyenne 4 à 8 fois plus importante que la surface du sol. Les arbres sont donc de très bons filtres de tous types d'aérosols ou de gaz. On observe ainsi très souvent une augmentation significative des dépôts de plusieurs composés sous forêt, comparé au plein champ.

Diminution de l'acidité directe

L'acidité directe est mesurée par la concentration des protons (H^+). Celle-ci est exprimée par le pH*. L'« acidité indirecte » (non présentée ici) prendrait en compte en plus le pouvoir d'acidification d'un composé. Par exemple, le sulfate (acide sulfurique, H_2SO_4) et l'azote (l'acide nitrique, HNO_3 et l'ammonium, NH_4) font partie des composés contribuant à l'acidification, car lorsqu'ils sont soit neutralisés, soit oxydés, soit réduits dans les sols, ces composés libèrent des protons.

Dans le réseau Cataenat, l'amplitude de pH est comprise entre 3 et 8 (figure 2a), mais 99 % des pH hors couvert et 98 % sous couvert forestier se situent entre 4,5 et 7. Les précipitations récoltées sous le couvert forestier sont moins acides car elles profitent de l'effet neutralisant des poussières à contenu souvent basique (éléments terrigènes, comme le calcium et le magnésium). Le pH naturel, c'est-à-dire en prenant en compte l'équilibre de l'eau pure avec le CO_2 dans l'air (qui se dissout pour former dans l'eau l'acide carbonique, H_2CO_3) serait de 5,6. Un pH au-dessus de ce seuil, est le résultat d'un déplacement de l'équilibre dans l'eau en faveur des éléments basiques (par exemple magnésium, calcium, potassium, ammonium) qui témoignent entre autres d'apports sous forme de poussières ou d'eau de mer, près des côtes. Un pH en dessous de ce seuil résulte d'apports plus important d'acides par exemple sulfuriques, nitriques ou organiques.
Dans la Figure 2b, seule la fréquence annuelle des pH plus acides que 5,5 et 4,5 a été présentée. Pour l'ensemble des précipitations à pH < 5,5, nous constatons deux périodes : la première entre 1993 et 1996, avec une fréquence annuelle de 56 à 74 % et la deuxième entre 1997 et 2005, où la fréquence reste toujours au-dessous de 60 %. Si l'on s'intéresse aux précipitations les plus acides (pH < 4,5, Figure 2b), une diminution relativement importante de leur fréquence est observée. Entre 1993 et 2005, la fréquence annuelle est tombée en plein champ de 5,5 % en 1993 à 1,1 % en 2005 et sous le couvert forestier de 15,2 % à 2,7 % respectivement.

L'évolution du pH moyen du réseau (figure 3) montre une augmentation depuis 1993, de 5,99 à 6,10 en plein champ, c'est-à-dire de +23 % en 13 ans. Sous le couvert forestier, cette évolution est encore plus marquée, car elle va de 5,77 à 6,13, c'est-à-dire de +56 %. Une partie de l'évolution des précipitations récoltées sous le couvert forestier est liée à l'évolution des peuplements d'un point de vue sylvicole : pratiquement tous ont été éclaircis au moins une fois, souvent deux. Le nombre de trouées a augmenté et ils ont perdu en densité de tiges et en surface réceptrice (feuillage), diminuant ainsi les possibilités de dépôts d'aérosols ou de gaz divers sur leur feuillage. Dans certains cas, les tempêtes de fin 1999 ont créé des trouées importantes. Ainsi les précipitations récoltées sous le couvert forestier se rapprochent de plus en plus de celles récoltées en plein champ. Cette observation est également vraie pour les composés qui suivent.

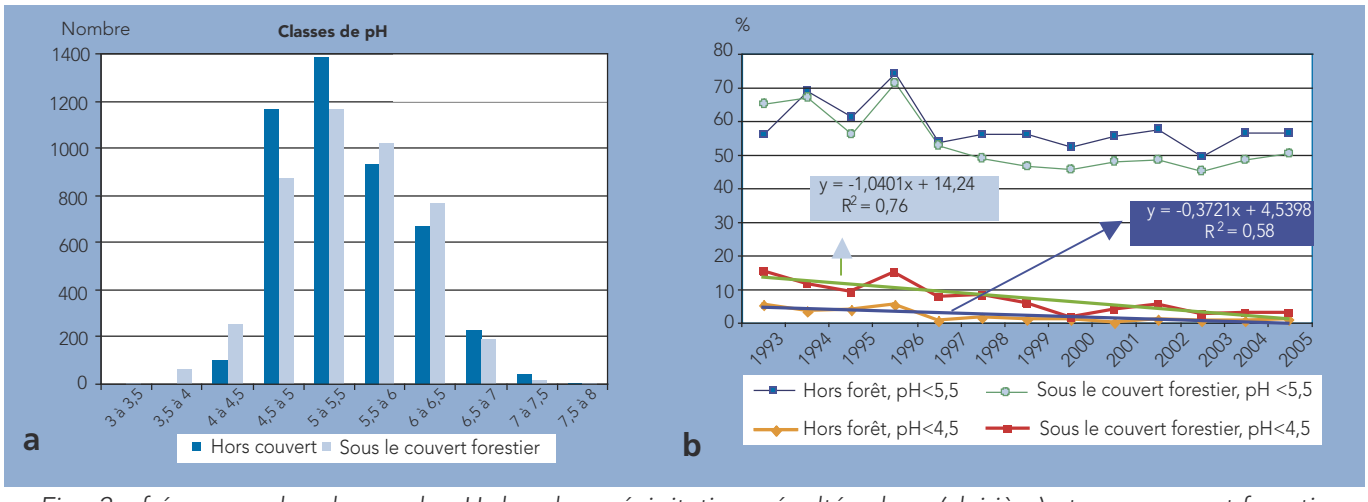


Fig. 2 : fréquence des classes de pH dans les précipitations récoltées hors (clairière) et sous couvert forestier pour la période 1993 à 2005 (a) et évolution annuelle du pourcentage d'échantillons ayant un pH < 5,5 et < 4,5 pour la même période (b)

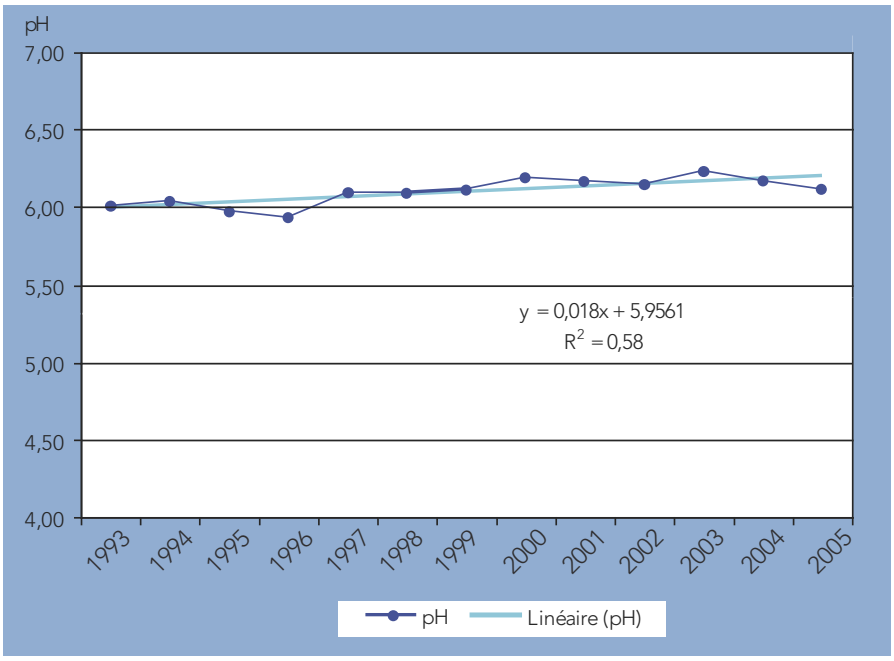


Fig. 3 : évolution de 1993 à 2005 du pH moyen « national » dans les précipitations en plein champ, pondéré par la pluviosité, des 27 sites Cataenat

Forte diminution des concentrations et dépôts de soufre

L'origine du soufre est double : surtout anthropique (raffinerie, etc.) mais également naturelle (essentiellement marine ou venant des volcans).

Au début des mesures, les concentrations moyennes du soufre sous forme de sulfate (S-SO_4) étaient respectivement de 0,71 et 1,77 mg/L en moyenne annuelle hors et sous couvert forestier (figure 4a et b). En fin de période, elles ont diminué hors couvert de 35 à 40 % et sous forêt de 45 à 53 %. Les dépôts annuels moyens des 27 sites diminuent encore plus fortement. Mais ici la pluviosité annuelle intervient et influence les valeurs, car en fin de période (2003 à 2005), la pluviosité a été bien en dessous de la moyenne des 10 premières années (figure 5). Ainsi hors couvert forestier les apports annuels passent de 8,0 kg de soufre par hectare et par an à 4,3 kg/ha/an (Figure 4c), ce qui représente une diminution de 47 %. Sous le couvert forestier, où évolution sylvicole et diminution de la pluviosité se conjuguent, la baisse est de 56 % en 13 ans (de 13,5 à 5,8 kg). Il est très probable que de futures années plus pluvieuses rééquilibreront ces valeurs un peu vers le haut, sans remettre en question le phénomène de la baisse généralisée, lié aux efforts importants de diminution des émissions. Ces observations sont encourageantes, car elles permettent d'envisager une amélioration de la fertilité des sols, si la diminution des dépôts de soufre se maintient ou si au moins les valeurs se stabilisent au niveau actuel. Elles représentent également un exemple remarquable des effets positifs des mesures de réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère.

Stabilité des concentrations et dépôts de nitrate

Le nitrate provient avant tous des émissions automobiles, des procédés industriels (oxydation de l'azote de l'air) et des fertilisations agricoles sous forme de nitrate.

Comme le montrent les figures 4a et 4b, les concentrations moyennes annuelles d'azote sous forme de nitrate ne varient guère pendant 13 ans. Cependant elles augmentent faiblement mais régulièrement depuis 1999. Les concentrations en fin de période sont légèrement plus élevées et arrivent donc à contrebalancer la diminution de pluviosité dans le calcul des dépôts moyens annuels. Le résultat est une relative stabilité des dépôts hors couvert (entre 3 et 4 kg/ha/an) et sous le couvert forestier (entre 4 et 6 kg/ha/an). Les apports d'azote sous forme de nitrate sont moyennement élevés. Mais ces chiffres moyens du réseau cachent de grandes disparités entre sites et entre années. Par exemple, les dépôts varient selon le site et l'année entre 1 et 10 kg d'azote nitrique/ha/an hors couvert et entre 0,3 et 16 kg sous forêt.

Évolution contrastée de l'azote ammoniacal

L'azote ammoniacal (ammonium) dans les précipitations est la forme réduite du gaz ammoniac. Ce gaz, soluble dans l'eau, est émis majoritairement par l'activité agricole : élevage intensif (excréments) et fertilisation azotée. Il existe également des sources naturelles, moins importantes en proportion (déchets d'animaux, de poissons et mécanismes microbiens dans le sol ou l'eau).

Les concentrations moyennes annuelles se situent entre 0,34 et 0,57 mg/L en plein champ et entre 0,45 et 0,83 mg/L sous le couvert forestier. L'ammonium montre pour l'instant une tendance à la baisse de ses concentrations (figures 4a et 4b), mais cette tendance n'est pas très nette. Sous forêt cela semble être l'inverse. Un autre phénomène est à prendre en considération : selon l'espèce forestière et sa densité, une part variable de l'ammonium est absorbée par le feuillage lors du passage à travers le houp-

pier. Les concentrations mesurées sous le couvert sont donc la différence entre l'apport extérieur et l'absorption. Très souvent il est admis que, lorsque les apports sont importants, la part absorbée peut atteindre la moitié, voire plus, de l'apport total.

Les dépôts annuels moyens varient entre 3,5 et 6,4 kg/ha/an en plein champ (figure 4c). Pour ceux mesurés sous le couvert forestier (figure 4d), qui varient entre 4 et 6 kg/ha/an, il manque la part absorbée par le feuillage. Ces dépôts sont donc à considérer comme des valeurs minimales. Pour les sites individuels les valeurs varient entre 0,1 et 17 kg/ha/an.

Le cumul des apports azotés est important et a des effets sur les forêts

Les valeurs en tant que telles ne disent rien sur l'effet eutrophisant que l'azote peut avoir. Mais si l'on considère que les écosystèmes forestiers reçoivent en moyenne au minimum 10 kg d'azote par hectare et par an (nitrate + ammonium) et en consomment par l'immobilisation dans les arbres et les autres plantes environ 5 kg/ha/an (il s'agit ici surtout de peuplements âgés, les jeunes peuplements pouvant immobiliser en moyenne selon l'essence et la station entre 5 et 15 kg d'azote/ha/an jusqu'à 40 ans environ), les 5 kg restant sont en excès. En 20 ans, les peuplements auront ainsi cumulé 100 kg/ha d'azote. Cette quantité est très importante, car elle correspond à une vraie fertilisation azotée continue, non sans conséquence sur la composition floristique et le rythme de croissance des arbres. De nombreux projets scientifiques se préoccupent à ce jour des conséquences que l'azote a ou aura sur la faune, la flore et l'eau via l'accumulation dans les écosystèmes.

Contrairement au cas du soufre qui s'est amélioré ces dernières années, l'absence de tendance claire de ces dépôts au cours du temps montre que la question de

Fig. 4 : évolution de 1993 à 2005 des concentrations moyennes nationales (pondérées par la pluviosité) (a et b) et des dépôts annuels moyens (c et d) des 27 sites hors et sous couvert forestier pour le soufre (sous forme de sulfate S-SO_4), l'azote sous forme de nitrate (N-NO_3) et l'azote sous forme d'ammonium (N-NH_4)

l'azote dans les écosystèmes reste un sujet d'actualité qu'il importe de suivre de manière détaillée.

Conclusions

Les mesures de la qualité des précipitations réalisées au sein du réseau RENECOFOR et les dépôts annuels qu'elles permettent de calculer sont à ce jour uniques en zone forestière en France, aussi bien pour la durée de la série de mesure, l'uniformité du protocole de prélèvement que l'excellente qualité analytique.

Ces mesures permettent chaque année de suivre les tendances pluriannuelles au niveau national ou site par site, afin de renseigner le public averti dans le cadre des charges critiques en éléments polluants et dans le cadre des négociations internationales sur la réduction des émissions et sur l'évolution de leur impact sur les écosystèmes forestiers.

Bien que des baisses conséquentes de l'acidité directe et du soufre aient été constatées en 13 ans, cela ne signifie pas que ces tendances ne peuvent plus s'inverser. L'Europe s'est engagée via des conventions internationales à réduire de manière conséquente ses émissions, mais certains pays émergents, en particulier la Chine, sont en train d'augmenter de manière exponentielle leurs émissions. Dans les années 60 à 80, beaucoup d'études scientifiques ont prouvé une contribution des émissions soufrées (et ainsi de l'acidité directe) des États-Unis aux dépôts atmosphériques mesurés en Europe. Ces études se basent sur l'analyse de l'origine des masses d'air conduisant à des précipitations. La Chine se trouvant également dans l'hémisphère Nord, une telle contribution semble réaliste, d'autant plus que les émissions à venir seront bien plus importantes que ce que nous avons connu de la part des États-Unis (facteur d'environ 4 de la population entre les deux pays).

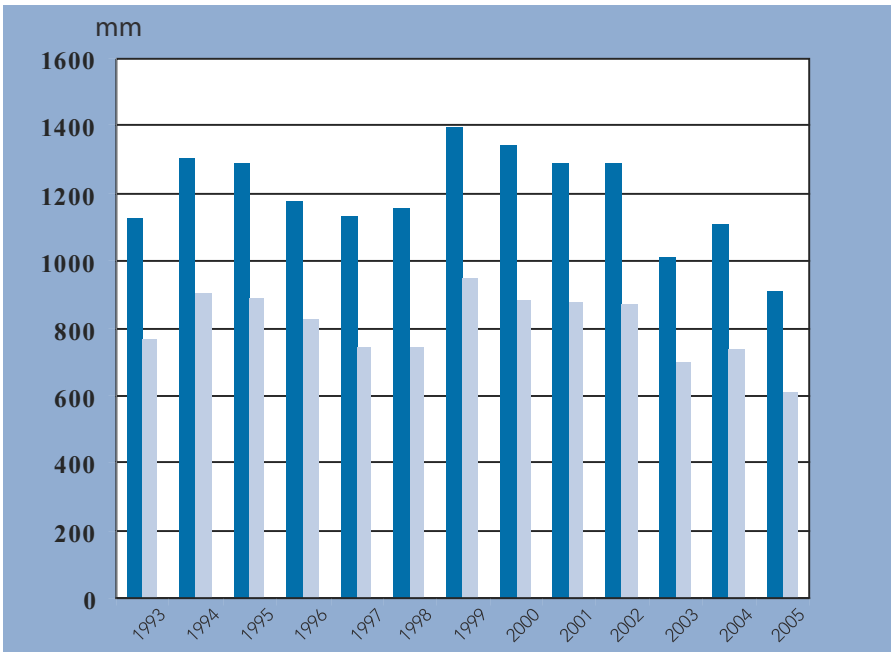


Fig. 5 : pluviosité moyenne annuelle des 27 sites en plein champ (bleu foncé) et sous le couvert forestier (bleu clair) en mm

Le fait que la baisse des concentrations et dépôts de soufre commence à ralentir ne signifie pas obligatoirement que d'autres baisses ne soient pas nécessaires ou possibles, d'une part, et que nous avons retrouvé le niveau d'avant l'ère industrielle du début du 19e siècle, d'autre part.

Les résultats sur l'azote ne sont pas pour l'instant encourageants et nous imposent une grande vigilance quant au devenir de l'azote en forêt et dans les eaux qu'elles drainent.

Enfin, pour que ces mesures aient un vrai sens et que leurs résultats restent un outil de décision il faudra savoir les faire durer.

Remerciements

Le réseau RENECOFOR bénéficie de financements de l'ONF, de l'Union Européenne (DG Agriculture puis DG Environnement), du ministère de l'Agriculture et de la Pêche (DGFAR) et de l'ADEME.
L'ensemble des données présenté est le fruit d'un travail laborieux accompli par les forestiers responsable des 27 sites depuis 13 ans : qu'ils soient tous remerciés ici pour leur ténacité !

Patrice CODDEVILLE
École des mines de Douai
coddeville@ensm-douai.fr

Erwin ULRICH
Marc LANIER
Luc CROISE
ONF, direction technique
Département recherche
Réseau RENECOFOR
erwin.ulrich@onf.fr

Évolution de l'acidité et dynamique des éléments nutritifs en forêt, premiers bilans

L'équilibre nutritif des écosystèmes forestiers sur sol pauvre est menacé par les dépôts atmosphériques acidifiants, notamment de soufre et d'azote. Ces dépôts peuvent entraîner un drainage de cations nutritifs (calcium et magnésium principalement) et donc un appauvrissement du sol. En forêt, le risque est de voir apparaître des carences et des dépérissements comme cela s'est déjà produit par exemple dans les Vosges. En aval, l'acidification peut aussi se répercuter sur la qualité des eaux par une hausse jusqu'à des niveaux toxiques des teneurs en aluminium et en métaux lourds.

En France, depuis les années 1980, les émissions atmosphériques de soufre ont fortement chuté tandis que celles d'azote ont diminué plus légèrement et demeurent élevées. Ces évolutions se retrouvent globalement dans les dépôts atmosphériques mesurés depuis 1993 sur le réseau RENECOFOR (voir Coddeville *et al.* ce volume).

Mais quel effet ces évolutions des dépôts atmosphériques ont-elles sur les processus d'acidification ? Le réseau RENECOFOR nous livre des informations précieuses grâce au suivi des solutions prélevées dans les sols de 17 de ses sites.

Évolution du soufre et de l'azote dans les solutions de sol

Comme pour les dépôts, le soufre diminue globalement dans les solutions de sol (figure 1a). À 20 cm

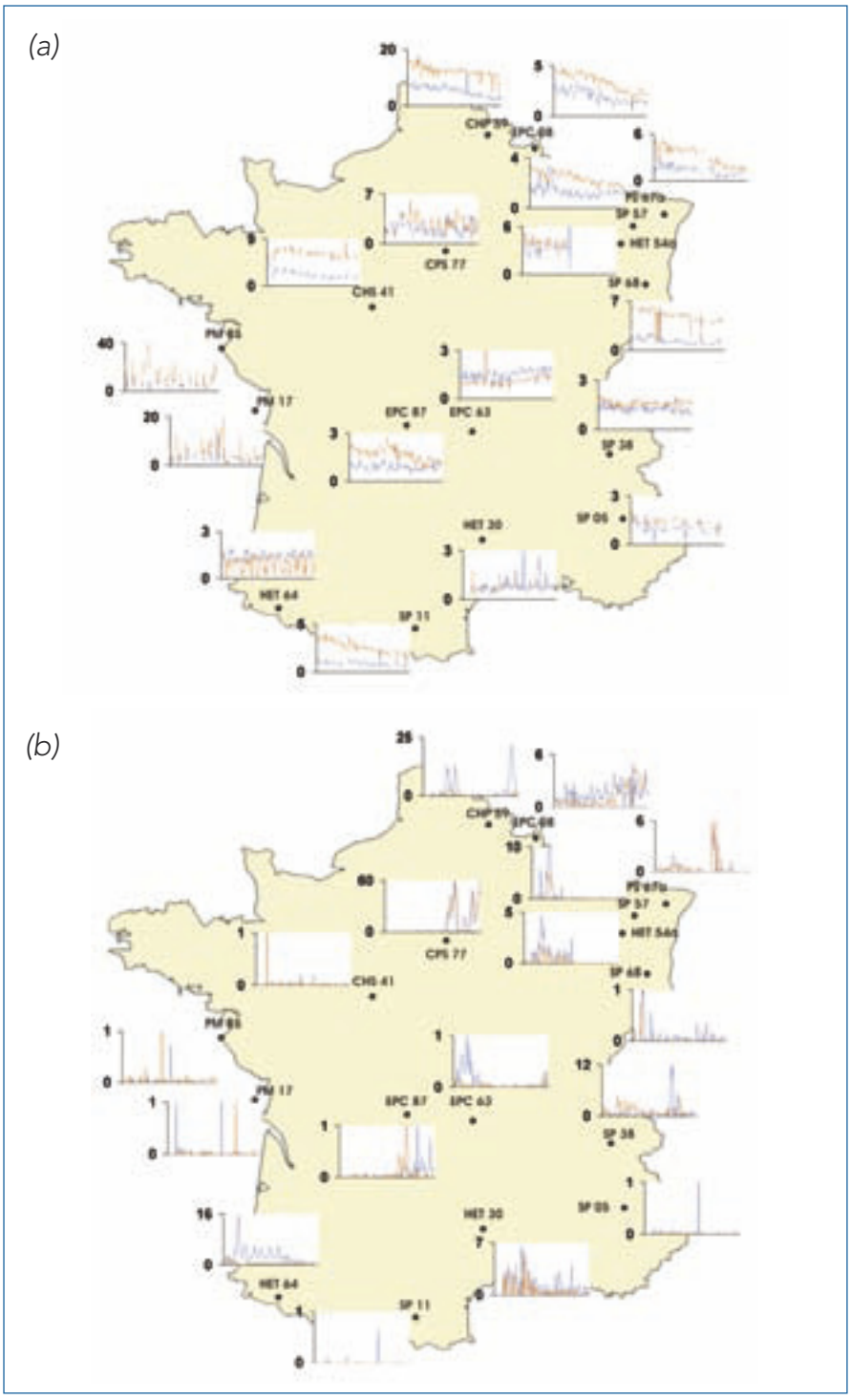


Fig. 1 : concentrations de soufre sous forme de sulfate (a) et concentrations en nitrates (b) des solutions de sol des 17 sites RENECOFOR (en mg/L de soufre et d'azote) de 1994 à 2006 ; en bleu à 20 cm et en orange à 70 cm de profondeur

et à 70 cm de profondeur, on note une diminution avec le temps des teneurs en sulfates sur environ la moitié des sites, notamment à l'Est et au Nord de la France, où les retombées atmosphériques de soufre ont pu être importantes par le passé. Ailleurs, on n'observe pas de tendances, certains sites n'ayant sans doute jamais subi un apport important et d'autres subissant principalement des dépôts d'origine marine.

L'azote a été mesuré sous forme d'ions ammonium et nitrate. Les teneurs en ammonium sont négligeables dans les solutions de sol. Les concentrations en nitrates (figure 1b) ne décrivent pas de tendances à moyen terme sauf sur le site EPC 08 (Ardennes) où elles augmentent. Elles évoluent généralement par pics brusques correspondant soit à des variations saisonnières, soit à des événements ponctuels parfois explicables (éclaircies, tempêtes, défoliations).

Impacts sur la fertilité des sols

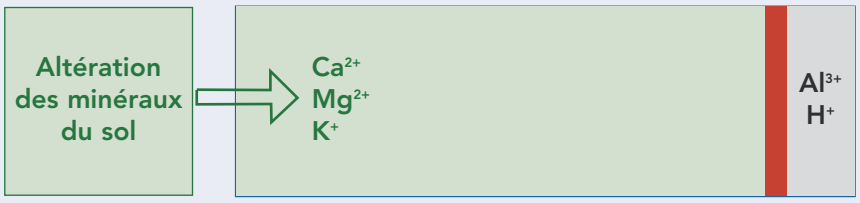
La baisse des concentrations en sulfates observée sur de nombreux sites correspond à une baisse des charges acidifiantes dans les solutions de sol. Cependant l'acidification peut se poursuivre si ces charges demeurent trop importantes : tout dépend de la capacité du sol à les neutraliser (voir encadré « les sols acides sont les plus sensibles à l'acidification »).

Nous avons choisi 3 sites pour illustrer différentes conséquences de l'évolution des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote sur l'équilibre chimique des sols. Ces 3 sites - CHP 59, EPC 08 et SP 57 présentés sous forme de 3 encadrés en pleine page - ont subi des dépôts de soufre importants par le passé.

Les sols acides sont les plus sensibles à l'acidification

Schématiquement, le sol contient des éléments absorbables par les arbres sous forme d'ions, avec des cations nutritifs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ principalement) et des cations acides (H^+ et Al^{3+}). Plus la proportion de cations nutritifs est importante, plus le sol est « saturé », c'est-à-dire riche, et moins il est acide. Cette richesse dépend principalement de l'altération des minéraux. De manière générale, les sols sur calcaire sont ainsi complètement saturés en calcium tandis que les sols sur grès ou sur sable sont pauvres et acides.

Sol riche : les ressources en cations nutritifs sont importantes et saturent complètement ou presque les réserves échangeables.



Sol acide : l'altération des minéraux apporte peu de cations nutritifs et le taux de saturation en « bases » (cations nutritifs) est faible.

Des dépôts atmosphériques de soufre et d'azote importants peuvent entraîner un drainage de sulfates (SO_4^{2-}) et de nitrates (NO_3^-). Dans l'eau, les charges négatives devant être équilibrées par des charges positives, ces anions drainés entraînent alors avec eux des cations nutritifs du sol. Et si ces pertes d'éléments nutritifs ne sont pas compensées par les apports dus à l'altération des minéraux, on assiste alors à une acidification du sol. Car les cations acides prennent une place de plus en plus importante parmi les réserves échangeables du sol, au détriment des cations nutritifs.

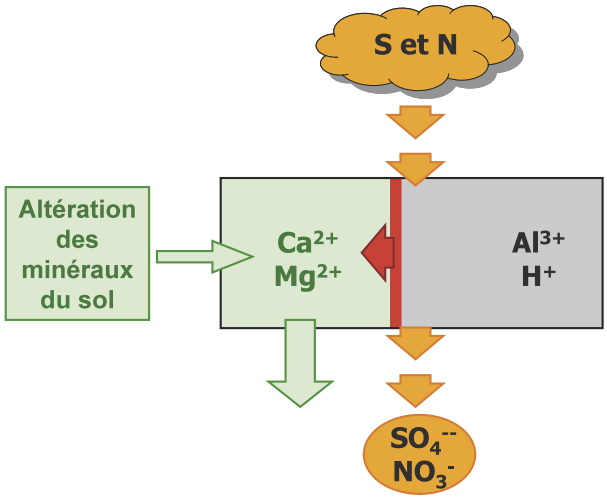
Ce sont donc les sols acides, ceux qui ont le moins de ressources en cations nutritifs, qui sont les plus sensibles à l'acidification.

E. Ulrich, ONF

Zoom sur le site de la forêt de Mormal (CHP 59, Nord)

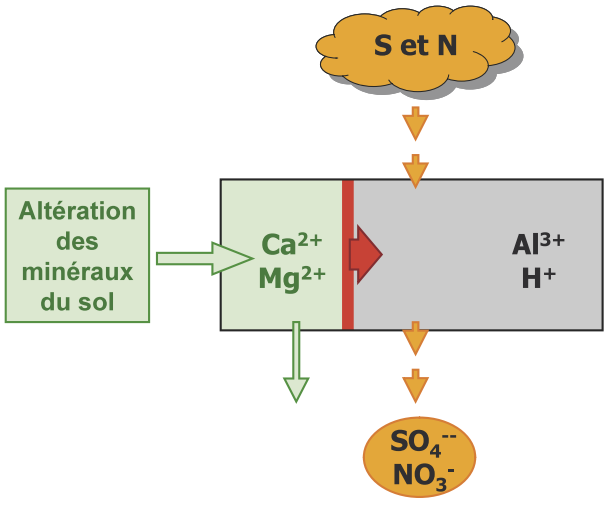
Il s'agit d'une placette de chêne pédonculé d'environ 85 ans, à 149 m d'altitude. Le sol, développé sur des limons, n'est ni pauvre ni très riche : son taux de saturation est de 26 % entre la surface et 20 cm de profondeur.

Évolution probable avant 1994

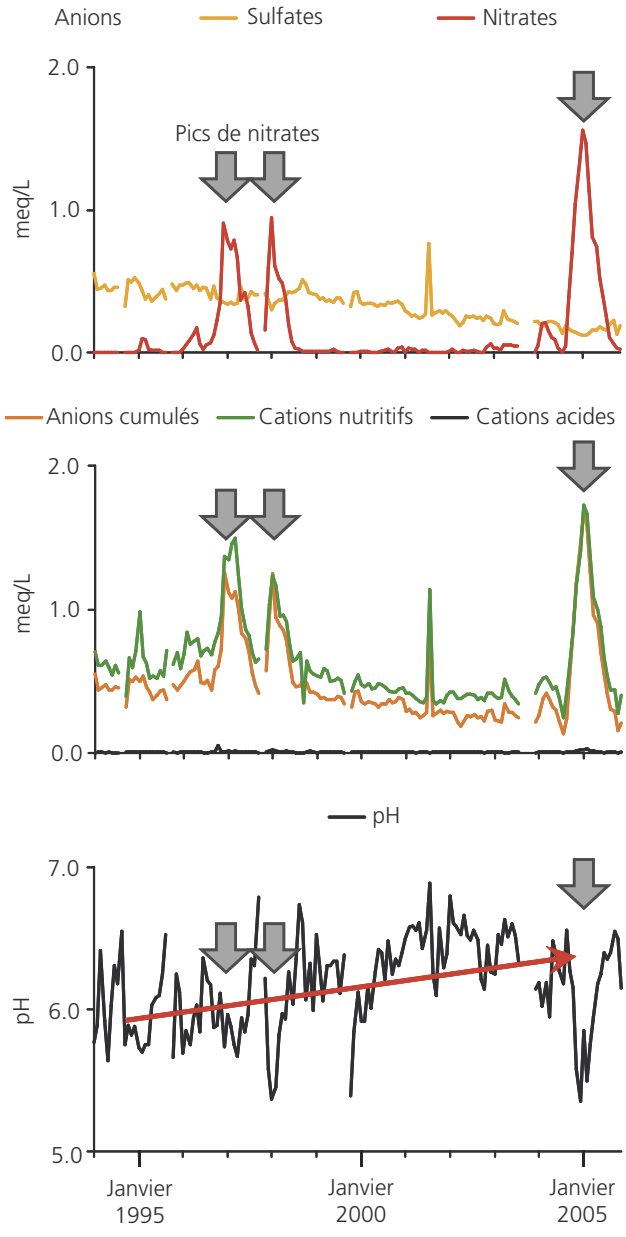


Ce sol a dû subir une acidification par le passé sous l'effet d'importants dépôts atmosphériques de soufre.

Évolution récente (1994-2005)



Depuis, les dépôts atmosphériques ont nettement diminué et on constate une re-saturation progressive à travers les solutions de sol analysées depuis 1994.



Analyse des solutions de sol à 20 cm de profondeur entre 1994 et 2006 (deux graphiques du haut : concentrations en milliéquivalent par litre= meq/L) :

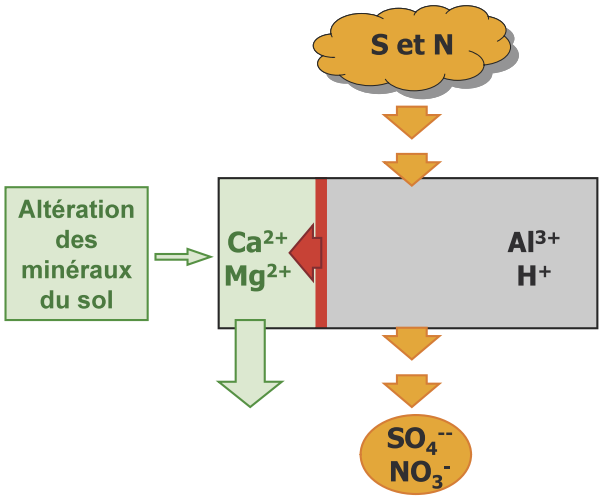
On observe une nette diminution des concentrations de sulfates. Les nitrates, quant à eux, sont généralement absents des solutions de sol sauf lors de 3 pics importants en 1997, 1998 et 2005, pour lesquels aucune explication n'existe pour l'instant.
Les fortes charges des anions cumulés (sulfates + nitrates) sont toujours bien équilibrées par les cations nutritifs (ici à l'exemple de calcium + magnésium). Les teneurs en cations acides (aluminium + protons) restent très faibles.
Même si le pH diminue ponctuellement lors des pics de nitrates, il augmente sur l'ensemble des 12 ans, à mesure que les concentrations en sulfates diminuent.

Les réserves minérales du sol permettent de neutraliser l'acidité actuelle des dépôts. La baisse des dépôts de soufre entraîne une augmentation générale du pH. Ceci dit la baisse du pH lors des pics acidifiants de nitrates montre que les dépôts d'azote peuvent perturber la dynamique de re-saturation progressive du sol.

Zoom sur le site de la forêt de la Croix-Scaille (EPC 08, Ardennes)

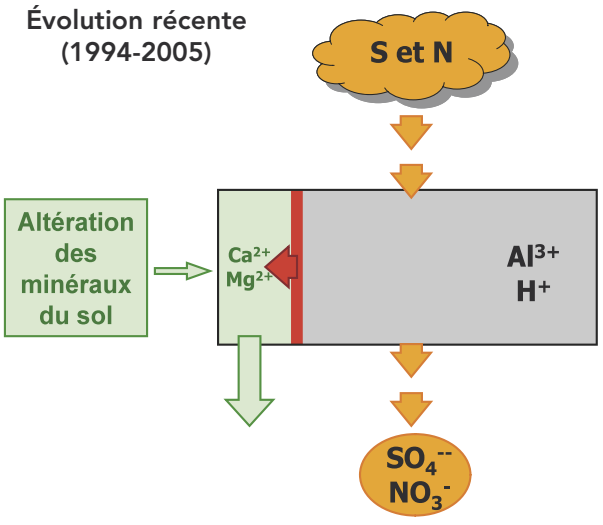
Le site correspond à une plantation d'épicéas d'environ 50 ans, à 470 m d'altitude. Le sol, développé sur des schistes « ardoisiers », est un podzosol ocrique, très pauvre, avec un taux de saturation de 4 % entre la surface et 20 cm de profondeur.

Évolution probable avant 1994

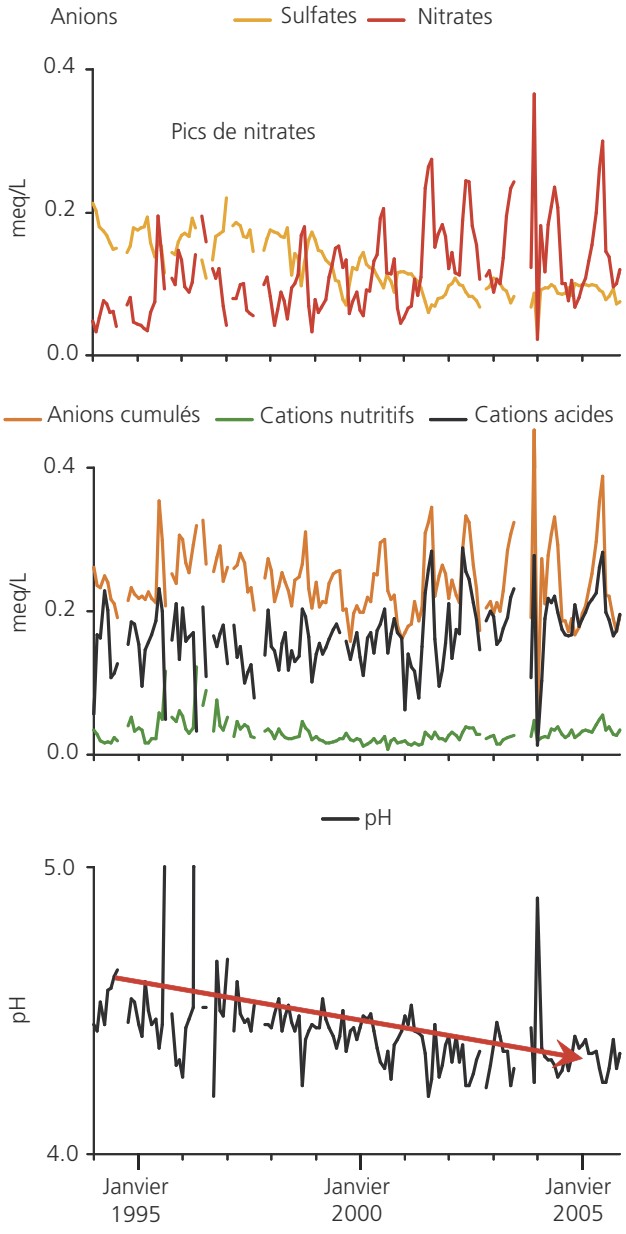


Comme dans le cas de CHP 59, le sol a dû subir une acidification par le passé sous l'effet d'importants dépôts de soufre atmosphériques.

Évolution récente (1994-2005)



Aujourd'hui on observe que les dépôts atmosphériques acidifiants restent trop importants pour être neutralisés par les faibles ressources du sol. L'acidification se poursuit.



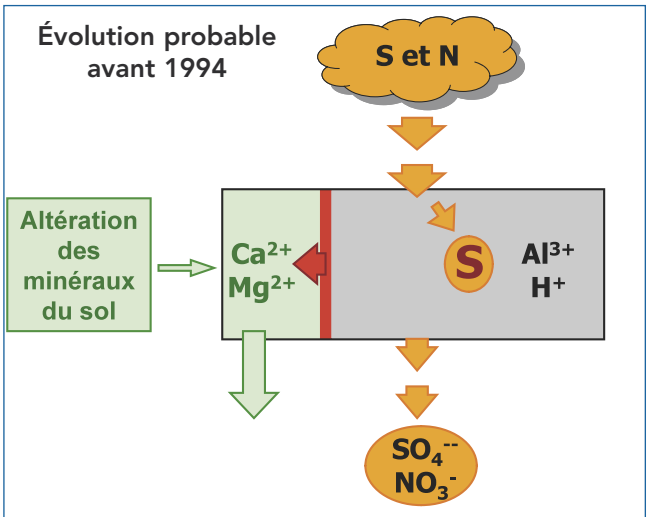
Analyse des solutions de sol à 20 cm de profondeur entre 1994 et 2006 (deux graphiques du haut : concentrations en milliéquivalent par litre= meq/L) :

Les concentrations en sulfates chutent nettement dans les solutions de sol depuis 1994. Mais les charges de nitrates augmentent davantage, si bien que globalement le cumul des anions (sulfates + nitrates) ne diminue pas sur les 12 ans.
Les charges de ces anions cumulés sont équilibrées de plus en plus par la hausse des cations acides (aluminium + protons), les concentrations en cations nutritifs (calcium + magnésium) demeurant très faibles.
Au final, comme les cations acides prennent de plus en plus d'importance, le pH diminue.

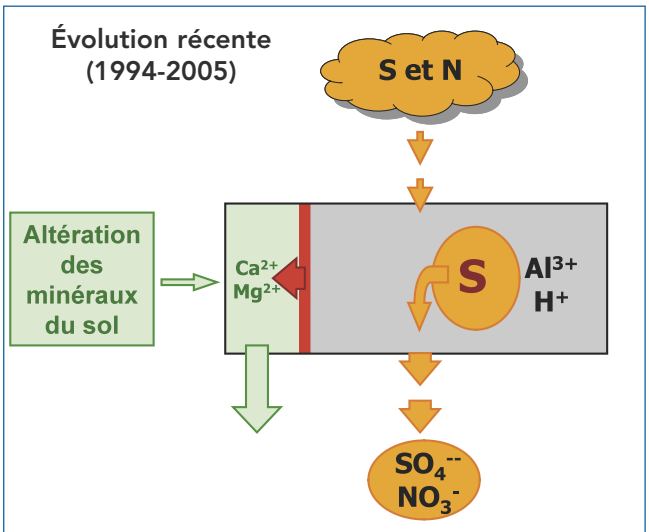
Le seuil de charge critique est dépassé : les faibles réserves minérales du sol ne suffisent pas à neutraliser la charge acidifiante des sulfates puis des nitrates. La baisse des dépôts de soufre se retrouve bien dans les solutions de sol mais c'est l'azote qui joue maintenant le plus grand rôle dans l'acidification.

Zoom sur le site de la forêt d'Abreschviller (SP 57, Moselle)

Il s'agit d'une futaie régulière de sapins d'environ 65 ans du massif vosgien, à 400 m d'altitude. Le substrat est gréseux et le sol pauvre : son taux de saturation est de 12 % entre la surface et 20 cm de profondeur.



Ici encore les forts dépôts atmosphériques de soufre ont dû provoquer une acidification par le passé mais en alimentant aussi le stock de sulfates dans le sol.

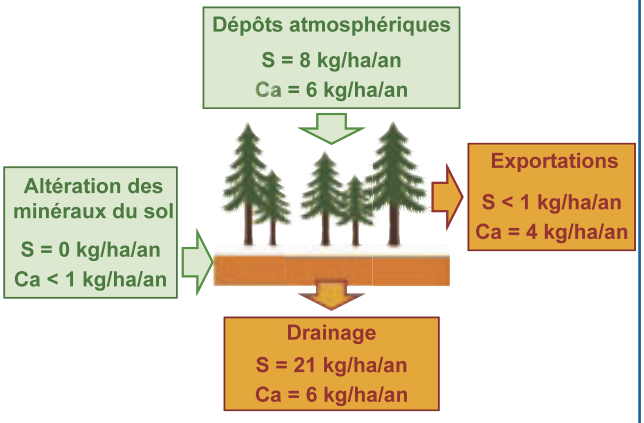


Depuis, les dépôts atmosphériques ont nettement diminué mais les sulfates accumulés dans le sol sont drainés progressivement en entraînant encore avec eux des cations nutritifs. L'acidification se poursuit donc par ce déstockage de sulfates.

L'étude du site SP 57 nous permet de mettre en évidence l'influence du stockage de soufre dans le sol et de son déstockage sur l'acidification.

Notre avons estimé le bilan des apports et des pertes de soufre et de calcium subis par l'écosystème entre 1996 et 2005. Les flux entrants (en vert) comprennent :
- les dépôts atmosphériques mesurés sous couvert,
- les apports par altération minérale, estimés par Party (1999) à l'aide du modèle Profile.

Les flux sortants (en rouge) comprennent :
- le drainage vertical, calculé à partir du bilan hydrique (voir Bréda et Badeau, ce volume) et des concentrations mesurées dans les solutions de sol,
- les exportations par récolte de bois (coupes), estimées dans des conditions proches sur une révolution de 85 ans par Le Goaster et al. (1991).



Bilan des entrées et sorties de soufre (S) et de calcium (Ca) dans l'écosystème.
Bilan du soufre = (8 + 0) – (21 + 1) = –14 kg/ha/an
Bilan du calcium = (6 + 1) – (4 + 6) = –3 kg/ha/an

Le bilan estimé pour le soufre est très négatif, résultant d'un drainage vertical très important de sulfates alors que les dépôts atmosphériques ont nettement diminué. Cela s'explique par un déstockage de sulfates contenus dans le sol.
Ce drainage vertical de sulfates entraîne un drainage important de calcium, tout juste compensé par les dépôts atmosphériques et les très faibles apports par altération des minéraux. Dans ce contexte d'équilibre précaire, les exportations, même sans exploitation de bois particulièrement intensive, suffisent à rendre le bilan de calcium négatif. L'écosystème s'appauvrit.

Les dépôts atmosphériques de soufre ont bien diminué mais les sulfates accumulés dans le sol par le passé sont drainés progressivement en acidifiant encore le sol. Dans ce contexte, les exportations d'éléments nutritifs par l'exploitation de bois jouent un rôle décisif dans l'appauvrissement du sol.

Conclusions

Les politiques mises en œuvre pour la diminution des pollutions atmosphériques ont porté leurs fruits puisque la baisse des émissions de soufre se retrouve bien dans les analyses de pluie et de solutions de sol effectuées sur le réseau RENECOFOR. En revanche, les pollutions azotées sont encore élevées et deviennent la principale source d'acidification (voir Coddeville *et al.* dans ce volume).

Les conséquences varient suivant les sols. Les sols assez riches sont capables de neutraliser les dépôts acides. Par contre, pour les sols pauvres, la charge acidifiante peut rester trop importante. De plus, même si les dépôts de soufre ont globalement chuté, ces sols peuvent encore être acidifiés par le drainage des sulfates qu'ils ont accumulés par le passé. L'acidification est donc toujours d'actualité.

Dans ce contexte, la récolte de bois peut contribuer fortement à l'appauvrissement des sols. Au moment où la demande de bois-énergie s'accroît, il convient donc de bien raisonner l'exploitation forestière, en évitant surtout de l'intensifier sur les sols sensibles.

Manuel NICOLAS[1,2]
Etienne DAMBRINE[1]
Erwin ULRICH[2]
[1]INRA – Centre de Nancy,
Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers
[2]ONF – Département Recherche
dambrine@nancy.inra.fr,
mnicolas@nancy.inra.fr,
erwin.ulrich@onf.fr

Bibliographie

Le GOASTER S., DAMBRINE E., RANGER J., 1991. Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa (*Picea abies Karst*) sur sol pauvre. I- Évolution de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. Acta Oecologica, vol 12 n°6, pp. 771-789

PARTY J.P., 1999. Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Taux d'altération sur petits bassins-versants silicatés. Application au calcul des charges critiques d'acidité. Strasbourg : Université Louis Pasteur. Thèse de doctorat, 247 p. + ann.

E. Ulrich, ONF

M. Lanier, ONF

L. Croisé, ONF

Qu'a apporté le réseau pour le calcul des charges critiques en polluants atmosphériques en France ?

Contexte : les peuplements forestiers, victimes de l'acidification des sols

Au cours du siècle dernier, pendant des décennies, les forêts françaises ont été soumises à des retombées atmosphériques acides liées à l'accroissement des émissions de polluants atmosphériques soufrés et azotés avec l'essor industriel des pays de l'hémisphère nord notamment. Ces dépôts atmosphériques acides ont des effets directs sur les arbres mais surtout ils entraînent plusieurs effets sur les sols et les écosystèmes : baisse de pH de la solution du sol, désaturation du complexe d'échange et solubilisation de l'aluminium. Les forêts subissent donc des effets dits « indirects » qui déséquilibrent en particulier les réserves nutritionnelles et entraînent des conséquences sur la santé des peuplements forestiers, pouvant aboutir à la mort des forêts comme dans les cas extrêmes de l'Europe de l'Est (photo).

A. Probst, ECOLAB

Mort des épicéas dans les Monts des Géants (Tchéquie, juin 2005)

Pour tenter d'imposer des réductions des émissions de polluants atmosphériques acides transfrontières, un concept a été mis en place au niveau européen : « les charges critiques ». La notion de « charge critique » sert de base scientifique depuis 15 ans aux négociations internationales sur la réduction des émissions polluantes. La réduction des émissions de composés acidifiants par pays est régie au niveau européen par le protocole de Göteborg (« multi-polluants, multi-effets », 2005) à échéance 2010.

Selon Nilsson et Grennfelt (1988), la première définition désignait les charges critiques comme « la valeur d'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle des effets significatifs indésirables portant sur des éléments sensibles de l'environnement n'apparaissent pas […] ». Aujourd'hui elles sont censées représenter le dépôt atmosphérique maximal admissible pour un écosystème et constituent un outil de référence internationalement reconnu pour raisonner la réduction des émissions de polluants, en l'état actuel des connaissances.

Le réseau RENECOFOR : un outil de référence pour la détermination de charges critiques

Les dépôts de polluants atmosphériques acides et acidifiants sont liés aux émissions de soufre et d'azote. Ces émissions de SO_2 et de NO_x ont évolué au cours du siècle dernier, ce que l'on peut constater sur une cinquantaine d'années de mesure (figure 1 page suivante).

Le calcul des charges critiques d'acidité dépend de la capacité du milieu à contenir cette acidité à un niveau considéré comme acceptable. Il repose donc sur une estimation du flux d'altération, c'est-à-dire de la quantité de cations basiques (calcium, magnésium, potassium et sodium) provenant de la dissolution des minéraux des sols et des roches, qui neutralise l'acidité, et sur une estimation du drainage d'acidité hors de l'écosystème sous forme de protons (H^+) et d'aluminium. Ces charges critiques, calculées pour l'ensemble des écosystèmes forestiers français, ont été cartographiées au 1/1 000 000 sur la base de données

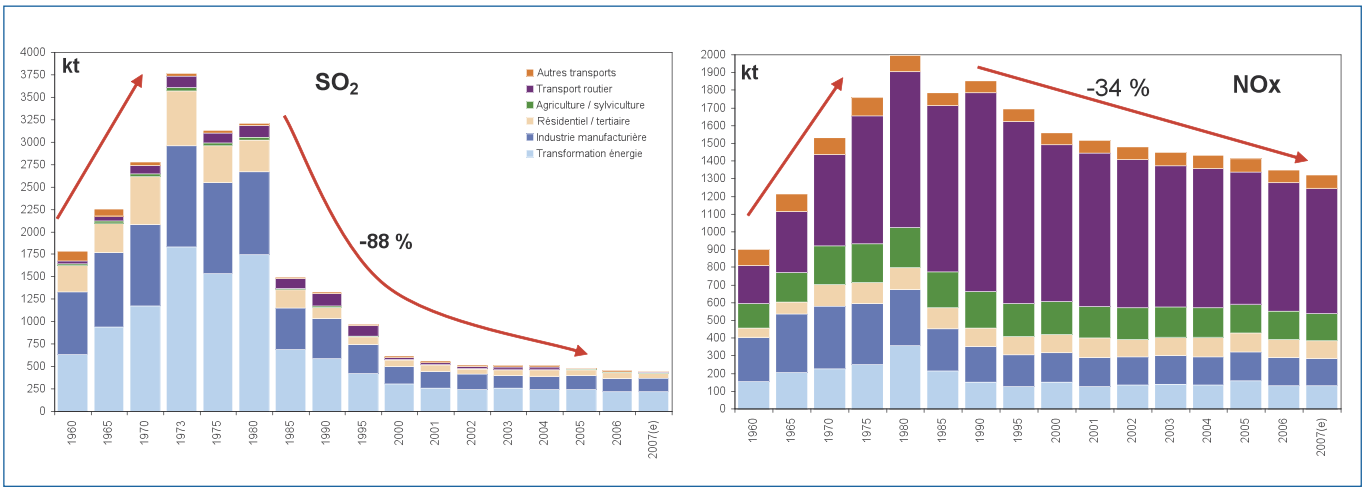


Fig. 1 : évolution des teneurs en SO_2 et en NO_x dans l'atmosphère en France entre 1960 et 2007 (source CITEPA, 2008)

NB : avant 2000, les périodes sont espacées de 2 à 5 ans et après 1990, il s'agit de données annuelles.

spatialisées disponibles dans les domaines pédologique, géochimique et climatique, et à partir de données minéralogiques.

Le réseau RENECOFOR a servi de support essentiel pour établir, sur la base d'un nombre limité de sites bien documentés, les premières cartographies, et extrapoler ensuite à l'ensemble du territoire français. Il a permis de répondre à cinq questions que nous allons détailler.

1. Quels sont les écosystèmes forestiers sensibles aux dépôts d'acidité retenus pour calculer les charges critiques ?

Une douzaine de placettes du réseau RENECOFOR ont été utilisées comme sites pilotes : elles ont été choisies en fonction des gammes de sensibilité à l'acidification, des dépôts atmosphériques qu'elles reçoivent sous forme de composés acidifiants ou de cations « basiques ». Elles ont permis de renseigner les différents flux d'éléments des termes de calculs des charges critiques (dépôts atmosphériques, altération, prélèvement par la biomasse, notamment) pour différents écosystèmes français. Dans ce qui suit, cinq écosystèmes forestiers sont pris comme exemples (figure 2).

2. Quel est le rôle respectif des différents compartiments des écosystèmes forestiers dans l'acidification/la neutralisation des dépôts atmosphériques acides ?

À partir des mesures effectuées sur les placettes du réseau sensibles aux dépôts acides, nous avons pu mettre en évidence l'importance relative du pouvoir tampon des différents flux d'éléments vis-à-vis du dépôt acide : flux de cations basiques issus de l'altération, flux de cations basiques prélevés par la végétation, flux de cations atmosphériques déposés.

En général, c'est l'altération qui joue un rôle prépondérant contre l'acidification. Cependant dans le cas des sols très pauvres en cations basiques (calcium, magnésium, sodium potassium), les dépôts atmosphériques non-marins (c'est-à-dire la part anthropique de l'ensemble des dépôts) peuvent représenter jusqu'à quatre fois le flux d'altération et ainsi jouer un rôle

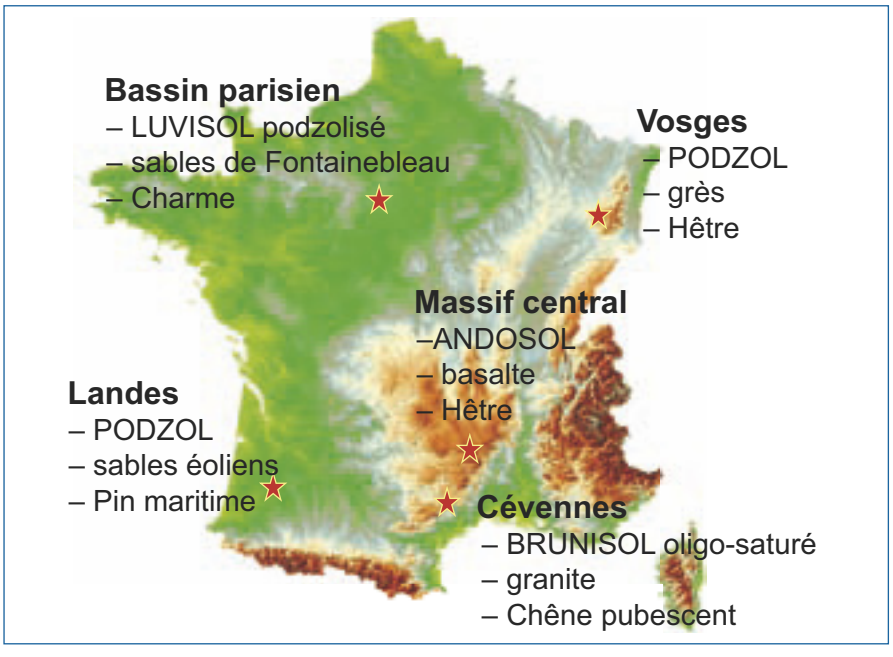


Fig. 2 : exemples d'écosystèmes forestiers de sensibilités variées à l'acidification, pour lesquels les charges critiques d'acidité ont été calculées à partir des mesures faites sur certains sites RENECOFOR

majeur dans la neutralisation ; c'est le cas des sols sur granite du Massif Central. Par ailleurs, la forte productivité de certaines espèces forestières entraîne un prélèvement de cations nutritifs important qui, dans les cas de sols sensibles à faibles ressources d'éléments minéraux, provoque une diminution du pouvoir tampon des sols, et constitue un facteur d'acidification non négligeable ; c'est le cas notamment des Landes et des Vosges (figure 3). Les écosystèmes combinant faible altération, faibles dépôts de cations non-marins, et forte productivité, sont donc les plus sensibles à l'acidification (Moncoulon *et al.*, 2004).

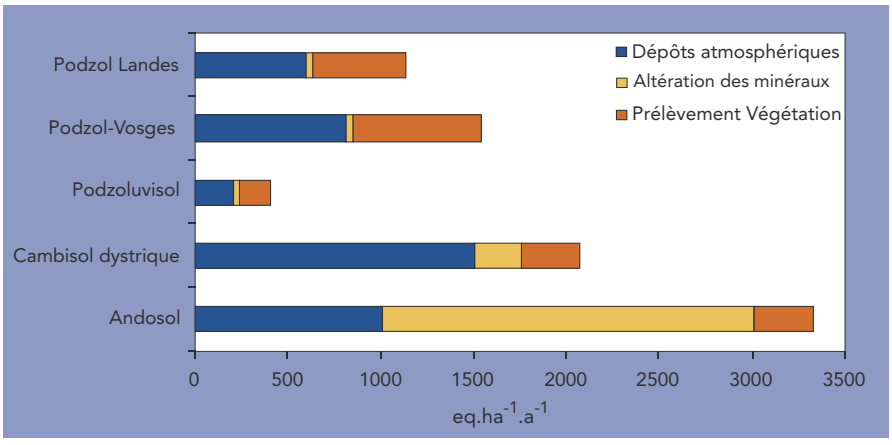


Fig. 3 : comparaison des flux de cations basiques prélevés par la végétation, apportés aux sols par altération des minéraux et par les dépôts atmosphériques

3. Quel est le potentiel d'altération à l'échelle nationale pour la cartographie des charges critiques ?

L'altération est un paramètre important dans le calcul des charges critiques car il représente le pouvoir tampon intrinsèque des sols vis-à-vis de l'acidité. Or en France seules quelques données ponctuelles sur des sites de recherche étaient disponibles. Grâce au réseau RENECOFOR, les valeurs d'altération ont pu être établies pour 12 sites de référence du réseau, représentatifs des grandes familles pédogéochimiques françaises. Les flux de cations basiques, produits de l'altération des minéraux, y ont été déterminés, et mis en relation avec un indice Iw qui permet une extrapolation à l'échelle nationale (figure 4).

Ainsi, en utilisant seulement le taux d'argile et la somme des bases échangeables, une extrapolation des valeurs d'altération aux unités de la carte « pédogéochimique » de France, a permis d'obtenir *in fine* une carte de valeurs de flux de cations basiques issus de l'altération pour le territoire français.

Par ailleurs, la cartographie du drainage réalisée à l'aide de la carte des pluies efficaces pour le territoire français, a été pondérée par le calcul des réserves utiles selon les profondeurs d'enracinement constatées pour les principales essences forestières (données RENECOFOR).

4. Où se situent les secteurs à charges critiques dépassées en polluants atmosphériques acides ?

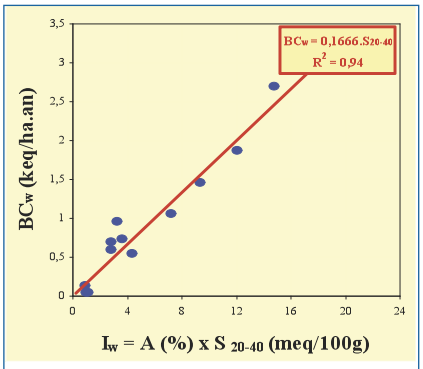
Le calcul des charges critiques d'acidité a été appliqué aux 102 placettes du réseau à partir de la relation établie entre les valeurs d'altération et les charges critiques calculées sur les 12 sites. Des cartes de dépassement de charges critiques ont pu être établies par comparaison avec la carte des dépôts atmosphériques basée sur les données du sous-réseau CATAENAT.

Les charges critiques d'acidité se révèlent faibles (inférieures à 1,0 k eq.ha^{-1}.an^{-1}) sur un peu moins de 15 % de l'espace forestier français de production, soit environ 1,7 million d'hectares (figure 5). Les zones où les charges critiques ont été dépassées (hachurées dans la figure 5) sont principalement localisées dans les Vosges, les Ardennes, les Landes et secondairement ou ponctuellement au sud-ouest de l'Île-de-France, en bordure du Massif Central, en Bretagne, et en Normandie. Sont concernés par ces excès :

- pour les roches mères : les sables quartzeux et les formations à silex, les schistes et les grès siliceux, les granites plutôt acides, certains gneiss ;
- pour les essences : le pin sylvestre et l'épicéa, le chêne sessile, le pin maritime et le hêtre (Probst *et al.*, 2004).

5. Quelle est la réponse des écosystèmes forestiers à l'évolution des apports atmosphériques acides ?

Dans un contexte actuel de diminution des émissions acidifiantes en Europe, faisant suite à l'application des protocoles de réduction



avec
A = taux d'argile
S_{20-40} = somme des bases échangeables à une profondeur de 20 à 40 cm

Fig. 4 : relation entre le flux de cations basiques issu de l'altération (BCw) et l'indice d'altération (Iw) pour 12 sols du réseau RENECOFOR (points bleus)

des émissions dans le cadre de la convention de Genève, certaines questions se posaient vis-à-vis des écosystèmes forestiers français :
- les charges critiques acides ont-elles été dépassées par le passé ? Si oui, pendant combien de temps ?
- Peut-on espérer une restauration des écosystèmes atteints ? dans quel délai ?
- Quels sont les mécanismes de restauration des écosystèmes acidifiés ?

Pour tenter de répondre, la base de données acquises sur les stations du réseau a permis de procéder à une modélisation dynamique de la réaction des écosystèmes, sous l'effet des changements de dépôts atmosphériques.

La capacité de restauration des écosystèmes acidifiés dans le passé est à prendre en compte car c'est elle qui détermine désormais le seuil de dépôts acides encore tolérables par les sols. C'est la notion de « Charges Cibles » (ou Target Loads), c'est-à-dire le dépôt atmosphérique tolérable par les écosystèmes acidifiés pour atteindre la restauration dans un délai défini (de 20 à 100 ans). Leur détermination nécessite l'utilisation de modèles dynamiques. Les prédictions réalisées à partir des données du réseau RENECOFOR (Moncoulon *et al.*, 2007) montrent que, selon les flux de cations basiques issus de l'altération et de dépôts de cations basiques apportés aux sols, le délai de restauration peut varier de 10 à 60 ans.

Il a pu être prédit (figure 6) qu'en 2010, à l'issue du protocole de Göteborg :
- il subsisterait dans les Vosges un dépassement de la charge critique,
- le dépassement constaté dans les Landes de 1955 à 2000 n'existerait plus,
- dans le Massif Central, où les charges critiques n'ont jamais été dépassées, elles ne le seront toujours pas.

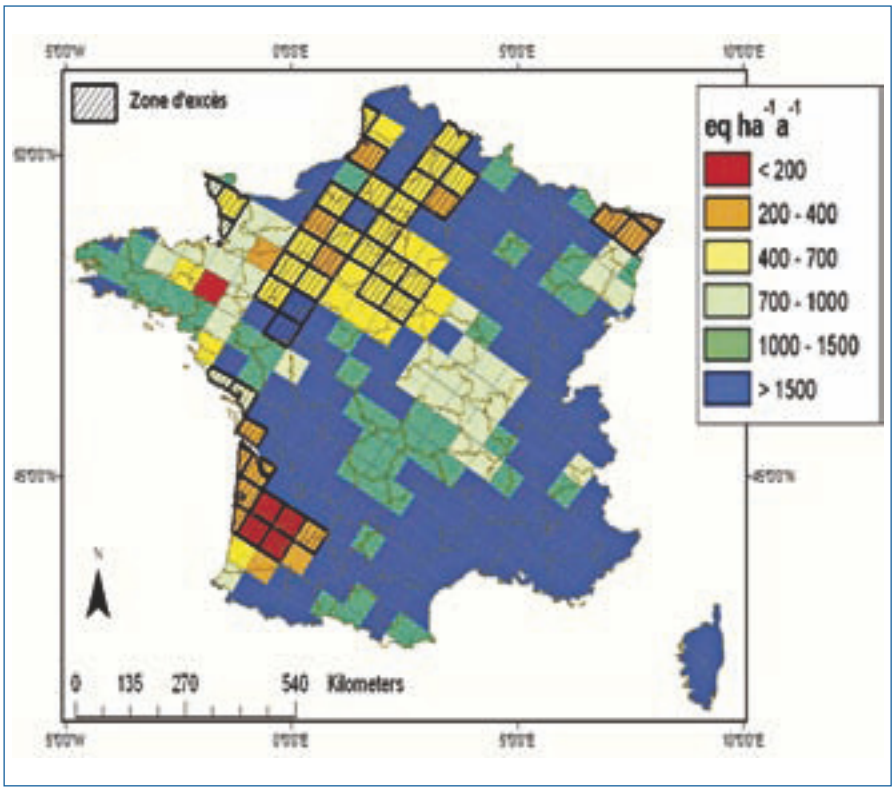


Fig. 5 : carte des charges critiques d'acidité pour les écosystèmes forestiers et zones de dépassement (Probst et al., 2004)

Synthèse et conclusion

Le réseau RENECOFOR a servi d'outil essentiel dans la détermination des charges critiques en polluants pour la protection des écosystèmes forestiers français.

Malgré la diminution des dépôts atmosphériques acides, liés principalement à la réduction des émissions soufrées, aujourd'hui les charges critiques sont encore dépassées au Nord, au Nord-Est et pour une partie des Landes. Les écosystèmes combinant faible altération, faibles dépôts de cations non-marins, et forte productivité, sont les plus sensibles à l'acidification. Pour certains sols sur roches acides, à pouvoir tampon relativement élevé, recevant des dépôts acides conséquents, le processus d'acidification est retardé dans les couches profondes. De nos jours, malgré la réduction des dépôts acides, ces couches profondes continuent parfois à s'acidifier. D'une façon générale, l'acidification est retardée dans les couches profondes en fonction des paramètres pédologiques : capacité d'échange cationique, matière organique, fonctionnement hydrique du sol et altération.

Sur certains sites, à l'échéance du protocole de Göteborg (2010), la restauration ne sera pas assurée (par exemple, sur les grès vosgiens). Sur les sites les plus sensibles, le pH ne se restaure qu'à l'échelle décennale (par exemple dans les Landes).

Les dépôts azotés, qui ont été peu réduits et dont la transformation dans les sols produit de l'acidité, contribuent fortement, et plus qu'auparavant, à l'acidification des sols. Le réseau sert actuellement de support aux calculs de charges critiques azotées et en métaux lourds.

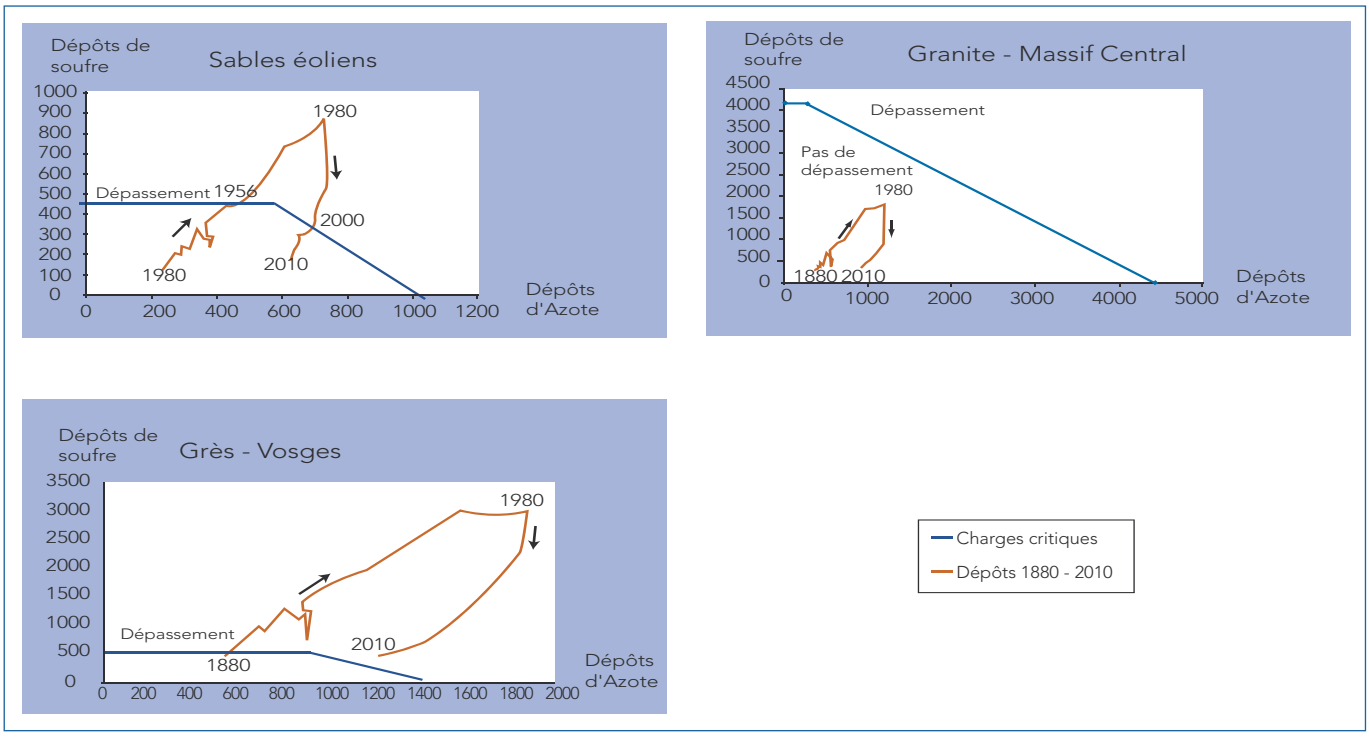


Fig. 6 : évolution des dépôts atmosphériques modélisés en soufre et azote entre 1880 (avant l'ère industrielle) et 2010 (échéance du protocole de Göteborg) et comparaison avec les valeurs de charges critiques (Source : Moncoulon et al., 2007)

Si les dépôts se situent au-dessus des valeurs de charge critique, celle-ci est dépassée.

Anne PROBST
David MONCOULON
Sophie LEGUÉDOIS
ECOLAB, Laboratoire d'Écologie Fonctionnelle
UMR 5245 CNRS-UPS-INPT, ENSAT
anne.probst@ensat.fr

Jean-Paul PARTY
SOL-CONSEIL
jpparty@wanadoo.fr

Étienne DAMBRINE
INRA-Centre de Nancy,
Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers
dambrine@nancy.inra.fr

Remerciements

Laurence Galsomiès (ADEME), Erwin Ulrich et son équipe (RENECOFOR/ONF) sont vivement remerciés pour leur soutien constant dans ces travaux.

Bibliographie

MONCOULON D., PROBST A., PARTY J.-P., 2004. Weathering, atmospheric deposition and vegetation uptake : role for ecosystem sensitivity to acid deposition and critical load. C. R. Geosciences n° 336, pp. 1417-1426

MONCOULON D., PROBST A., MARTINSON L., 2007. Modeling acidification recovery on threatened ecosystems : application to the evaluation of the Gothenburg protocol. Water, Air and Soil Pollution : Focus, vol. 7, n° 1-3, pp.307-316

NILSSON J., GRENNFELT P. (eds): 1988. Critical loads for Sulphur and Nitrogen. Miljøreport, Nordic council of ministers, Copenhagen, n° 15, pp. 1-418

PROBST A. , MONCOULON D., PARTY J.P., 2004. National Focal Center report : France. *In* Critical Loads and Dynamic Modelling Results, Hettelingh J.P., Posch M., Slootweg (eds.). CCE Progress Status report 2004 RIVM, n° 259101014/2004, pp. 71-76

Les écosystèmes forestiers sont-ils contaminés en métaux ?

Généralement qualifiés de « métaux lourds » de façon abusive dans le langage courant (bien que certains soient de masse moyenne), les métaux ne représentent que 0,6 % de la composition de la croûte terrestre. Si certains d'entre eux ne sont pas indispensables à la vie (par exemple le cadmium, Cd, et le plomb, Pb) et peuvent présenter une toxicité aiguë, d'autres au contraire sont nécessaires à la vie (par exemple le cuivre, Cu, et le zinc, Zn). Leur temps de résidence dans les sols se situe entre 100 et 3 000 ans.

Pourquoi s'intéresser à l'impact des métaux sur les écosystèmes forestiers ?

Bien qu'il soit de nos jours impossible de trouver des milieux peu perturbés et peu contaminés par l'homme, les écosystèmes forestiers représentent les milieux *a priori* les plus protégés. C'est ainsi qu'ils ont été supposés pendant longtemps indemnes de toute contamination et ont été négligés en ce qui concerne les métaux, les recherches ayant porté plutôt sur des sols pollués ponctuellement (par les industries, notamment). Or, nous avons pris conscience depuis les années 80 que la pollution atmosphérique se manifeste à longue distance et que les écosystèmes forestiers subissent donc aussi cette pollution. De plus, les émissions atmosphériques de métaux en France ont montré des évolutions variables depuis 15 ans : certaines ont fortement régressé suite aux mesures de réduction prises à l'échelle européenne (cas du plomb), d'autres se sont stabilisées (cas du cuivre), mais dans le détail, l'évolution peut être à la hausse ou à la baisse selon les sources d'émissions, ou secteurs d'activité (figure 1).

Les sols forestiers constituent des milieux de référence relativement protégés qui permettent une analyse de la sensibilité à la pollution atmosphérique en métaux. On connaît mal le rôle des métaux sur la forêt : si le rôle direct n'est pas démontré, en revanche on sait que le rôle indirect de certains d'entre eux est avéré, notamment par leur action sur les organismes entraînant par exemple des désordres nutritionnels (cas de l'aluminium, Al).

Il existe peu d'études, surtout en France, sur les zones forestières soumises à la pollution atmosphérique diffuse. Mais il est important de pouvoir protéger les écosystèmes forestiers de la pollution à l'échelle européenne : c'est ce qui est mis en place via le concept de « charges critiques »[1].

L'objectif est ici de tenter de répondre à quatre questions fondamentales :
1-quelles sont les teneurs en métaux rencontrées dans les sols des forêts françaises ?
2-quelle est leur accessibilité pour les organismes vivants dans les sols forestiers ?
3-quelle origine ont les métaux trouvés actuellement dans les sols forestiers : naturelle ou non ?
4-enfin, quel devenir auront-ils dans les sols ?

Le réseau RENECOFOR a servi de support pour étudier le comportement des métaux dans plusieurs types de sols forestiers soumis à différentes conditions environnementales en France, notamment vis-à-vis des apports de polluants atmosphériques.

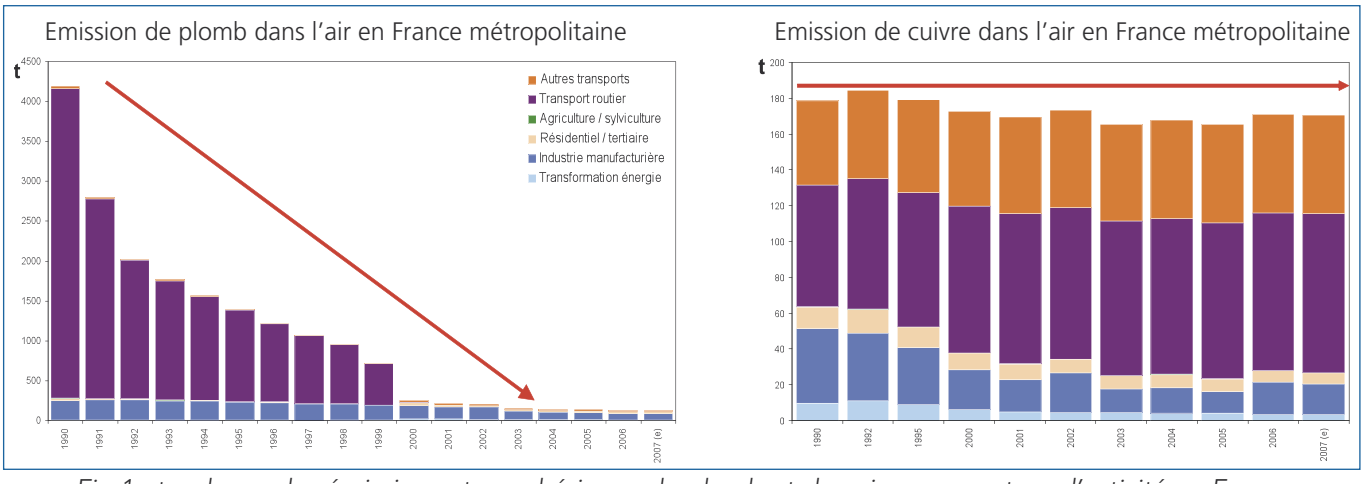


Fig.1 : tendance des émissions atmosphériques de plomb et de cuivre par secteur d'activité en France (source CITEPA, 2008)

(e) Estimation préliminaire CITEPA /CORALIE - N.B. Pour Cu, à partir de 2000, les données sont annuelles

[1] *La « charge critique » en polluants atmosphériques représente la quantité maximale de dépôts que l'on tolère pour un écosystème donné.*

Les compositions en métaux des humus ont été étudiées sur l'ensemble des sites du réseau RENECOFOR et du réseau européen (16x16 km) et la répartition des métaux dans les profils de sol a été examinée sur 11 placettes RENECOFOR grâce à des analyses physico-chimiques poussées et novatrices. Cela permet de faire une première évaluation de la contamination des sols forestiers en France.

Les humus des sols forestiers : de formidables enregistreurs de la pollution atmosphérique récente

Les humus forestiers étudiés présentent des teneurs en métaux qui restent en général dans la gamme des sols peu pollués. Toutefois, les teneurs en plomb et cadmium sont plus élevées que dans les horizons de surface de sols cultivés ; les teneurs en zinc sont également relativement fortes.

La variabilité interplacette est forte et les humus à teneurs élevées se situent à proximité de zones industrielles (par exemple à Brotonne, Seine Maritime, PS 76), en Ile-de-France, aux frontières du nord et de l'est (Z1, figure 2) ; on les trouve aussi dans des secteurs à forte pluviométrie des massifs montagneux du Centre (Auvergne, Z2), des Alpes, ou du sud du Massif Central (Mont Aigoual, Gard, HET 30). Enfin, ils se situent aussi non loin ou le long des grands axes routiers : Ile-de-France/Dijon-Lyon-Marseille, Ile-de-France/région Nord-Ouest — Normandie, Ile-de-France/région Est — Allemagne (Probst *et al.*, 2003).

La distribution spatiale des métaux met en évidence les principales zones de dépôts atmosphériques importants. Ainsi, les humus forestiers semblent être les témoins des dépôts de plomb d'origine atmosphérique, avec notamment une distribution de teneurs élevées le long des axes autoroutiers. Pour le

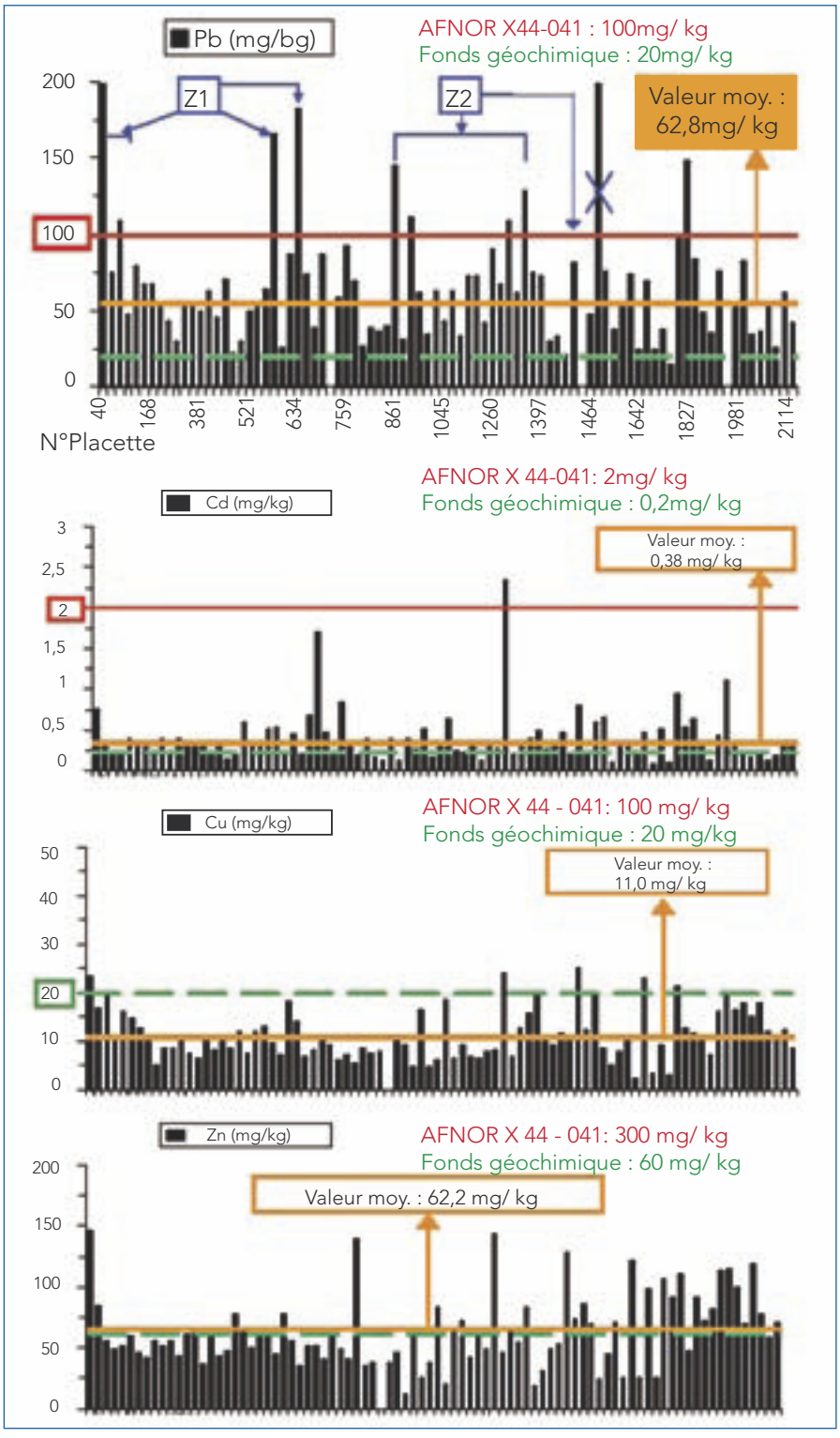


Fig. 2 : comparaison des teneurs en plomb, cadmium, cuivre et zinc dans les horizons holorganiques (OH) des placettes du réseau européen avec le fond géochimique (pointillé vert) et la norme AFNOR (trait rouge) relative aux teneurs en métaux des sols avant épandage des boues d'épuration (Probst et al., 2003)

Chaque barre correspond à une placette, le trait orange indique la moyenne des valeurs pour chaque métal Z1 = placettes en Île-de-France et frontière du Nord et de l'Est ; Z2 = régions des massifs montagneux et Alpes

plomb (Pb), 11 % sites présentent des teneurs supérieures à la norme AFNOR. Les humus ont des teneurs supérieures à la médiane du fond géochimique dans 98 % des cas pour le plomb, 79 % pour le cadmium, 46 % pour le zinc et 23 % pour le cuivre. Les teneurs en plomb peuvent être 3 fois supérieures à la valeur médiane.

Interpréter les teneurs en métaux des sols : les termes de comparaison

Le *fond géochimique* représente la concentration en métaux d'origine naturelle libérée par altération chimique des minéraux du substratum.
La *norme AFNOR 44-041* fixe les valeurs limites des teneurs en métaux des sols français pour l'épandage des boues des stations d'épuration.

La nature des humus, les types de sols et de roche mère associés jouent un rôle dans la répartition des métaux (figure 3). Le cuivre et le zinc sont plutôt enrichis dans les amphimulls et le plomb plutôt dans les moders. Le cadmium est indifférent mais la médiane est plus élevée dans les humus hydromorphes. Les humus les plus riches en métaux sont développés sur alocrisols (sols bruns ocreux acides), les plus pauvres sur luvisols (sols lessivés) et redoxisols (sols lessivés hydromorphes).

Répartition des métaux au sein de certains sols types du réseau

Les placettes retenues pour l'étude des profils (figure 4) prennent en compte différents types de forêts (hêtre, épicéa, pin sylvestre et pin maritime, chêne sessile et sapin) et différents types de sols (sol brun acide, sol ocre podzolique, podzol, sol lessivé, sol brun andique et sol brun calcique).

Dans les profils des sols étudiés, les gammes de concentrations en métaux sont conformes à celles de sols des milieux peu pollués, mais les concentrations en plomb, chrome et nickel excèdent parfois les limites européennes pour les sols non contaminés et même les valeurs limites de la norme française AFNOR pour les épandages de boues de stations d'épuration. L'ordre d'abondance des métaux est le suivant : Cr > Zn > Pb > Ni > Cu > Co >> Cd.

L'analyse a mis en évidence le caractère de piège à métaux du cambisol calcarique (sol calcaire) et de l'andosol, la faible capacité de rétention en métaux des sols acides, le lessivage et le piégeage des métaux dans les horizons argileux des sols lessivés, ainsi que la migration des métaux dans les podzols. Les concentrations en chrome et nickel augmentent sou-

Fig. 4 : localisation des 11 placettes RENECOFOR retenues pour l'étude de distribution des métaux dans les profils de sol
Sont en rouge les 3 sites qui ont permis d'étudier la disponibilité des métaux

vent avec la profondeur, alors que la distribution du cobalt, du cuivre et du zinc dépend des caractéristiques des sols. Le plomb et le cadmium présentent souvent une accumulation en surface des sols. De façon générale, c'est dans les fractions fines (<50 µm) que les sols considérés contiennent le plus de métaux (Probst *et al.*, 2003).

Il a été montré que l'accumulation du plomb en surface correspond à un enrichissement d'origine anthropique. Cet enrichissement s'observe dans l'ensemble du pays mais est d'autant plus important que les sols sont situés sur les façades Est et Nord-Est du pays, qui sont soumises à une pollution atmosphérique significative (Hernandez *et al.*, 2003).

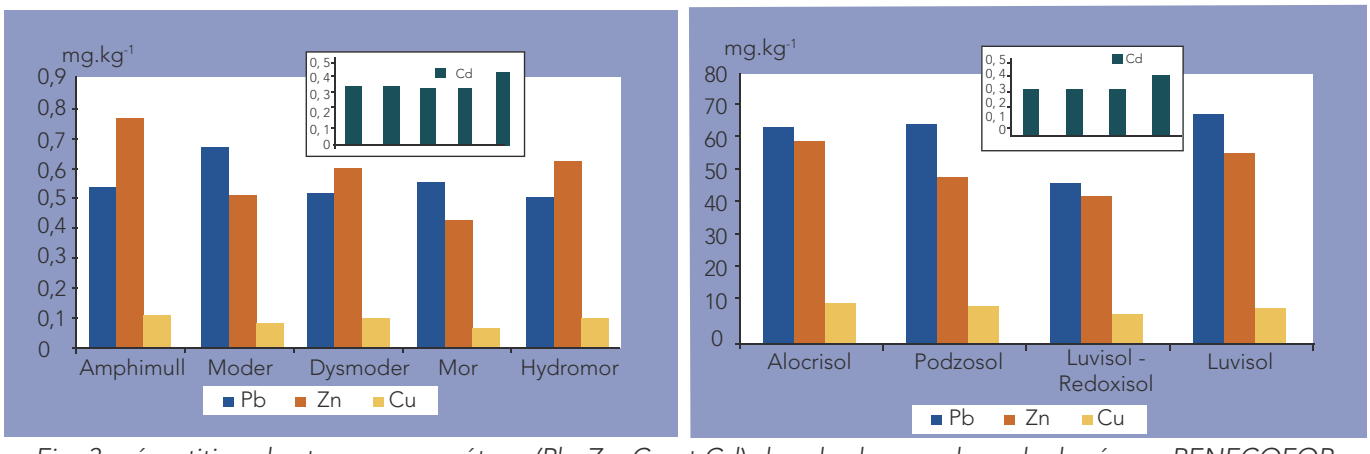


Fig. 3 : répartition des teneurs en métaux (Pb, Zn, Cu et Cd) dans les humus des sols du réseau RENECOFOR selon la nature des humus (à gauche) et selon le type de sol (à droite)
Les teneurs en Cd atteignent au maximum 0,5 mg.kg-1 et sont donc représentées à part selon la même logique…

Signalons enfin que les concentrations en métaux des sols du réseau sont contrôlées de façon spécifique par différents paramètres (pH, teneur en oxydes de fer et d'aluminium, teneur en argile, matière organique et CEC). La figure 5 montre les exemples pour le zinc en fonction de la teneur relative en fer et aluminium total.

Où se trouvent les métaux lourds dans les sols ? Comment les trouver ?

Une étude spécifique menée sur un sol brun andique (EPC63), un sol ocre podzolique (EPC08), et un sol brun calcique (SP05) a permis de déterminer la localisation et la disponibilité (=possibilité pour la plante d'y avoir accès) des métaux grâce à une méthode d'extraction poussée, qui permet de savoir où ils se trouvent (Leleyter et Probst, 1999) (figure 6). La plus forte disponibilité a été mise en évidence pour le cadmium, le plomb et le cobalt, notamment dans le sol des Ardennes. Zinc, nickel et cuivre sont contrôlés par la matière organique, mais de façon générale les métaux sont principalement liés aux oxydes de fer, à la matière organique, ou sont présents dans les réseaux cristallins des minéraux. L'ordre moyen de disponibilité établi pour les trois sols est : Zn > Cd > Co > Cu > Pb > Ni > Cr.

Le plomb des sols est-il d'origine naturelle ou lies aux activités humaines ?

Les isotopes du plomb permettent de connaître de quelle source vient le plomb présent dans le sol (figure 7). En particulier la mise en relation des rapports entre deux isotopes permet de distinguer de façon significative le plomb des matériaux de celui des écosystèmes. Ainsi, le plomb des essences présente un rapport isotopique caractéristique de son minerai d'origine qui diffère généralement fortement du matériau local. Dans les sols des Ardennes (EPC08) et des Alpes

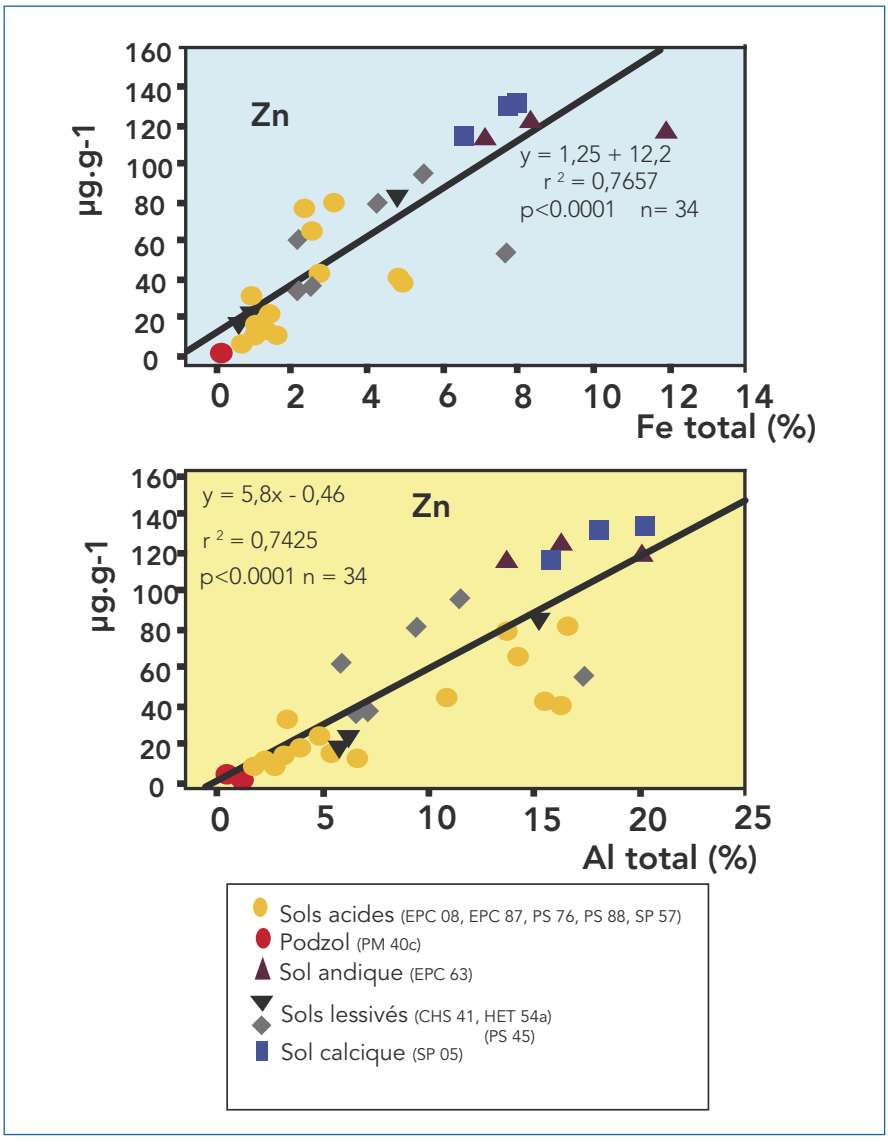


Fig.5 : relation entre la concentration en zinc (Zn) et la teneur relative en fer total (Fe) (en haut) et entre la concentration en Zn et la teneur relative en aluminium total (Al) (en bas) dans les différents sols étudiés du réseau RENECOFOR

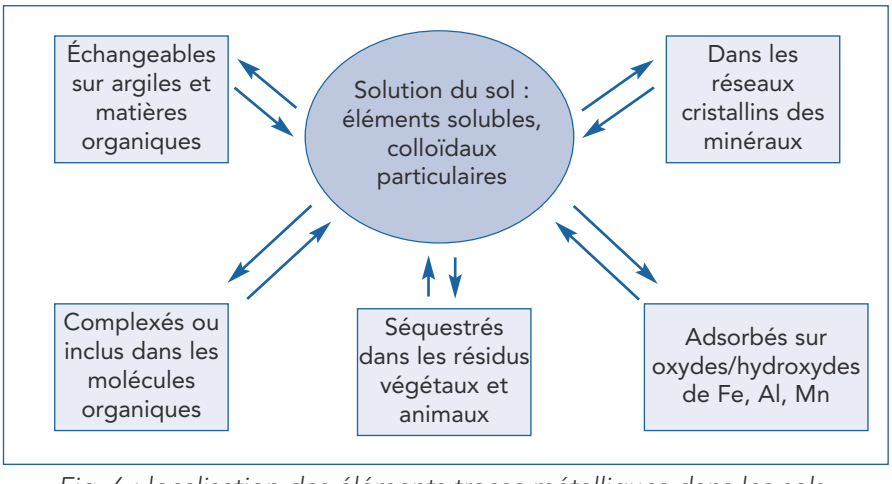


Fig. 6 : localisation des éléments traces métalliques dans les sols (d'après Baize, 1997)

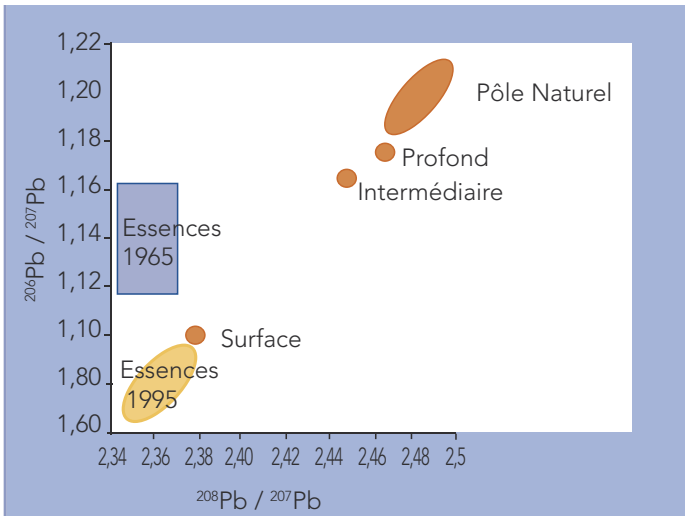


Fig. 7 : diagramme isotopique du plomb $^{206}Pb/^{207}Pb$ contre $^{208}Pb/^{207}Pb$ dans les échantillons de sol (fraction < 2 mm) des horizons de surface, intermédiaire et de profondeur de la placette EPC08 ; comparaison avec les valeurs du pôle naturel et du plomb des essences des périodes 1965 et 1995

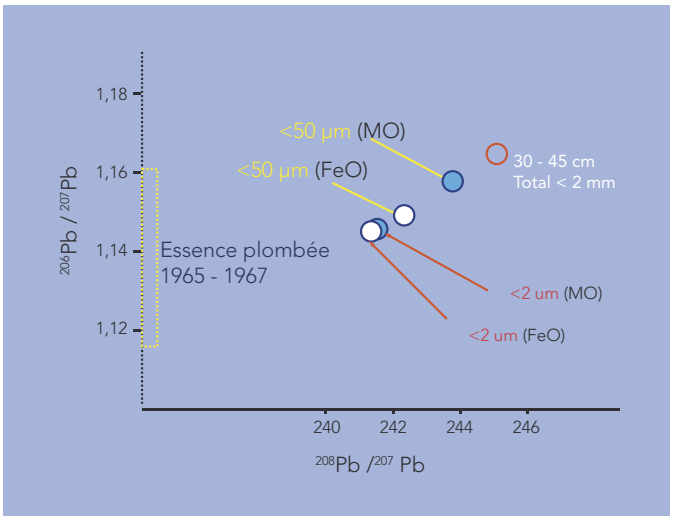


Fig. 8 : diagramme isotopique du plomb $^{206}Pb/^{207}Pb$ contre $^{208}Pb/^{207}Pb$ dans l'échantillon total (fraction du sol tamisé < 2 mm), et dans les fractions < 2 µm et < 50 µm de l'horizon intermédiaire (30-45 cm) du sol EPC 08

La signature isotopique du plomb associé à la matière organique et aux oxydes de fer a été déterminée dans chaque fraction fine (< 2 µm et < 50 µm) du sol.

(SP05), les isotopes du plomb ont permis de montrer l'importance du plomb atmosphérique provenant des carburants (essences) par rapport au plomb naturel ou à celui venant d'émissions industrielles locales et régionales. La part du plomb des essences a été estimée à 83, 30 et 11 % du plomb total, respectivement en allant de la surface à la profondeur dans le sol des Ardennes, et à 68 % en surface dans le sol des Alpes.

Dans l'horizon intermédiaire du sol des Ardennes (EPC08), les signatures isotopiques montrent (figure 8) que c'est la fraction la plus fine (argiles granulométriques < 2 µm) qui contient le plus de plomb issu des carburants. Dans chaque fraction fine, les isotopes du plomb montrent que ce sont les oxydes de fer (FeO) qui contiennent plus de plomb anthropique (ils sont plus proches de la signature du plomb des essences), par comparaison à la matière organique (MO).

L'origine plus ou moins ancienne du plomb des carburants a ainsi pu être montrée au sein des profils, révélant une migration du plomb apporté par voie atmosphérique au sein des sols (figures 6 et 7), en association avec les fractions fines, les oxydes de fer ou la matière organique (figure 8).

Conclusion

Les sols forestiers ne sont pas « pollués » en métaux, car les teneurs restent dans la gamme des sols peu pollués, mais ils sont plus ou moins « contaminés » par des apports atmosphériques non naturels selon leur localisation et selon l'élément (Pb, Cd notamment), surtout en surface. Malgré la diminution des émissions pour certains métaux, la contamination persiste pendant des décennies. Les métaux apportés peuvent migrer dans les sols et leur devenir dépend du type de sol et de ses composantes. Même si les teneurs ne sont pas toujours « anormales », c'est la disponibilité des métaux qui compte dans les sols et qui peut entraîner des désordres fonctionnels pour la forêt, notamment dans la chaîne alimentaire.

Il reste actuellement important d'étudier les risques liés à cette contamination sur les organismes vivant dans ces sols en lien avec la disponibilité des métaux (passage solide/solution), pour évaluer l'impact sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (thèse Gandois, en cours). Comme pour d'autres contaminants, l'objectif est aussi de pouvoir calculer des charges critiques en métaux pour assurer à long terme une protection des sols forestiers vis-à-vis des retombées atmosphériques. Ces charges critiques devront *in fine* conduire à des réductions d'émissions.

Anne PROBST
Laura HERNANDEZ
Jean-Luc PROBST
ECOLAB, Laboratoire d'Écologie Fonctionnelle
CNRS, Université de Toulouse.
anne.probst@ensat.fr
jean-luc.probst@ensat.fr

Les auteurs remercient très chaleureusement Étienne Dambrine d'avoir exposé ces résultats au pied levé à la place d'Anne Probst qui avait alors à faire face à un grave problème de santé dans sa famille.

Références disponibles auprès des auteurs

Contribution du réseau à la compréhension des effets de l'ozone en forêt et sur la végétation de clairière

La problématique générale de l'ozone, de l'observation des symptômes foliaires sur le terrain et de leur validation microscopique ainsi que les concentrations d'ozone mesurées sur 26 sites du réseau RENECOFOR ont été présentées dans les n° 9 et 10 des Rendez-vous techniques. Les concentrations d'ozone ont montré des différences régionales, avec des dépassements à long terme sur 21 sites et avec les niveaux les plus importants dans le centre et le sud, en particularité le sud-est de la France.

Bref rappel

Au cours des dernières décennies, l'augmentation des concentrations d'ozone troposphérique s'est confirmée dans l'hémisphère nord. Rappelons que la formation de l'ozone (O3), gaz à effet de serre, résulte de réactions photo-oxydantes complexes faisant intervenir, d'une part des précurseurs chimiques (polluants primaires : oxydes d'azote et composés organiques volatils) et d'autre part, l'effet des radiations UV. Dans les hautes couches de l'atmosphère (stratosphère : 20 à 25 km), l'ozone joue un rôle protecteur en filtrant les rayons ultraviolets du soleil les plus nocifs. En revanche, dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère : jusqu'à 10 km), un excès d'ozone présente des risques pour la santé humaine et l'environnement. De trop fortes concentrations en ozone peuvent entraîner des symptômes spécifiques sur la forêt et sur la végétation.

Depuis 2001, le groupe international d'études des forêts sud-européennes (GIEFS), l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL, Suisse) et l'Office national des forêts se sont associés pour répertorier d'éventuels symptômes dans 36 des 102 sites du réseau RENECOFOR.

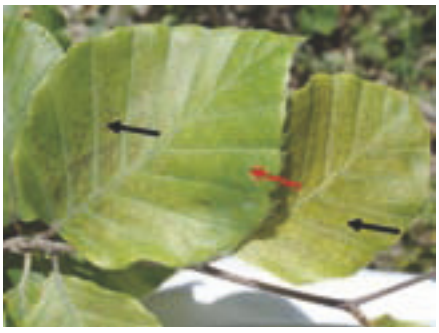
Cet article rappelle brièvement les niveaux d'ozone enregistrés en Europe et en France entre 2003 et 2005 et fournit quelques exemples d'impacts de ce polluant sur la végétation dans ou autour des placettes du réseau RENECOFOR. Après plusieurs années d'observation, sont présentés dans cet article les critères les plus simples pour l'identification des symptômes foliaires dus à l'ozone et les lésions cellulaires afférentes.

Rappel sur les niveaux de l'ozone au niveau européen et en France entre 2003 et 2005 :

D'une manière générale et en situation d'anticyclone, pendant la journée, le transport des brises chargées en polluants s'effectue depuis les plaines ou les côtes (où se trouvent les principales sources : villes, transports, industries) vers l'intérieur des terres, le long des vallées (Dalstein *et al.* 2005). Un courant de convection peut se former avec des masses d'air situées en altitude redescendant vers la plaine ou les côtes.

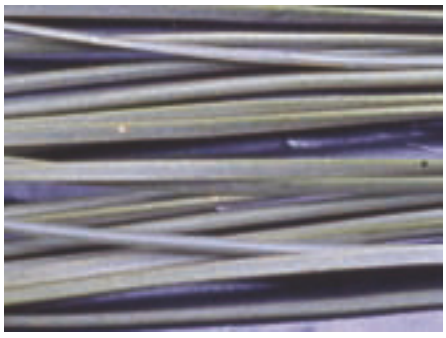
En Europe, il existe un gradient de concentration d'ozone du Nord vers le Sud, avec des valeurs plus élevées autour de la Méditerranée et en zone rurale, à quelques dizaines voire quelques centaines de kilomètres des centres urbains ou industriels.

En 2003, 67 % des stations européennes de surveillance de qualité de l'air ont présenté au moins une fois un dépassement de seuil (seuil d'information de 180 µg/m³/h, ou seuil d'alerte de 240 µg/m³ sur 3 heures ou 360 µg/m³/h) dans l'année. Il y a eu 108 jours de dépassement et la durée moyenne des dépassements a été de 4 heures. En 2004, 58 % des stations ont présenté au moins une fois un dépassement de seuil dans l'année. Il y a eu 76 jours de dépassement et la durée moyenne des dépassements a été de 2 heures. Les pays les plus concernés par ces dépassements sont situés en Europe du Sud : la France (essentiellement au sud de la latitude 45), le Portugal, l'Espagne, l'Italie, la Slovénie, la Grèce, Chypre et Malte. En 2005, c'est également en Europe du Sud que le nombre de jours de dépassement du seuil d'information de 180 µg/m³ a été le plus important (EEA 2005, EEA 2006).



1A- Hêtre, clairière placette SP 05, 2006. Marbrures typiques de couleur bronze dues à l'ozone et apparaissant entre les nervures (←). La partie ombragée de la feuille (←) ne présente pas de symptômes

1B- Charme, clairière placette PM 72, 2004. La décoloration a lieu typiquement surtout sur la face exposée à la lumière



1C- Pin maritime, PM 72, 2004. Aiguilles âgées d'un an avec marbrures caractéristiques visibles à l'œil nu

Planche 1 (source Dalstein et Vas, GIEFS)

Certains symptômes sont visibles à l'œil nu (GIEFS)

Les fortes concentrations en ozone peuvent entraîner des symptômes spécifiques sur les plantes sensibles en forêt et dans des clairières.
La forme des symptômes dus à l'ozone s'exprime de façon différente selon les espèces. Pour les feuillus, les symptômes visibles se présentent entre les nervures sous forme de marbrures de couleur bronze (caractéristique pour le hêtre, photo 1A), ou sous forme d'une décoloration de la feuille (photo 1B). Pour les aiguilles de conifères, les symptômes se présentent sous forme de marbrures (photo 1C) ou de décoloration (Dalstein et Vas, 2005).

Cependant, certaines caractéristiques des symptômes d'ozone sont communes à toutes les espèces et indépendantes des caractéristiques du site. Les symptômes apparaissent surtout sur la face exposée à la lumière (de l'arbre, des branches, des aiguilles/feuilles) et se développent entre les nervures des feuilles. La partie des feuilles étroitement recouvertes par une autre feuille ne présente pas de symptômes et l'intensité des symptômes augmente avec l'âge des feuilles ou des aiguilles. Les photos de la planche I montrent quelques exemples typiques pour le hêtre, le charme et le pin maritime.

Recherche des symptômes induits par l'ozone sur le terrain (GIEFS)

Pour chaque station de suivi, il faut distinguer deux sites selon le protocole européen du programme international concerté « Forêt » (PCC 1998). Le premier est la placette **en forêt** où 5 arbres sont choisis. Pour chaque arbre, cinq branches exposées à la lumière sont prélevées dans le tiers supérieur du houppier. Pour les feuillus, le pourcentage d'atteinte d'environ trente feuilles est noté. Pour les conifères, trente aiguilles de l'année en cours (C), d'un an (C + 1) et de deux ans (C + 2) sont examinées à la loupe et le pourcentage d'atteinte de la surface des aiguilles est estimé. Le deuxième site est une **clairière** proche de chaque placette en forêt, située dans un rayon de 3 km au maximum. Les arbres, arbustes et plantes vivaces les plus communes y sont répertoriés. Les symptômes bien marqués et repérés sont photographiés et échantillonnés pour la réalisation d'un herbier.

Dans les deux cas, les symptômes sont ensuite examinés d'une part sur herbier par les experts du centre de validation de Birmensdorf en Suisse ; d'autre part et afin d'examiner de manière plus spécifique les symptômes, quelques échantillons présentant des symptômes typiques sont prélevés dans du glutéraldéhyde et du méthanol en vue d'analyse microscopique par le même centre.

Sur certains sites, un nouveau procédé établi par le PIC Forêt en 2006 a permis de quantifier le nombre de plantes présentant d'éventuels symptômes d'ozone sur une zone géographique bien définie.

Diagnostic différentiel des symptômes visibles à l'œil nu causés par différents stress (centre de validation du WSL)

Les couleurs automnales sont connues. Pour le hêtre (photo 2A), la couleur jaune automnale débute dans la partie sommitale du houppier. L'ozone, par contre, donne au feuillage une couleur bronze qui, à la fin du mois d'août, se distingue bien de la décoloration automnale qui suivra deux mois plus tard (photo 2B). Sur une branche donnée et en fonction de l'exposition au soleil, cette teinte bronze va croissant de la pointe des accroissements longs de l'année vers la base. Cet exemple permet de documenter quelques caractéristiques utilisées en diagnostic différentiel. De manière générale, on distingue d'abord l'origine biotique ou abiotique des symptômes. En principe, toute infection biotique est distribuée de façon irrégulière sur la plante, les branches et les feuilles. Par contre, les réactions dues à des stress d'origine abiotique (anthropo-

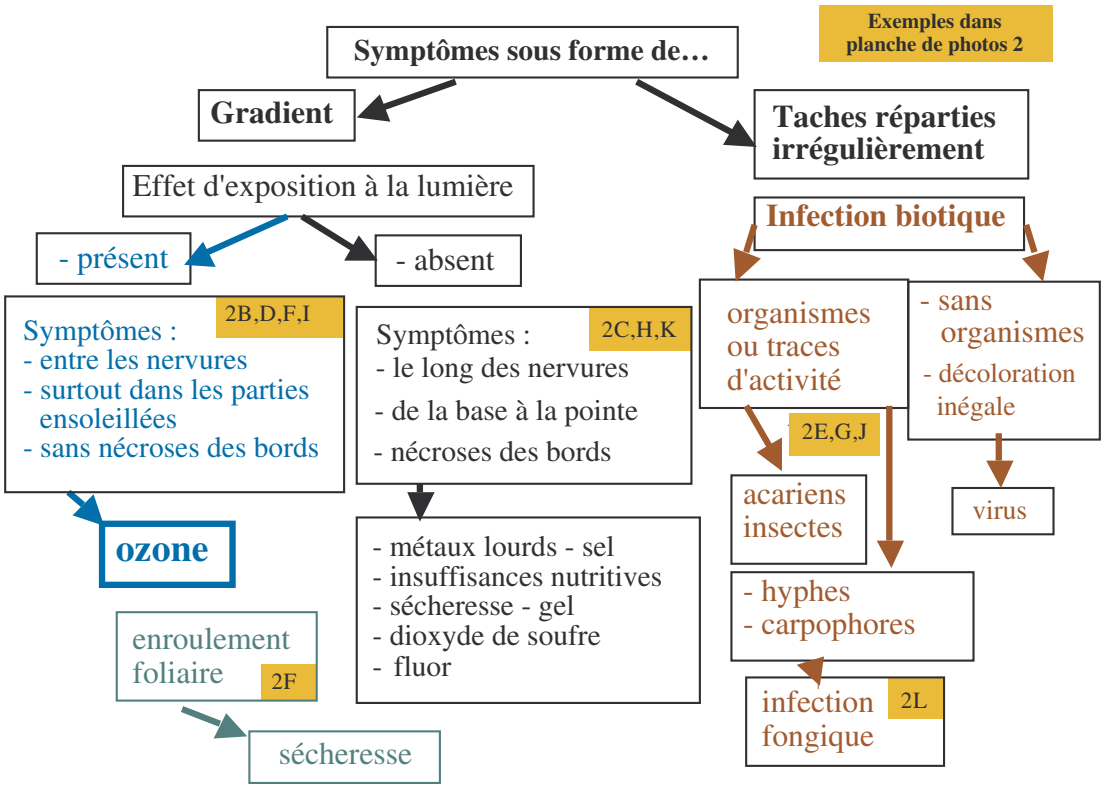


Fig. 1 : critères permettant de différencier, au niveau de la feuille, les symptômes visibles dus à l'ozone de ceux causés par d'autres facteurs de stress (les chiffres et lettres renvoient aux photos de la planche 2)

gènes, climatiques, édaphiques) sont distribuées de façon régulière et présentent des gradients. La procédure de diagnostic est schématisée dans la figure 1 (adaptée de Vollenweider et Günthardt-Goerg 2006) et illustrée dans la planche de photo 2.

Une décoloration générale de l'aiguille, ou de la feuille (rougissement ou chlorose), peut avoir pour origine différents stress et une validation en microscopie, ou avec d'autres méthodes analytiques, est nécessaire pour le diagnostic. Ce type de réaction est similaire à la sénescence automnale et est fréquemment observé chez les herbacées après la floraison. C'est pourquoi ce type de symptôme ne fournit généralement pas d'indicateurs fiables d'un stress oxydant dû à l'ozone.

Altérations structurales sous-jacentes aux symptômes foliaires d'ozone chez les feuillus

Au niveau cellulaire, les points chlorotiques entre les nervures des feuilles (lesquels sont souvent les premiers symptômes dus à l'ozone, photo 3A), sont liés à la dégénérescence des chloroplastes qui, ensemble avec une condensation du noyau cellulaire et une augmentation du volume de la vacuole, indique une sénescence cellulaire accélérée (photo 3B). Les marbrures de couleur bronze entre les nervures des feuilles (photos 3A, D, F) s'expliquent quant à elles par une augmentation de la concentration des tannins dans les tissus assimilateurs (photos 3B, C, E). L'ozone déclenche aussi des réactions hypersensibles dans la feuille sous la forme d'une mort subite de groupes de cellules assimilatrices (photo 3G). Il s'agit d'un processus de défense sous contrôle génétique (pour plus de détails, voir les articles Vollenweider *et al.* 2003 et Günthardt-Goerg and Vollenweider 2007).

Altérations structurales sous-jacentes aux symptômes d'ozone dans les aiguilles des conifères

La marbrure, ou la décoloration (photo 4A), des aiguilles sont causées par la sénescence accélérée des cellules assimilatrices similaire à celle observée chez les feuillus. Cependant pour les aiguilles (photos 4A, B, C), la dégénération des cellules assimilatrices est également plus avancée pour celles dont la face est exposée à la lumière (photos 4A, B, C) et ce dans les couches extérieures du mésophylle, comme déjà observé chez les feuillus (photo 3B, G). Le cylindre central, contenant les tissus conducteurs, ne montre généralement pas d'altération structurale. La dégénérescence cellulaire augmente avec l'âge des aiguilles, d'année en année. Au niveau des chloroplastes, on observe une perte de l'autofluorescence sous illumination UV (photos 5B/5A) particulièrement dans les cellules les plus exposées à la lumière et situées dans la partie extérieure de l'aiguille. Comme chez les feuillus, les symptômes chloroplastiques de sénescence accélérée s'accompagnent aussi d'une condensation des noyaux, (forme rétrécie et irrégulière), d'absence de grains d'amidon dans les chloroplastes, ainsi que d'une augmentation du volume de la vacuole et de la concentration des tannins condensés

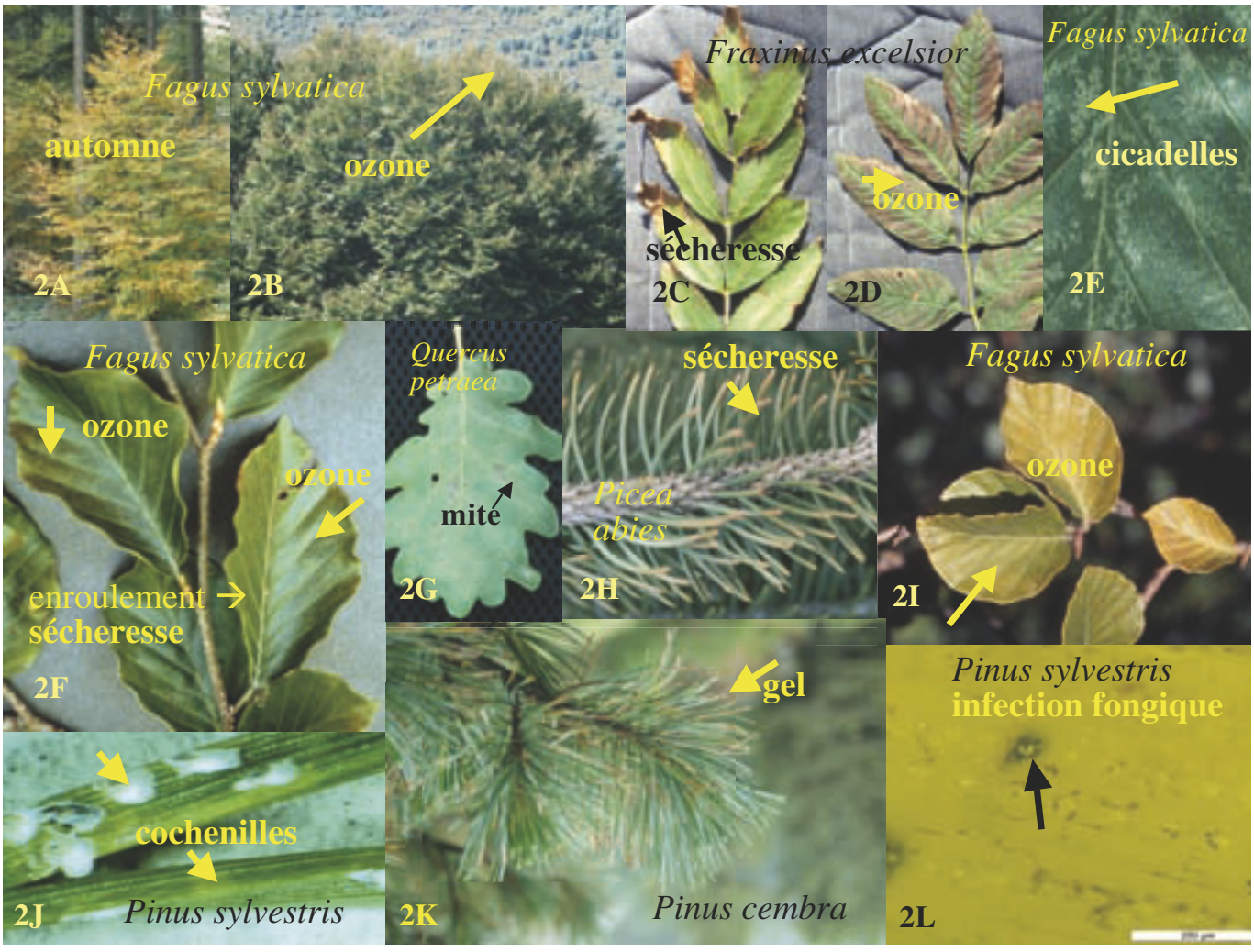


Planche 2 (source des photos 2C et 2D : Dittmar et al. 2004, source de la photo 2I : Dalstein et Vas, GIEFS, les autres Günthardt-Goerg et Vollenweider)

(photos 5D/5C). Pour plus de détails, voir également les articles de Dalstein *et al.* 2002, Vollenweider *et al.* 2003, et Günthardt-Goerg et Vollenweider 2007.

Résultat synthétique

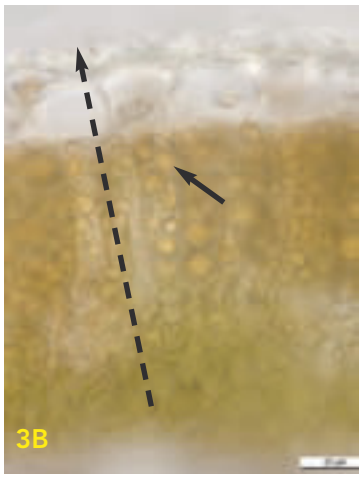
De 2001 à 2006, sur 11 placettes, 20 à 62 % des espèces arbustives et arborescentes présentaient des symptômes dus à l'ozone (figure 2, en rouge) contre 4 à 18 % sur 18 autres placettes (en turquoise). Les espèces suivantes en présentaient le plus fréquemment : hêtre, pin, noisetier, sorbier, charme, saule et frêne. Sur 7 placettes aucune espèce ne montra de symptôme confirmé dû à l'ozone (figure 2, en vert). La répartition géographique des régions où les effets de l'ozone ont été observés (surtout au centre et sud (-est) de la France) correspondait aux fortes concentrations d'ozone mesurées sur le terrain. Les espèces touchées, et l'intensité des symptômes dus à l'ozone sur les placettes observées pendant plusieurs années ont changé d'une année à l'autre (figure 2, double couleur), en accord avec la variabilité des conditions météorologiques et le niveau des concentrations d'ozone : HET 30 2001 > 2005 > 2004 ; PL 20 2001 > 2004 ; PM 72, PM 17 et PM 85 2002 > 2004 ; PS67a 2002 > 2004 et 2005 ; HET 54a 2004 > 2005. Malheureusement, en 2003, année exceptionnellement chaude et sèche, seul un nombre restreint de placettes a pu être inventorié.

La fréquence des symptômes dus à l'ozone par espèce était logiquement dépendante de leur sensibilité (à l'ozone) et de leur répartition géographique et ce dans l'ordre : hêtre > pin maritime > noisetier > pin sylvestre > sorbier des oiseleurs = charme.

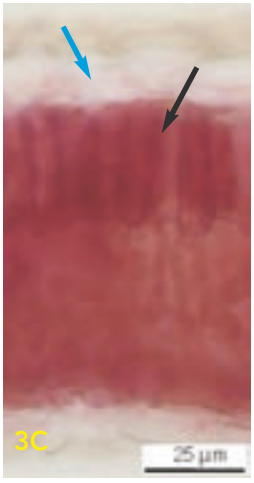
Conclusion

Sur l'ensemble des placettes RENECOFOR, les pinèdes et les hêtraies sont les plus concernées par les symptômes d'ozone. Les zones de clairières les plus touchées se situent dans le Cantal (PS15), la Sarthe (PM72) et le Gard (HET 30). Parmi les essences les plus sensibles, se retrouvent les pins, les hêtres, les saules, les frênes, les charmes, les sorbiers et les noisetiers.

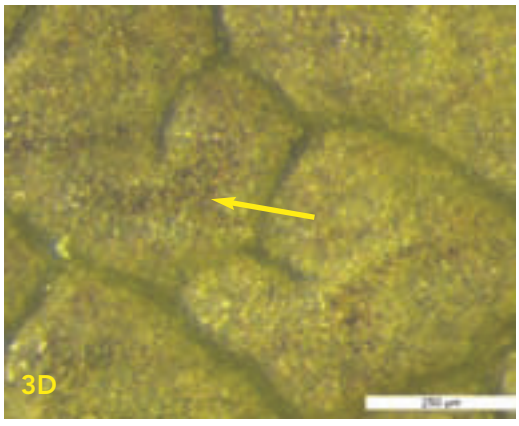
Saule marsault (Salix capraea L.), zone de clairière de la placette PS15, forêt sectionale de Paulhac (Cantal), 2004. Décoloration foliaire (chlorose/bronzage, flèche jaune), face supérieure d'une feuille vue sous la loupe.



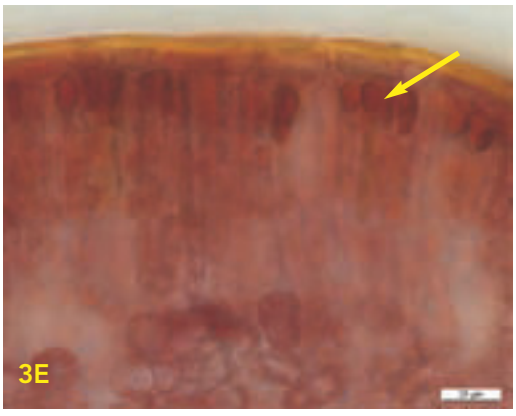
Même échantillon que 3A, en coupe transversale à la main. Sénescence cellulaire accélérée : (→) indiquée par une accumulation de tannins (boulettes couleur bronze), et par la disparition de la couleur verte de l'intérieur à extérieur de la feuille (- - ->) signalant une dégradation de la chlorophylle.



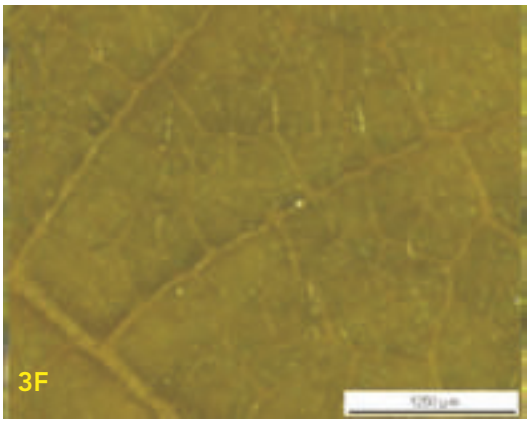
Même préparation que 3B mais avec une mise en évidence des tannins condensés (rouge) ; ces derniers sont en augmentation dans les cellules assimilatrices les plus exposées à la lumière (→). Une telle réaction est presque absente dans l'épiderme (→).



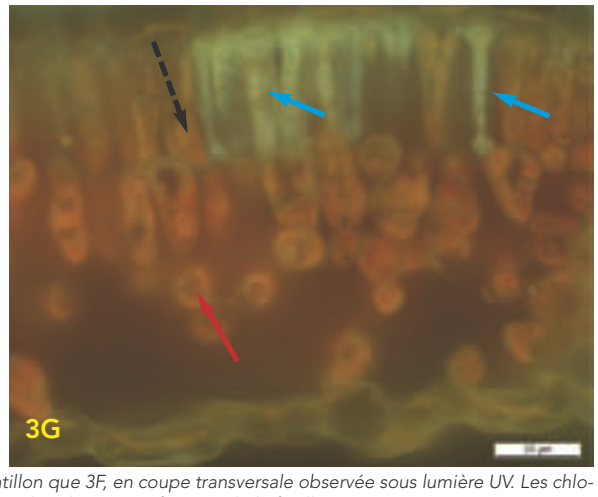
Hêtre (Fagus sylvatica L.), placette HET30, forêt domaniale de l'Aigoual (Gard), 2006. Face supérieure d'une feuille avec des marbrures de couleur bronze dues à l'ozone (flèche jaune), vues sous la loupe.



Même échantillon que 3D, en coupe transversale avec mise en évidence des tannins condensés (rouge). Ces substances forment des précipités insolubles oxydés (de couleur foncée) dans la partie apicale des cellules assimilatrices, juste en dessous de l'épiderme supérieur (flèche jaune).

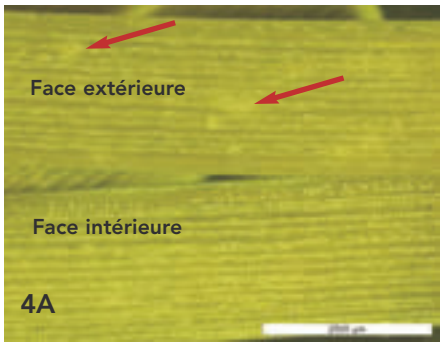


Noisetier (Corylus avellana L.), zone de clairière de la placette PS15, forêt sectionale de Paulhac (Cantal), 2006. Décoloration foliaire (chlorose/bronzage) vue sous la loupe.

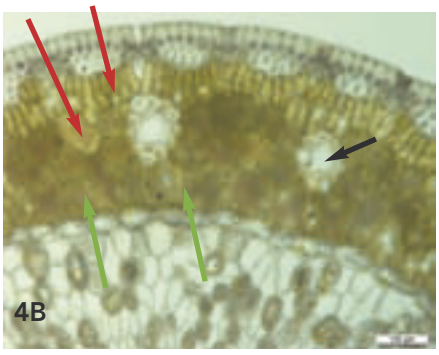


Même échantillon que 3F, en coupe transversale observée sous lumière UV. Les chloroplastes sains dans la partie inférieure de la feuille apparaissent en rouge (→). Des groupes de cellules assimilatrices dans la partie supérieure ont subi une mort rapide indiquée par un collapsus des parois cellulaires, ainsi qu'une fragmentation, une condensation et une oxydation (autofluorescence bleu-vert) du contenu cellulaire (→). Les cellules voisines sont en phase de sénescence accélérée (--->).

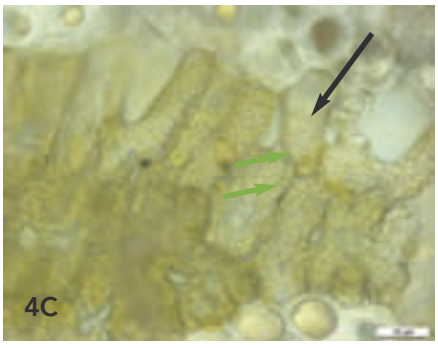
Planche 3 (source : Günthardt-Goerg et Vollenweider)



Pin maritime (Pinus pinaster Solander, synonyme Pinus maritima Poir.), placette PM72, forêt domaniale de Bercé (Sarthe), 2004. Chez les pins, les marbrures chlorotiques (→) sont plus marquées sur les parties ensoleillées de l'aiguille (face extérieure d'une aiguille dans la touffe).

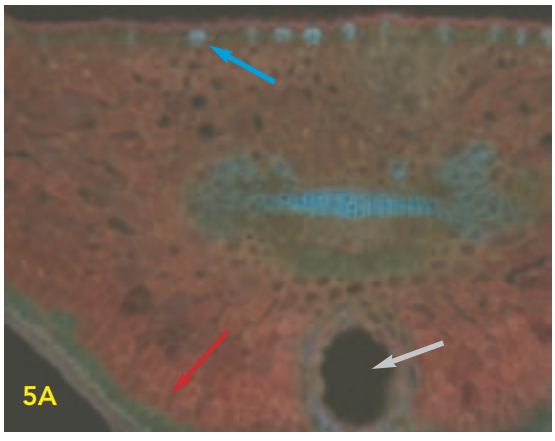


Même échantillon que 4A, en coupe transversale. La sénescence cellulaire accélérée des cellules assimilatrices (→) est indiquée par l'augmentation de la taille des vacuoles et la réduction de celle des chloroplastes ; le nombre de ces organelles est aussi en diminution. Les cellules situées plus profondément dans l'aiguille (→) ne montrent pas de telles altérations. Canal à résine (→)

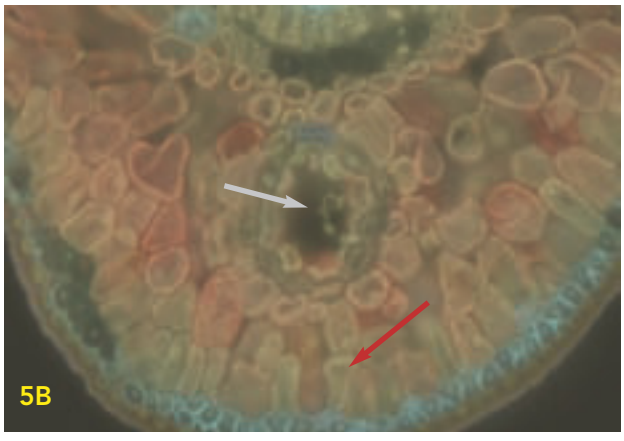


Détail de la coupe 4B. Les cellules voisines des stomates (l'appareil cellulaire responsables des échanges gazeux) ont des vacuoles agrandies (→) et des chloroplastes (→) dont la coloration jaune vert indique une diminution de la concentration de la chlorophylle.

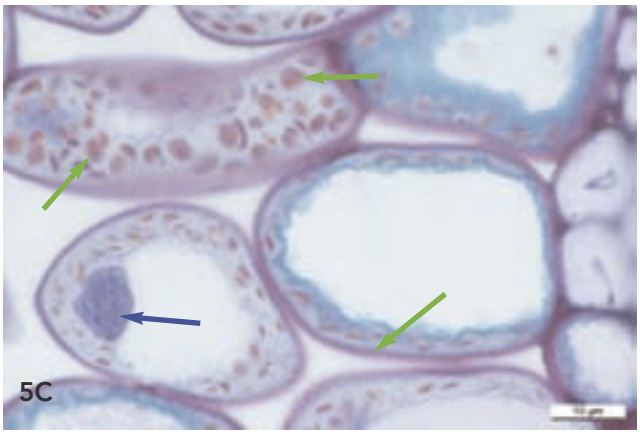
Planche 4 (source : Günthardt-Goerg et Vollenweider)



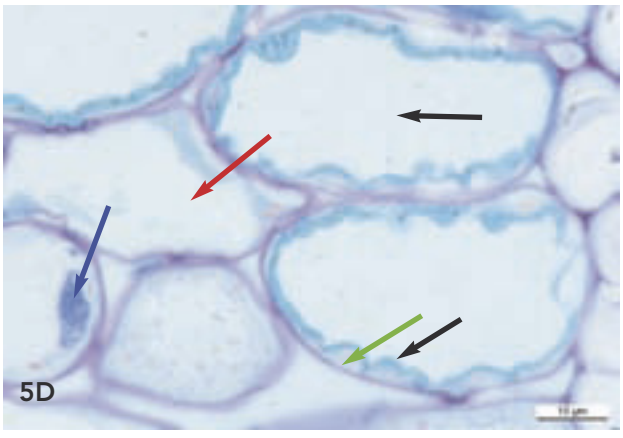
Genévrier rampant (Juniperus horizontalis Moench) placette PS 04, forêt communale du Fugeret, 2006. Aiguille sans symptômes, avec une autofluorescence de couleur rouge de la chlorophylle sous illumination UV (→), qui atteint son maximum dans la partie bombée de l'aiguille. Dans cette espèce, l'ensemble des stomates est concentré sur une seule face de l'aiguille (→). Canal à résine (→).



Aiguille provenant du même arbre que 5A, mais échantillonnée sur la face de l'arbre directement exposée au soleil et présentant des symptômes visibles. Une dégradation partielle de la chlorophylle dans les chloroplastes est indiquée par une diminution de l'autofluorescence en rouge sous illumination UV (→). Canal de résine (→).



Même échantillon que 5A sous fort grossissement et après coloration. Dans les cellules assimilatrices, le noyau est peu condensé (→) et de nombreux chloroplastes contiennent des grains d'amidon (produit de la photosynthèse (→).



Même échantillon que 5B et préparation comme 5C. Le noyau est condensé (→), les chloroplastes sont plus petits, moins nombreux et contiennent moins d'amidon (→) que dans 5C. Le volume vacuolaire (→) est généralement plus important. Une couche de tannins condensés (ligne bleue →) borde la vacuole et recouvre les chloroplastes comme en hiver. Remarquer les cellules pratiquement dépourvues d'organites (dégénérescence cellulaire terminale →).

Planche 5 (source : Günthardt-Goerg et Vollenweider)

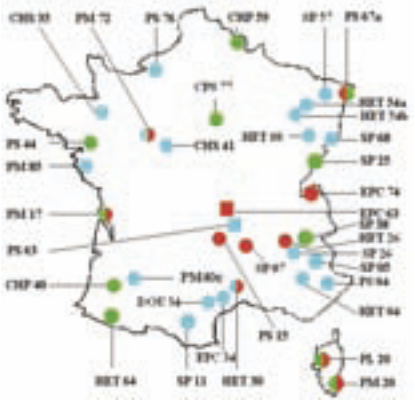


Fig. 2 : les 36 sites RENECOFOR dont les espèces ont été inventoriées par le GIEFS sur les clairières, pour les symptômes d'ozone avec confirmation par le centre de validation de l'institut WSL en Suisse (à l'exception des sites représentés par un carré)

Rouge = symptômes sur 20 à 62 % des espèces
Turquoise = symptômes sur 4 — 18 %
Vert = pas de symptômes
Des différences d'une année à l'autre sont indiquées par une double couleur.

Compte-tenu du changement climatique mondial annoncé avec l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), l'ozone joue déjà un rôle majeur dans cette problématique et dans les années à venir, les symptômes d'ozone sur la végétation seront plus fréquents. Même s'il est vrai que chacun peut apprendre à les identifier, il faut toutefois rester prudent quant aux observations des symptômes parce que ces derniers sont souvent conjugués à des problèmes de sécheresse/gel, parasitisme ou déficience minérale.

Madeleine S. GÜNTHARDT-GOERG
Pierre VOLLENWEIDER, Terry MENARD
Centre de validation des symptômes d'ozone pour l'Europe centrale
Institut fédéral de recherches WSL,
Zürcherstrasse 111, CH-8903
Birmensdorf, Suisse
madeleine.goerg@wsl.ch
pierre.vollenweider@wsl.ch

Laurence DALSTEIN, Nicolas VAS
Groupe International d'Etudes des Forêts Sud-Européennes (GIEFS)
legiefs@aol.com

Bibliographie

DALSTEIN-RICHIER L., MANGIN A., CARRÉGA P., GUEGUEN C., VAS N., SANCHEZ O., THÉODORE B., BÉROLO W., 2005. État des forêts d'altitude en relation avec la pollution de l'air par l'ozone dans la région niçoise. Pollution Atmosphérique n° 188, pp. 503-519

DALSTEIN L., VAS N., 2005. Ozone concentrations and ozone-induced symptoms on coastal and alpine Mediterranean pines in southern France. Water, Air, and Soil Pollution 160 : pp. 181-195

DALSTEIN L., VOLLENWEIDER P., VAS N., GÜNTHARDT-GOERG M.S., 2002. L'ozone et les conifères du Sud-Est de la France. Forêt méditerranéenne XXIII, n° 2, pp. 105-116.

DITTMAR C., ELLING W., GÜNTHARDT-GOERG M.S., MAYER F.-J., GILGE S., WINKLER P., FRICKE W., 2004. Ozonsymptome an Blättern von Esche, Bergahorn und Buche am nördlichen Alpenrand in Sommer 2003. Witterungsverlauf, Ozonbelastung und Schädigungssymptome im Extremsommer 2003. AFZ 13, pp. 683-685

EEA (2005). Air pollution by ozone in Europe in summer 2004. EEA Technical report n°3/2005

EEA (2006). Air pollution by ozone in Europe in summer 2005. EEA Technical report n°3/2006

GÜNTHARDT-GOERG M.S., VOLLENWEIDER P., 2007. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees : New diagnostic perspectives. Environmental Pollution 147, pp. 467-88

PCC (Programme Co-ordinating Center), 1998. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. – Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, BFH, Hamburg, Germany

ULRICH E., 2005. Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. Office National des Forêts, ONF, Rendez-vous techniques de l'ONF n° 9, pp. 6-12

ULRICH E. CECCHINI S., DALSTEIN L., Vas, N., GÜNTHARDT-GOERG M.S., VOLLENWEIDER P., KARLSSON G.P., 2005. Concentrations d'ozone en zone forestière et symptômes d'ozone observés sur la végétation dans le réseau Renécofor. Office National des Forêts, ONF, Rendez-vous techniques de l'ONF n° 10, pp. 3-11

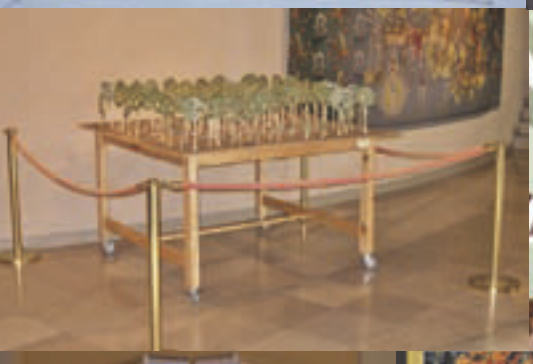
ULRICH E., DALSTEIN L., GÜNTHARDT-GOERG M.S., VOLLENWEIDER P., CECCHINI S., VAS, N., SJÖBERG K., SKARMAN T., KARLSSON G.P., 2006. RENECOFOR - Effets de l'ozone sur la végétation, concentrations d'ozone (2000-2002) et symptômes d'ozone sur la végétation forestière (2001-2003). Fontainebleau : ONF. 126 p.

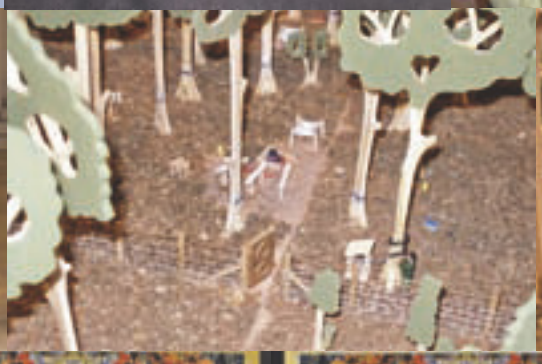
VOLLENWEIDER P., OTTIGER M., GÜNTHARDT-GOERG M.S., 2003. Validation of leaf ozone symptoms in natural vegetation using microscopical methods. Environmental Pollution vol. 124 n°1, pp. 101-118

VOLLENWEIDER P., GÜNTHARDT-GOERG M.S., 2006. Diagnosis of abiotic and biotic stress factors using the visible symptoms in the foliage. Environmental Pollution vol. 140 n°3, pp. 562-571

PALAIS DES CONGRÈS BEAUNE
15 ANS DE SUIVI DES
ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

15
ANS
RENECOFOR
9-11 MAI 2007 BEAUNE





15 ANS DE SUIVI DES
ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS
AUDITORIUM

La flore dans le réseau RENECOFOR : avancées méthodologiques et premières tendances sur 10 ans

La flore forestière constitue un élément clé des écosystèmes forestiers, mais son évolution temporelle est très mal connue. Le réseau RENECOFOR a permis de faire progresser les connaissances sur le plan méthodologique (mesure de l'influence des botanistes sur la qualité des relevés) et les premières analyses écologiques suggèrent des changements de la composition des communautés végétales entre 1995 et 2005, notamment en rapport avec les dépôts azotés et les grands herbivores. Cependant, il est indispensable de continuer le suivi pour confirmer ces premières tendances.

Repères*

- **Flore forestière** : la flore forestière (définie comme l'ensemble des espèces susceptibles d'être rencontrées en forêt) représente le quart environ de la flore française (soit environ 1500 espèces sur 6000 ; sans compter les mousses et fougères). Les arbres et arbustes représentent moins de 9 % de cette flore forestière.
- **Mutualisme** : relation entre individus d'espèces différentes, qui se rendent des services réciproques mais qui pourraient vivre l'un sans l'autre.
- **Nitrophilie** : préférence d'un plante pour les sols riches en azote.
- **Richesse spécifique** : nombre d'espèces rencontrées dans une bande ou une placette du réseau
- **Taux d'identification incomplète ou fausse** : rapport du nombre d'espèces identifiées par l'équipe au genre seulement (par exemple *Quercus* au lieu de *Quercus robur*) ou mal identifiées (par exemple *Quercus petraea* au lieu de *Quercus robur*) sur le nombre total d'espèces.
- **Taux de non-détection** : rapport du nombre d'espèces vues par l'équipe sur le nombre total d'espèces identifiées par l'ensemble des équipes lors de l'inter-calibration

Pourquoi s'intéresser à la flore forestière et à son évolution temporelle ?

La flore est traditionnellement utilisée par les forestiers pour définir et cartographier les stations forestières. La flore herbacée constitue une composante majeure de la diversité forestière, d'une diversité bien supérieure à celle des arbres (voir « flore forestière »*, en encadré). En outre, elle est à la base de nombreuses interactions biotiques (herbivorie, mutualisme*). Certaines des espèces forestières sont menacées par l'activité humaine. La flore est également un bio-indicateur des changements environnementaux (changement climatique, dépôts atmosphériques).

Faute de suivi, nous ne connaissons pas les évolutions récentes de la flore forestière à l'échelle nationale alors que les pratiques de gestion, les effectifs des grands herbivores, les dépôts atmosphériques et le climat ont notablement évolué depuis quelques décennies.

Le dispositif de suivi de la flore

La flore est suivie depuis 1995 sur les 102 sites du réseau RENECOFOR. Dans chaque site, 8 bandes non contiguës de 2 x 50 mètres ont été matérialisées : quatre à l'intérieur de l'enclos central (0,5 hectare) et quatre à l'extérieur (figure 1). Ces bandes sont échantillonnées tous les 5 ans, au moins une fois au printemps et une fois en été. Dans 14 sites, la flore est suivie annuellement par les mêmes équipes (dispositif Oxalis). Une dizaine d'équipes d'une à trois personnes, dont une au moins est un(e) botaniste reconnu(e), participent aux relevés quinquennaux ; certains sites ont été suivis par différentes équipes au cours du temps.

Quels problèmes rencontre-t-on dans le suivi de la flore forestière ?

La difficulté de la mise en évidence des évolutions temporelles de la flore forestière tient essentiellement à la conjonction de deux particularités de la flore dans les peuplements forestiers matures (toutes les placettes RENECOFOR sont situées dans des peuplements matures).

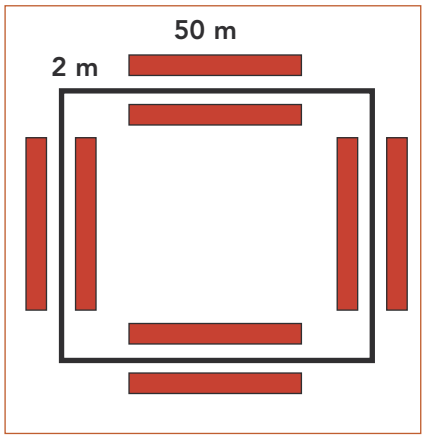


Fig. 1 : schéma du dispositif de suivi floristique sur une placette RENECOFOR

(voir schéma général d'une placette dans l'article de E. Ulrich, p. 31)

Les plantes sous couvert arboré sont généralement peu recouvrantes et ne fleurissent pas, faute de lumière. Or la fleur est souvent indispensable pour une identification certaine. Les plantes forestières sont donc difficiles à détecter et à identifier, et l'expérience du botaniste est extrêmement importante. Or il n'est pas envisageable qu'un seul botaniste (ou équipe) échantillonne toutes les placettes du réseau (de fait 10 à 11 équipes ont réalisé les relevés en 1995, 2000 et 2005) ; sur le long terme, différents botanistes se succéderont inévitablement sur les mêmes placettes. Ces différences entre observateurs, entre placettes et au cours du temps font que certains relevés sont de meilleure qualité que d'autres, ce qui risque de fausser les résultats. Par exemple, une amélioration progressive de la qualité des relevés (remplacement des équipes par d'autres plus expérimentées…) se traduira soit par une augmentation artificielle du nombre d'espèces s'il est resté stable, soit par une stabilité apparente s'il a diminué au cours du temps.

Par ailleurs, les plantes des stades forestiers matures sont essentiellement des espèces vivaces, de dynamique lente, bien que des espèces apparaissent de façon fugace. Les évolutions temporelles de la richesse spécifique de la flore forestière dans les placettes RENECOFOR seront donc probablement lentes.

Des botanistes compétents, mais certains plus que d'autres

Le nœud du problème est ainsi de devoir mettre en évidence une tendance temporelle lente avec une erreur de mesure qui ne peut pas être négligée *a priori*. Pour résoudre ce problème, un système rigoureux d'assurance qualité - contrôle qualité (AQCQ) des données floristiques a été mis en place. La procédure d'assurance qualité repose sur des journées d'intercalibration qui précèdent les relevés quinquennaux. Durant ces deux journées, toutes les équipes font des relevés de manière indépendante sur les mêmes placettes, puis y retournent pour se mettre d'accord sur la liste des espèces présentes, sur leur recouvrement et la strate à laquelle elles appartiennent (muscinale, herbacée, arbustive basse, arbustive haute, arborée). Ces journées d'intercalibration permettent aux équipes de calibrer leurs notations et d'estimer leur niveau d'erreur. La procédure de contrôle qualité repose sur des visites de contrôle croisées entre équipes pendant la campagne quinquennale, chaque équipe visitant une placette du réseau peu de temps après une première équipe.

Ce système d'AQCQ a mis en évidence le fait que les équipes ratent entre 10 et 30 % des plantes et identifient au genre seulement ou se trompent sur l'identité de 5 à 10 % des plantes détectées (figure 2). En outre, il semble que les équipes qui tendent à détecter moins d'espèces, tendent également à identifier au genre ou à se tromper sur l'identité des plantes plus fréquemment. Enfin, les estimations visuelles des recouvrements par espèce ou par strate varient sensiblement entre équipes. Cet effet « équipe » s'explique par des différences d'effectif (1 à 3 personnes), d'expérience et d'entraînement ; la fatigue influence également la qualité des relevés.

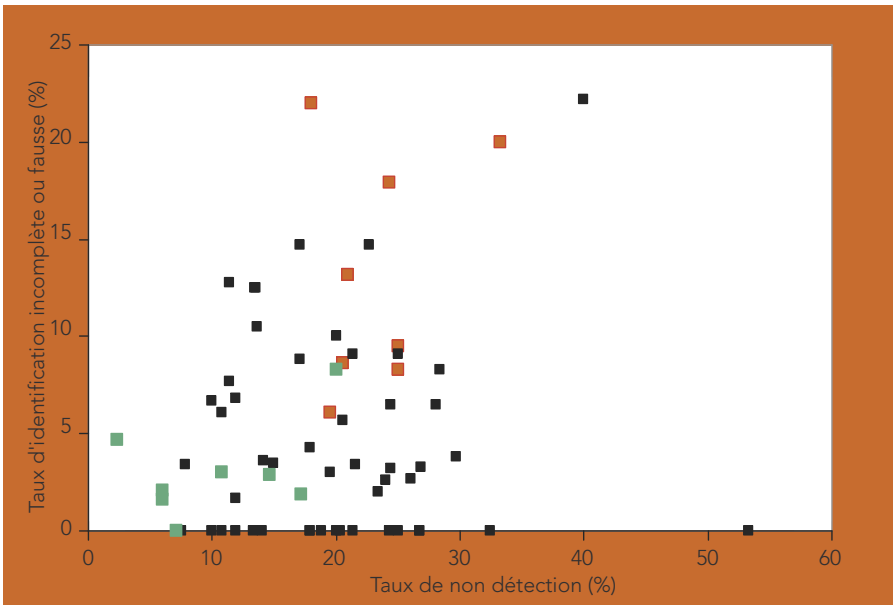


Fig. 2 : taux d'identification incomplète (au genre) ou fausse et taux de non-détection* (voir définitions en encadré)*

Chaque point correspond à un relevé (une équipe, une bande). En vert et rouge, deux équipes, montrant que l'équipe verte détecte en moyenne plus d'espèces et les identifie mieux que l'équipe rouge

Des variations limitées de la richesse spécifique des placettes d'une année à l'autre

Les données sont en cours d'analyse et les résultats présentés ci-dessous seront affinés ultérieurement. Le dispositif Oxalis a mis en évidence que jusqu'à cinq années sont nécessaires pour dresser une liste quasi exhaustive des espèces présentes ; passée cette étape d'apprentissage, la richesse spécifique floristique évolue peu d'une année sur l'autre, même après de fortes perturbations. Ainsi, la sécheresse/canicule 2003 a eu certes un impact négatif immédiat sur la flore herbacée (forte réduction du recouvrement herbacé) mais peu de répercussions à plus long terme, puisque la richesse spécifique est restée stable de 2002 à 2004 (voir RDV techniques n° 11, p. 43).

Des modifications de la structure des peuplements et des communautés végétales

Parmi les 102 sites du réseau, 87 ont été suivis intégralement de 1995 à 2005 (la flore n'a pas pu être suivie en 2000 dans les sites les plus touchés par les tempêtes de 1999).

En moyenne, le nombre de tiges a progressivement diminué en 10 ans mais pas la surface terrière. Entre 2000 et 2005, le recouvrement des strates arborée et herbacée a diminué, tandis que celui des strates arbustives hautes et basses a augmenté ; seul le recouvrement de la strate muscinale est resté stable. La diversité floristique a augmenté au cours du temps (tant à l'échelle du réseau que des sites) ; cependant, il reste à évaluer l'importance de l'apprentissage et du remplacement de plusieurs équipes au cours du temps dans cette évolution. Des indices écologiques basés sur des valeurs moyennes sont probablement moins susceptibles d'être affectés par l'effet « équipe ». Ces indices montrent un glissement progressif de la composition de la flore au profit d'espèces plus nitrophiles* et plus atlantiques.

V. Boulanger, Cemagref

Placette CHS 57a (forêt d'Amélécourt) : recouvrement et floraison plus importants de l'anémone sylvie dans l'enclos (à droite).
Les grands herbivores attaquent préférentiellement les fleurs de l'anémone.

L'impact des grands herbivores sur la flore forestière

Dans chaque site, l'enclos central et l'exclos (bande de 30 mètres autour de l'enclos) sont échantillonnés par la même équipe à chaque passage : la comparaison entre enclos et exclos est donc en théorie peu affectée par l'effet « équipe ».

L'accroissement du recouvrement de la strate arbustive basse et la diminution de celui de la strate herbacée sont plus marqués dans les enclos qu'en dehors. La ronce profite particulièrement de la mise en défens (voir aussi en photo l'exemple de l'anémone sylvie). Probablement en conséquence de l'accroissement de la ronce dans les enclos, plusieurs espèces de la strate herbacée ont progressivement diminué en fréquence ou en recouvrement (respectivement *Atrichum undulatum*, *Moehringia trinervia*, *Hyperichum pulchrum*, *Lapsana communis* et *Dicranella heteromalla*, *Ajuga reptans*, *Holcus mollis*, *Galium odoratum* et G. *rotundifolium*) alors qu'elles sont restées stables ou se sont étendues à l'extérieur des enclos. Au final, l'écart de richesse spécifique entre enclos et exclos, qui était presque nul en 1995, s'est progressivement accentué avec une plus forte diversité à l'extérieur de l'enclos (figure 3 page suivante).

Par ailleurs, la végétation herbacée à l'extérieur de l'enclos montre un développement moindre au printemps en 2005 par rapport à 2000 (diminution du recouvrement moyen printanier à l'extérieur de l'enclos seulement), probablement du fait de l'abroutissement par les grands herbivores ; cette différence enclos/exclos n'est plus visible à l'été 2005.

La nécessité de poursuivre le programme à plus long terme

En dépit de difficultés méthodologiques, l'analyse des relevés floristiques révèle des évolutions qui

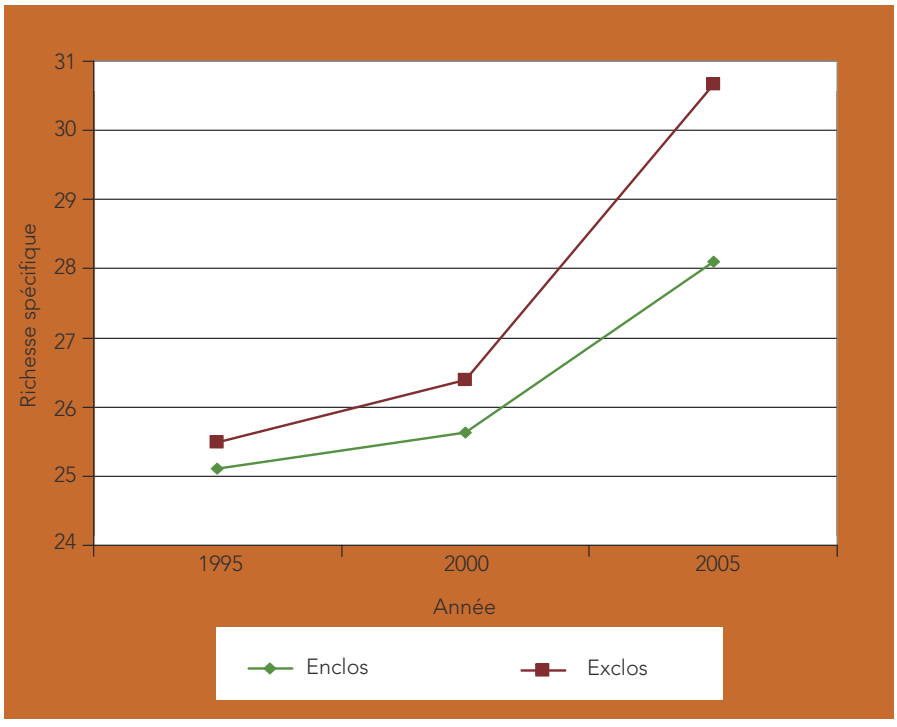


Fig. 3 : évolution de la richesse spécifique moyenne (= nombre moyen d'espèces) par bande entre enclos et exclos de 1995 à 2005, dans 87 placettes du réseau

résultent à la fois de la dynamique des peuplements et de la pression d'herbivorie exercée par les grands mammifères. Des tendances liées aux dépôts atmosphériques et au changement climatique apparaissent mais sont encore trop ténues pour être interprétées sans ambiguïté. Des analyses plus fines, intégrant au mieux les effets observateurs, et la poursuite à long terme du programme sont nécessaires pour mieux estimer la part relative de ces différents facteurs.

Les participants du réseau : Laurence Bourjot, Alain Brêthes, Sylvaine Camaret, Richard Chevalier, Patrick Coquillard, Emmanuel Corcket, Gilles Corriol, Jean-François Dobremez, Yann Dumas, Gérard Dumé, Marie Forêt, Françoise Forgeard, Myriam Lebret Gallet, Christian Gauberville, Josée Gueugnot, Jean-François Picard, Franck Richard, Jean-Marie Savoie, Aimé Schmitt, Laurent Seytre, Jean Timbal, Jean Touffet, Michèle Trémolières, Erwin Ulrich

Frédéric ARCHAUX
Équipe biodiversité
Cemagref Nogent-sur-Vernisson
frederic.archaux@cemagref.fr

Jean-Luc DUPOUEY
Patricia HEUZÉ
Unité d'écologie forestière et d'écophysiologie
INRA Nancy
dupouey@nancy.inra.fr

Bibliographie

CAMARET S., BOURJOT L., DOBREMEZ J.-F. (coordinateurs), 2004. RENECOFOR - Suivi de la composition floristique des placettes du réseau (1994/95-2000) et élaboration d'un programme d'assurance qualité intensif. Fontainebleau : ONF. 86 p.

DOBREMEZ J.-F., CAMARET S., BOURJOT L., ULRICH E., BRÊTHES A., COQUILLARD P., DUMÉ G., DUPOUEY J.-L., FORGEARD F., GAUBERVILLE C., GUEUGNOT J., PICARD J.-F., SAVOIE J.-M., SCHMITT A., TIMBAL J., TOUFFET J., TRÉMOLIÈRES M., 1997. RENECOFOR - Inventaire et interprétation de la composition floristique des 101 peuplements - campagne 1994/95. Fontainebleau : ONF. 513 p.

THIMONIER A., DUPOUEY J.L., BOST F., BECKER M., 1994. Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. New Phytologist n°126, pp. 533-539

Suivi de la flore fongique : une énorme diversité difficile à mesurer Partenariat avec les sociétés mycologiques de France

La « fonge » (communément désignée sous le terme de « flore fongique ») constitue une des composantes les plus riches de la diversité biologique forestière. En effet, selon certaines études britanniques récentes, le rapport de diversité entre champignons et végétaux supérieurs s'échelonnerait de 3,5 : 1 (3,5 espèces fongiques pour une espèce végétale) à 8,4 : 1, selon les auteurs et les régions où le calcul a été entrepris (Roberts et Spooner, 1999). Il ne s'agit que d'une extrapolation très approximative mais, quoi qu'il en soit, on peut être certain de la supériorité numérique des champignons sur les plantes, dans un environnement donné. La forêt, particulièrement riche en niches favorables au développement fongique, se situe très vraisemblablement dans des valeurs élevées de cette fourchette du rapport de diversité.

Malgré cela, **l'évaluation de cette diversité fongique est très difficile**. Plusieurs raisons, inhérentes à la science mycologique et à l'objet de son étude, expliquent cette difficulté. Dans un milieu donné, les espèces fongiques ne sont visibles, par la production des sporophores (ou carpophores), que durant une période courte de l'année (parfois seulement quelques heures, d'où la probabilité quasiment nulle d'une observation effective par un récolteur compétent passant au bon moment au bon endroit !). Encore faut-il que ces sporophores soient eux-mêmes visibles. En effet, l'existence de sporophores ne concerne qu'une faible proportion de la fonge (certains champignons sont dépourvus de cette particularité et restent toujours cryptiques). Par ailleurs, certaines espèces produisant des sporophores macroscopiques réalisent cette étape de leur cycle de manière hypogée. Par ailleurs, la production de sporophores dépend des facteurs climatiques et météorologiques, d'où une forte variation interannuelle des présences observables.

Malgré ces difficultés, identifiées depuis très longtemps, les activités d'inventaire par observation directe restent quasiment le seul moyen d'accéder à cette diversité fongique. Or d'autres écueils s'ajoutent dès que l'on a récolté le matériel accessible : l'observation et la récolte des sporophores, mais surtout leur étude (macro et micro) morphologique, représentant quasiment le seul moyen d'identifier les espèces, nécessitent un apprentissage très long et difficile. Les personnes susceptibles de contribuer efficacement à un programme d'inventaire mycologique sérieux et méthodique sont rares ; la pénurie des spécialistes compétents, actuellement pointée du doigt dans tous les domaines naturalistes n'épargne pas les mycologues.

Si certaines techniques alternatives (comme l'identification moléculaire sur les mycéliums présents dans le sol) existent, il semble qu'elles ne soient pas encore tout à fait fiables (ne serait-ce que parce que les bases de données de référence sont très largement insuffisantes et entachées d'erreurs encore nombreuses) ou alors beaucoup trop lourdes et trop chères.

Activités mycologiques au sein du réseau RENECOFOR

Dans le cadre du réseau RENECOFOR, des relevés mycologiques ont été effectués sur environ 55 placettes, depuis 1996, à l'occasion de plusieurs tranches successives d'étude, de 1996 à 1998, puis de 2002 à 2007. Le pilotage de ces travaux a été réalisé par l'*Observatoire mycologique* (association loi 1901) et l'encadrement, initialement assuré par R. Courtecuisse (université de Lille 2), a été ensuite pris en charge par une équipe plus étoffée et diversifiée au fil des années. Ces activités ont mis en jeu la participation de nombreux mycologues amateurs (en particulier membres de la *Société mycologique de France* – et autres associations mycologiques).

Pour des raisons pratiques et méthodologiques, le cadre systématique des espèces relevées a été limité aux principaux groupes de champignons « supérieurs », et plus particulièrement aux Macromycètes, selon le schéma suivant :
- *Basidiomycota* :
Agaricomycetideae, *Aphyllophoromycetideae* non résupinés (polypores, clavaires, chanterelles, hydnes) et *Gasteromycetideae* épigés.
- *Ascomycota* :
Pezizales (*Pezizomycetideae* operculés).

Quantification des relevés mycologiques

Coefficient d'abondance :
1 : un sporophore isolé
2 : deux ou trois sporophores répartis sur l'ensemble de la placette
3 : quatre à dix sporophores
4 : dix à cinquante sporophores
5 : plus de cinquante sporophores

Indice de sociabilité (pour les catégories d'abondance 3, 4 et 5) **:**
i = sporophores isolés,
g = sporophores groupés en petites unités
c = sporophores en colonies ou (arcs de) cercles

Exemple :
Taxon 1 : 1
Taxon 2 : 5-g
Taxon 3 : 2
Taxon 4 : 4-i
Taxon 5 : 3-c
etc.

Ont été exclus de ces investigations les *Ascomycota* inoperculés, les *Basidiomycota* gélatineux, les *Aphyllophoromycetideae* résupinés, les *Agaricomycetideae* cyphelloïdes, etc. Ce choix représente la quasi-totalité des « champignons » accessibles sans perturber le milieu, en creusant le sol ou en déplaçant le bois mort.

Les relevés ont été quantifiés selon deux critères relatifs à l'abondance des sporophores et à leur sociabilité (voir encadré).

Lors de la première tranche d'études (1996-1998), les placettes indiquées en rouge dans la figure 1 ont été abordées. Se sont ajoutées, en 1997 : EPC74, EPC73, indiquées en jaune dans la figure 1. Hors programme, trois placettes ont été étudiées, issues de la station d'étude de l'INRA à Vauxrenard : VRX69a (Placette jeune), VRX69b (Placette moyenne), VRX69c (Placette âgée)

Cette première tranche d'études a donné lieu à plusieurs rapports et publications, compilés dans Moreau *et al.* (2001).

Une seconde tranche (années 2002-2006) a concerné davantage de placettes, indiquées en vert dans la figure 1. Comme la première phase, cette seconde tranche a donné lieu à divers documents (Corriol, 2003 ; Courtecuisse et Lécuru, 2004 ; Moreau et Corriol, 2005 ; Daillant, 2007).

Résultats en matière de biodiversité et contributions inventoriales

Grâce aux travaux menés dans le cadre du réseau, des connaissances précises des variations interannuelles et de la diversité quantitative sur les placettes concernées ont pu être acquises. Par exemple, entre 1996 et 1998, 1 114 espèces ont été notées sur 17 des placettes étudiées. En 2003, 558 espèces ont été notées sur 22 des placettes étudiées. En 2004, 1 040 espèces ont été notées sur 42 placettes (dont 522 espèces observées une seule fois).

Des nouveautés ont été identifiées à différents niveaux géographiques : départemental, régional et national (où de très nombreux apports originaux ont été effectués). De ce fait, une importante base d'informations mycologiques a été constituée, dans le cadre du programme de l'inventaire mycologique national qui s'est ainsi trouvé enrichi de manière très significative. Des taxons nouveaux pour la Science ont également été repérés et décrits, pour certains (par exemple : *Psathyrella coprinoides* – voir Delannoy *et al.*, 2002).

Enseignements méthodologiques

Un des enseignements les plus significatifs de la participation des mycologues au réseau RENECOFOR a été l'amélioration des protocoles opératoires proposés et testés. La première phase d'étude a permis de mettre en évidence de manière statistique et objective la nécessité de procéder au moins à 12 relevés répartis sur 3 ans, pour obtenir une vue significative de la fonge d'une placette.

De plus, un test d'intercalibration a eu lieu entre certains des mycologues participants aux relevés, en septembre 2004, à Bellême (Orne). Cette opération a permis de mettre en évidence des différences relativement importantes d'un observateur à l'autre, sur une même placette et au même moment. Ceci avait déjà été constaté par les collègues botanistes, ce qui confirme la difficulté des approches. Huit mycologues ont participé à ce test d'intercalibration et on a constaté, entre autres des différences de diversité observée (24 à 76 ; moyenne = 54), des différences de coefficients attribués et l'influence de la durée du relevé sur la diversité observée. Ce test a fait l'objet d'un rapport en vue d'un programme d'assurance qualité (Corriol et Mayet, 2006).

Projet d'indice fonctionnel

À la lumière de certaines constatations, il est apparu que des variations interannuelles importantes

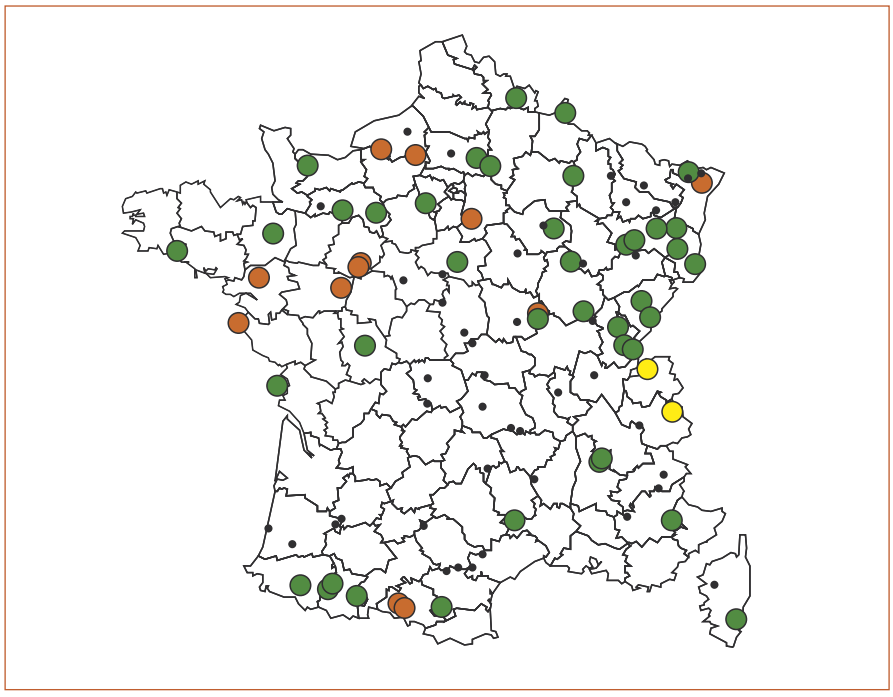


Fig. 1 : campagnes d'inventaires successifs : période 1996-1998 (en rouge), 1997 (en jaune), période 2002-2006 (en vert)
Les points noirs représentent les placettes du réseau non inventoriées.

du cortège spécifique ne déplaçaient pas la répartition des pourcentages entre les différents compartiments trophiques (parasites, saprotrophes – en particulier lignicoles — et symbiotiques – en particulier ectomycorhiziques). D'où l'idée de tenter la mise au point d'un indice fonctionnel qui traduirait, sur la base d'une formule de calcul à construire, l'état de santé (au plan fonctionnel) d'une placette ou d'un site donné, à partir d'un chiffre unique. Cette recherche est en cours et les données les plus récentes issues du réseau RENECOFOR sont en cours de traitement statistique qui contribuera à la mise au point de ce concept.

Quoi qu'il en soit, les résultats préliminaires semblent donner déjà quelques informations : des paramètres tels que l'âge des peuplements, l'histoire de la gestion de la placette considérée, d'éventuels problèmes sanitaires, influent sur la valeur de cet indice. Par ailleurs, il faut que la placette que l'on envisage d'analyser, de ce point de vue, ait livré une liste d'au moins 100 taxons pour fournir un indice statistiquement interprétable. Les prochains progrès, dans cette recherche d'un indice fonctionnel, relèveront de la rédaction du rapport final des travaux effectués et d'une collaboration entre statisticiens et mycologues, ce qui est envisagé au sein de la convention cadre signée entre l'ONF et la SMF - mars 2007.

Implication environnementale des travaux mycologiques

Enfin, et ce n'est pas le moindre des enseignements tirés de cette aventure, les travaux effectués au sein du réseau RENECOFOR ont montré aux mycologues qu'il est possible de participer utilement à un travail d'interprétation et de gestion des écosystèmes forestiers. Ceci est particulièrement important, car les gestionnaires sont très demandeurs et les mycologues doivent disposer d'une base méthodologique pour répondre à cette attente. La commission Environnement de la SMF élabore un document de synthèse pouvant servir de référence pour les participants à de telles études, pour une meilleure comparabilité des résultats d'un site à l'autre.

Conclusion

En conclusion, on ne peut que se féliciter du fait que le réseau RENECOFOR ait offert un champ d'investigation novateur aux mycologues, ait valorisé la compétence des mycologues amateurs, ait joué un rôle fédérateur auprès des sociétés mycologiques, ait permis de préciser un protocole opérationnel (utilisé dans d'autres contextes depuis), ait donné des résultats scientifiques intéressants et ait consolidé, en France, l'implication environnementale des activités mycologiques associatives.

Les mycologues, la Société mycologique de France et toutes les autres structures mycologiques impliquées dans ce réseau doivent des remerciements chaleureux aux responsables de l'ONF qui ont accordé leur confiance à cette collaboration inédite en France.

Régis COURTECUISSE
Pierre-Arthur MOREAU
Département de Botanique
Faculté des sciences pharmaceutiques et biologiques
regis.courtecuisse@univ-lille2.fr
pierre-arthur.moreau@univ-lille2.fr

Olivier DAILLANT
Observatoire mycologique
olivier.daillant@wanadoo.fr

Et aussi…
Parmi les nombreux mycologues amateurs qui ont participé au suivi de la fonge, citons en particulier : Bellanger Y. ; Bellocq A. ; Bonnin J.-C. ; Catel E. ; Cazenave R. ; Corriol G. ; Coulomb M. ; Courtecuisse R. ; Cugnot J.-M. ;

Daillant O. ; Dechaume J.-P. ; de Munnik N. ; Diaz E. ; Dupuy G. ; Durand M. ; † Eyer C. ; Eyssartier G. ; Favre A. , Gaudard Y. ; Gueny M. ; Hairie F. ; Hugouvieux C. ; Jouan E. ; Joyeux E. ; Kizlik S. ; † Lagey J., Lambert M. ; Lanners M. ; Laurent P. ; Lécuru C. ; Mabon G. ; Malaval J.-C. ; Marchand L. ; Masson C.-L. ; Maurice J.-P. ; Mazé J. ; Michel F. ; Moingeon J.-L. ; Molière A. ; Moreau P.-A. ; Mornand J. ; Moyne G. ; Müller J.-L. ; Ouvrard G. ; Pacaud R. ; Pascal J. ; Péan R. ; Péricouche A. ; Poillotte M.-G. ; Rapilly J. ; † Redeuilh G. ; Rioult J.-P. ; Rovéa J. ; Surault J.-L. ; Thévenard Y. ; Verpeau J.-C. ; Zorn C., etc.

Bibliographie

CORRIOL G., MAYET P., 2006. RENECOFOR – Suivi de la composition mycologique des placettes du réseau. Synthèse de la première réunion d'intercalibration (23-25/09.2004) en vue d'un programme d'assurance qualité. Bagnères-de-Bigorre : Conservatoire Botanique Pyrénéen, Rapport. 23 p.

MOREAU P.-A., DAILLANT O., CORRIOL G., GUEIDAN C., COURTECUISSE R., 2002. RENECOFOR — Inventaire des champignons supérieurs et des lichens sur 12 placettes du réseau et dans un site atelier de l'INRA/GIP ECOFOR – Résultats d'un projet pilote (1996 – 1998). Fontainebleau : ONF. 141 p.

DELANNOY A., CHIAFFI M., COURTECUISSE R., EYSSARTIER G., 2002. *Psathyrella coprinoides* sp. nov. Une nouvelle psathyrelle de la section *Cystopsathyra*. Bull. Soc. Mycol. Fr. vol. 118 n° 1, pp. 1-9

ROBERTS P., SPOONER B., 1999. How many species ? Assessing fungal diversity in the British Isles. XIIIe Congress of European Mycologists [Alcalá de Henares (Madrid) Spain, 21-25 09.1999] Book of Abstracts, p. 112

Évaluation de la biodiversité et de l'état sanitaire des sols forestiers dans le réseau RENECOFOR

Ces dernières années un intérêt croissant s'est manifesté pour la conservation de la biodiversité et la gestion durable des sols. Ces deux thèmes sont indissociables : un sol ne peut être géré durablement que si sa biodiversité est maintenue et gérée convenablement. Les pouvoirs politiques mais aussi les médias et le grand public commencent à s'approprier cette problématique, essentielle à l'existence de l'espèce humaine car la plupart des fonctions écologiques qui la soutiennent dépendent du sol.

Introduction : la macrofaune et la bio-indication de l'état des sols

Le sol est la partie superficielle de la croûte terrestre. À l'échelle de la planète, cela ne représente qu'une fine couche mais l'agriculteur ou le forestier en saisissent bien l'importance. C'est dans le sol que la matière organique se recycle et c'est là aussi que les graines germent ; mais il a bien d'autres fonctions tout aussi importantes qu'il est nécessaire de protéger. Le sol permet l'infiltration de l'eau et lutte ainsi contre l'érosion, il réalise l'épuration et le stockage de l'eau en augmentant les réserves disponibles, il séquestre du carbone et joue ainsi un rôle essentiel dans le bilan du CO_2 atmosphérique et dans la fertilité du sol ; il offre une grande diversité d'habitats qui abritent les organismes du sol et contribue au maintien de la biodiversité. L'importance de ces fonctions a été reconnue au niveau international par des organismes comme les Nations unies (UNEP, 2000) ou l'OCDE (OECD, 2004) tandis qu'un rapport international élaboré par des experts du monde entier a évalué leur état actuel et leurs tendances (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). La Commission européenne a publié un rapport où elle liste les principales menaces pesant sur le sol et souligne le besoin de le protéger en proposant une directive cadre pour le sol (EC, 2002 ; 2006). Les fonctions réalisées par le sol sont influencées par les activités humaines (pollution, feu, (sur)exploitation, (sur)pâturage, etc.) ou par les phénomènes naturels (maladies et ravageurs, tempêtes, feu, sécheresse et autres stress climatiques) qui modifient les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol et conditionnent le fonctionnement de tout l'écosystème.

Il est essentiel de développer des outils de bio-indication permettant d'évaluer l'effet des politiques environnementales, l'impact des pollutions et la durabilité des pratiques de gestion. Parmi la diversité d'organismes qui habitent le sol, la macrofaune, que l'on repère sans difficulté à l'œil nu (figure 1 page suivante), participe à un grand nombre de processus essentiels au bon déroulement de ses fonctions, et donc à sa qualité. Elle est aussi un témoin privilégié des conditions de vie qui règnent dans ce milieu. Composée d'un grand nombre d'unités taxonomiques (ordres, familles et espèces) elle répond à tout changement de l'environnement avec un degré d'intensité variable en fonction de l'écologie du taxon considéré. Ces organismes constituent des excellents bio-indicateurs (Paoletti, 1999) et peuvent être utilisés pour connaître l'impact des activités humaines et des changements naturels sur le fonctionnement du sol. Afin de mettre au point un outil d'évaluation et de surveillance de l'état des sols forestiers, les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ont été analysées dans une quarantaine de placettes du réseau RENECOFOR grâce au soutien financier du programme européen Forest Focus. Les données recueillies permettront de connaître l'état de la diversité des peuplements de macrofaune et l'impact des modes de gestion sur la qualité des sols forestiers. À terme, deux indices seront développés, calibrés et validés : l'IGQS (Indice général de la qualité du sol ; Velasquez *et al.*, 2007) et l'IBQS (Indice biologique de la qualité du sol ; Ruiz, 2004). Ces indices donneront une information intégrative de l'état du sol et permettront le diagnostic et le suivi de la qualité des sols forestiers.

Le rôle clé joué par la macrofaune du sol

Les indicateurs utilisés traditionnellement pour évaluer la qualité du sol constituent des longues listes de paramètres physiques (ex. : texture, densité apparente, profondeur maximale d'enracinement, etc.), chimiques (CEC, teneur en matière organique, pH, teneur en polluants, etc.) et biologiques (activité enzymatique, respiration du sol, biomasse microbienne, etc.). Bien que très pertinents et nécessaires, ces paramètres n'ont sou-

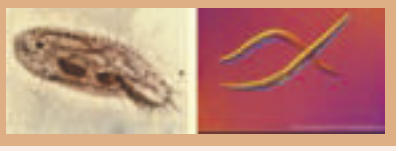
Catégorie de faune	Groupes (taxons)	Images
Microfaune (taille < 0.2 mm)	Protozoaires (amibes, flagellés, cilliés) Nématodes	
Mésofaune (taille < 4 mm)	Acariens, collemboles	
Macrofaune (taille > 4 mm, visible à l'œil nu)	Vers de terre Escargots, limaces Cloportes Mille-pattes Perce-oreilles Araignées, faucheurs, Pseudoscorpions Coléoptères Criquets Fourmis, termites Punaises, blattes Larves (coléoptères, diptères, chenilles)	

Fig. 1 : tableau de classification de la faune des sols en fonction de la taille

vent qu'une signification limitée dans le temps et dans l'espace et peinent à indiquer des changements à long terme. La macrofaune du sol, avec un grand nombre de groupes d'organismes aux régimes alimentaires et modes de vie très différents, constitue un indicateur fiable et pertinent des risques écologiques car, en contact permanent avec le sol, sa matière organique et l'eau qui remplit sa porosité, elle intègre l'ensemble des conditions physiques et chimiques du sol ainsi que la biodisponibilité des polluants éventuels. D'une manière générale on peut distinguer dans les peuplements de macro-invertébrés du sol trois groupes avec des fonctions bien distinctes : les « organismes ingénieurs », les « transformateurs de litière » et les « prédateurs ».

Les « **ingénieurs de l'écosystème** », représentés par les vers de terre, les fourmis et les termites, construisent l'architecture interne du sol à travers les structures biogéniques qu'ils produisent (figure 2). Ces agrégats de différentes tailles, présents à des profondeurs variables, forment un extraordinaire réseau de pores et de galeries, excellent moyen pour l'infiltration de l'eau, la circulation de l'air et la pénétration des racines. Ils mélangent les horizons minéraux et organiques du sol grâce à la bioturbation, ce qui permet à la matière organique d'être présente en profondeur à proximité des racines. La bioturbation permet aussi de remettre en contact les microorganismes et la matière organique dont ils se nourrissent, contribuant ainsi à sa minéralisation et à l'augmentation des nutriments disponibles pour les plantes (figures 3 et 4). Les « **transformateurs de litière** » jouent un rôle très important dans la fragmentation et la décomposition de la matière organique. En découpant les débris végétaux ils augmentent la surface disponible pour les microorganismes et en les digérant partiellement ils accélèrent le processus de décomposition. Ils produisent des boulettes fécales qui peuvent être digérées à leur tour par d'autres organismes de la litière. Enfin, les organismes « **prédateurs** » exercent un contrôle indispensable pour le maintien d'un équilibre entre les différents peuplements d'invertébrés du sol et jouent un rôle clé dans la lutte contre les invasions d'insectes ravageurs.

Abondance et diversité de la macrofaune dans les sols du réseau RENECOFOR

L'analyse des données des populations de macrofaune recueillies au printemps 2006 sur 40 placettes du réseau montre que l'abondance moyenne dans les sols forestiers est de l'ordre de 405 individus/m² appartenant à douze des dix-sept principaux ordres présents dans le sol. Ces valeurs varient sensiblement selon les placettes (tableau 1) indiquant que la macrofaune du sol est capable de réagir par des variations d'abondance et de diversité aux conditions de vie caractéristiques de chaque milieu, et cela même quand on considère des groupements d'espèces aussi larges que les ordres. Certaines placettes ont des sols où la macrofaune est particulièrement abondante. C'est le cas par exemple de EPC 71, SP 57, CHP 59, DOU 34 ou CHS 86 avec des densités qui oscillent entre 1069 et 653 ind/m² tandis que les sols le plus faiblement peuplés sont représentées par les placettes PM 17, HET 55, PS 04 ou SOU 71 où l'abondance moyenne ne dépasse pas les 184 ind/m². La diversité n'est pas distribuée de la même façon et à une faible densité peut être associée une forte diversité. C'est le cas par exemple de la placette CPS 77 qui est la plus riche du réseau avec 15 ordres de macrofaune alors qu'elle fait partie des placettes à plus faible densité d'individus (238 ind/m² en moyenne). La présence d'un grand nombre de taxons souligne très probablement une diversité d'habitats et des ressources plus importantes dans cette placette tandis que des contraintes

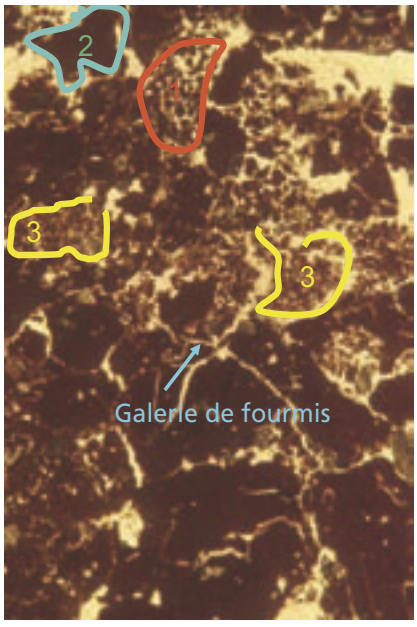


Fig. 2 : coupe d'une lame mince de sol

1 : dépôt de myriapodes (mille-pattes) ;
2 : turricule de vers de terre
3 : structures produites par les fourmis

Fig. 3 : galerie de vers de terre utilisé par la racine d'une plante pour pénétrer dans le sol

Sur l'image de droite on peut observer la différence de couleur entre le sol déposé par le vers de terre à l'intérieur de la galerie (plus foncé et riche en matière organique) et le sol environnant.

Fig. 4 : A) structures biogéniques produites par les vers de terre (Recent (fresh) = récent (frais) ; Non-recent, dry = ancien, sec) et B) déblais de fourmis

d'une autre nature (comme par exemple la fréquence des perturbations introduites par le système de gestion ou par l'utilisation de la placette) pourraient expliquer la faible abondance d'individus. D'une manière générale, la composition des peuplements de macrofaune observée dans les sols du réseau peut être divisée en quatre sous-groupes (figure 5) : 1) les taxons dominants (entre 86 et 46 ind/m²) représentés par les fourmis, les chilopodes (mille-pattes prédateurs), les vers de terre (lombriciens) et les larves de coléoptères ; 2) les araignées (prédateurs), les diplopodes (mille-pattes décomposeurs) et les coléoptères qui présentent des effectifs similaires (entre 22 et 26 ind/m²) ; 3) des organismes décomposeurs (cloportes (isopodes), larves de diptère et gastéropodes) représentés par une dizaine d'individus/m² et 4) un dernier groupe qui réunit un nombre considérable de taxons avec des faibles abondances (chenilles, perce-oreilles, faucheurs, punaises, pseudoscorpions, blattes et criquets principalement).

La macrofaune du sol est un bon bio-indicateur de l'état du sol

De nombreux travaux ont été dédiés à l'étude des peuplements de macro-invertébrés comme indi-

Code Placette	Département	Forêt	Densité	Diversité
CHP 10	Aube	FD de Larivour	518	13
CHP 40	Landes	FC de Gamarde	466	13
CHP 49	Maine et Loire	FD de Monnaie	346	12
CHP 59	Nord	FD de Mormal	763	15
CHS 01	Ain	FD de Seillon	338	14
CHS 18	Cher	FD de Vierzon	325	14
CHS 35	Ile et Vilaine	FD de Rennes	421	13
CHS 81	Tarn	FD de Grésigne	488	14
CHS 86	Vienne	FD de Moulière	653	14
CPS 67	Bas Rhin	FD de Nonnenhardt	302	14
CPS 77	Seine et Marne	FD de Fontainebleau	238	15
DOU 34	Hérault	FD des Avant-Monts	736	13
DOU 61	Orne	FD d'Ecouves	238	12
DOU 65	Hautes Pyrénées	FC de Lourdes	576	12
DOU 71	Saône et Loire	FD d'Anost	184	9
EPC 08	Ardennes	FD de la Croix-Scaille	187	9
EPC 63	Puy de Dôme	FS de Manson	362	14
EPC 71	Saône et Loire	FD de Glenne	1 069	12
EPC 87	Haute Vienne	FS de Monteil	285	9
HET 26	Drôme	FD de Lente	382	13
HET 52	Haute Marne	FD d'Auberive	491	12
HET 55	Meuse	FD de Lachalade	168	12
HET 65	Hautes Pyrénées	FC de Bize	458	10
HET 76	Seine Maritime	FD d'Eawy	190	12
MEL 05	Hautes Alpes	FC de Champcella	224	12
PL 20	Corse du Sud	FD d'Aitone	251	13
PL 41	Loir et Cher	FD de Lamotte-Beuvron	350	12
PM 17	Charente Maritime	FD des Saumonards	139	10
PM 20	Corse du Sud	FD de Zonza	394	11
PM 40a	Landes	FD de Vielle Saint Girons	282	10
PM 85	Vendée	FD des Pays de Monts	269	10
PS 04	Alpes de Haute Provence	FC du Fugeret	176	10
PS 15	Cantal	FS de Paulhac	386	11
PS 41	Loir et Cher	FD de Lamotte Beuvron	202	10
PS 67b	Bas Rhin	FD d'Ingwiller	354	13
SP 09	Ariège	FD de Massat	506	14
SP 25	Doubs	FD de Ban	562	13
SP 39	Jura	FC d'Arbois	560	13
SP 57	Moselle	FD d'Abreschviller	882	13
SP 68	Haut Rhin	FD de Guebviller	480	11

Codes essence (dans le code placette) : CHP = chêne pédonculé, CHS = chêne sessile, CPS = mélange de chênes pédonculés et sessiles, DOU = douglas, EPC = épicéa, HET = hêtre, MEL = mélèze, PL = pin laricio, PM = pin maritime, PS = pin sylvestre, SP = sapin pectiné
Forêt = FD: Forêt domaniale, FC: Forêt communale, FS: Forêt sectionale
Densité = Abondance moyenne (individus par m²)
Diversité = nombre total d'ordres

Tab. 1 : densité moyenne et diversité des populations de macrofaune dans 40 placettes du réseau RENECOFOR, échantillonnées au printemps 2006

cateurs de la qualité du sol (Paoletti, 1999 ; Nahmani et Lavelle, 2002). Ces travaux montrent que chaque groupe d'invertébrés, considéré de façon individuelle, est très sensible aux modifications de l'environnement et possède un pouvoir indicateur original. Afin de profiter de l'ensemble du pouvoir indicateur des différents groupes nous proposons dans ce travail de substituer aux approches basées sur un seul groupe une analyse de l'ensemble des peuplements de macro-invertébrés. Deux questions principales apparaissent : 1) à quel point l'abondance et la diversité de la macrofaune du sol varient-elles en fonction des changements de l'environnement ? et 2) si cette « covariation » existe, est-elle fiable et robuste ? La réponse à ces questions a été recherchée en utilisant l'analyse de co-inertie. Cette analyse statistique permet de coupler deux jeux de données différents, et nous renseigne sur les organismes qui répondent de la même façon aux pratiques de gestion et aux conditions pédoclimatiques qui caractérisent les sols étudiés.

Le résultat de cette analyse, réalisée en couplant les principaux ordres de macro-invertébrés et les variables chimiques mesurées dans le sol, montre qu'il existe une covariation de ces deux jeux de données statistiquement significative ($p < 0{,}001$). Ainsi par exemple, l'abondance des larves de diptères (organismes décomposeurs) semble être en relation avec les sols où la concentration de NH4+ est plus élevée. La concentration en NO3- semble être en lien avec les dermaptères (perce-oreilles) et limaces alors que les vers de terre, les millepattes décomposeurs (polydesmes et glomeridés) et prédateurs (lithobies) sont en relation avec la teneur de matière organique et le phosphore total dans le sol. Les escargots et le pH co-varient ensemble et les blattes (dyctioptères) sont liées au rapport C/N. Les variations

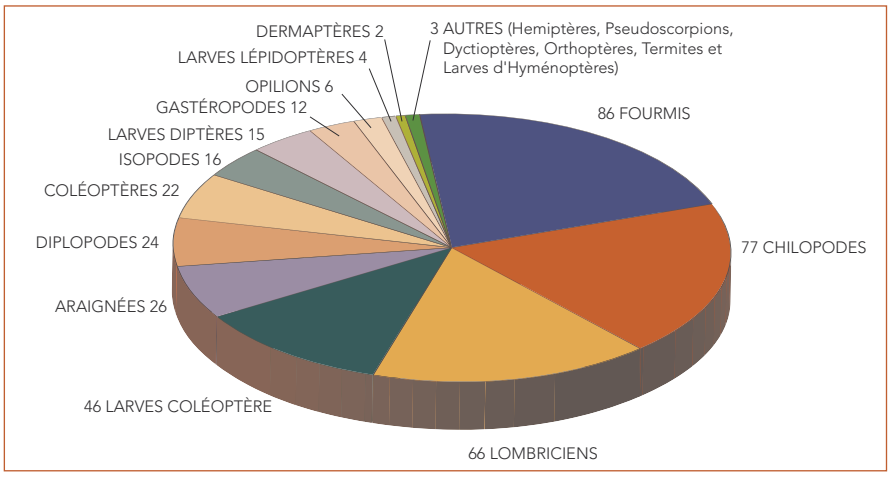


Fig. 5 : composition des peuplements de macrofaune du sol dans 40 placettes du réseau RENECOFOR (effectifs moyens)

dans les valeurs de ces paramètres peuvent avoir un effet direct ou indirect sur les organismes auxquels ils sont associés. Ainsi par exemple le lien entre les lithobies et la teneur en matière organique est probablement indirect et dû à une plus grande abondance de proies dans les sols riches en matière organique dont lesdites proies se nourrissent. Ces observations confirment la sensibilité des macro-invertébrés aux variations des paramètres chimiques mesurés et soulignent leur pertinence en tant qu'outils de diagnostic et surveillance de l'état du sol.

Des indices pour évaluer la qualité du sol forestier

Afin de proposer un outil de mesure de l'état de santé du sol forestier le plus synthétique possible, deux approches sont en cours de développement qui aboutiront à la proposition de deux indices : l'IGQS (Indice Général de la Qualité du Sol) et l'IBQS (Indice Biologique de la Qualité du Sol).

Le but de l'IGQS est de réunir dans une expression unique un ensemble de mesures physiques, chimiques et biologiques pour donner une note de qualité au sol. Ces mesures seront regroupées dans des sous-indicateurs qui servent à calculer la valeur de l'IGQS (voir encadré). La valeur globale donnée par l'IGQS permettra par exemple de comparer la qualité les sols de différentes placettes ou de suivre l'évolution de la qualité du sol d'une placette dans le temps. Au-delà de cette valeur globale, les sous-indicateurs permettront d'affiner l'appréciation. Ainsi, par exemple, une placette pourra avoir une valeur proche de 1, ce qui indiquerait une bonne qualité du sol, mais avec des valeurs de sous-indicateurs plutôt faibles pour certains compartiments : cela donnera une information supplémentaire pour réorienter éventuellement les pratiques de gestion ou au contraire, confirmer l'impact positif de la mise en application d'une nouvelle pratique.

Le deuxième indice, l'IBQS, approfondit l'étude de la biodiversité du sol et ses relations avec son état physico-chimique. Il donnera une information sur la qualité écologique du sol, sa capacité à fonctionner (i.e. recycler les nutriments, infiltrer l'eau, sa fertilité, etc.) ainsi que sur sa résilience (sa capacité à revenir à l'état de départ après avoir subi une modification introduite par une perturbation par exemple) et sa résistance (sa capacité à supporter la pression de la perturbation sans que son état change). L'étude de l'abondance et de la diversité des peuplements de macrofaune permettra d'identifier des taxons indicateurs caractéristiques des sols possédant des propriétés physico-chimiques similaires. L'IBQS combinera dans sa formule (voir encadré) l'abondance moyenne des taxons indicateurs et leur valeur indicatrice calculée en tenant compte de la spécificité de chaque taxon pour un sol donné et de sa fréquence d'apparition. Une augmentation dans la valeur de l'indice indiquera un meilleur état du sol. La corrélation entre la valeur de l'IBQS et les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés, ou encore entre l'IBQS et la valeur des sous-indicateurs utilisés dans le calcul de l'IGQS, sera étudiée. Ainsi pour une valeur donnée de l'IBQS il sera possible de connaître la valeur de la teneur en matière organique du sol, le pH ou l'état de sa structure physique. La calibration et la validation de l'IBQS mettront en évidence sa capacité à prédire la valeur des variables physico-chimiques. D'autre part, l'étude de l'écologie des taxons indicateurs présents sur un site permettra d'obtenir des informations complémentaires sur l'état du milieu.

Conclusion et perspectives

Les macro-invertébrés édaphiques jouent un rôle essentiel dans le maintien des fonctions du sol. Ils compostent la litière et construisent l'architecture interne du sol, ce qui lui permet de rendre un large nombre de services écosystémiques et garantit sa résistance et sa résilience face aux perturbations et aux changements climatiques. Du fait de la diversité de leurs modes de respiration (cutanée ou aérienne), de leurs habitats et de leurs régimes alimentaires, les macro-invertébrés sont en relation étroite avec les conditions de vie dans le sol. L'état du milieu et l'effet des perturbations seront donc ressentis à divers degrés d'intensité par ces organismes et seront reflétés par des changements dans leurs communautés, en abondance et en diversité. La force de ce lien

se manifeste même quand on considère des regroupements larges d'espèces, comme c'est le cas des données présentées dans cet article qui considère la macrofaune du sol au niveau des ordres. Ce lien sera sans doute renforcé par la prise en compte des variables physiques, qui influencent -et sont influencées par- l'activité des macro-invertébrés.

Le développement et la validation des indices proposés devraient permettre d'établir un protocole de surveillance de la qualité du sol forestier et d'observer des variations dans la biodiversité des peuplements de macrofaune. Si la corrélation entre les valeurs de l'IBQS et les sous-indicateurs physique, chimique, morphologique ou de matière organique est forte, le suivi de l'état du sol forestier serait simplifié et pourrait se réduire à la recherche des taxons indicateurs et la valeur de l'IBQS extrapolée pour connaître l'état physico-chimique et structural du sol. La mise en relation de ces outils avec l'ensemble des variables mesurées dans le réseau permettra de mettre en évidence des nouvelles interactions et de mieux interpréter l'information donnée par les indices. Nous rechercherons à mettre en évidence des effets seuil et des valeurs critiques pouvant être utilisées comme des signaux d'alarme.

Formules de l'indice général et de l'indice biologique de la qualité des sols

Pour le calcul de l'**indice général**, des études préalables sur des sols tropicaux (Velasquez *et al.*, 2007) ont, par exemple, conduit à l'élaboration d'une première formule, qui sera vérifiée en zone tempérée :

$$IGQS = 1{,}74\ SI_P - 1{,}51\ SI_{Ch} + 1{,}49\ SI_F - 0{,}54\ SI_M - 0{,}10\ SI_{MO}$$

où SI = sous-indicateur

Dans cette expression chacun des cinq sous-indicateurs est calculé à partir d'un certain nombre de mesures physiques (SI_P), chimiques (SI_{Ch}), faunistiques (SI_F), morphologiques (SI_M) et de matière organique (SI_{MO}).
Les valeurs de l'IGQS comme celles des sous-indicateurs oscillent entre 0,1 et 1.

L'**indice biologique** répondra quant à lui à une formule du type :

$$IBQS = \sum_{i=1}^{n} \ln (Di+1) \times Si$$

où Di : abondance moyenne du taxon indicateur i, et Si : valeur indicatrice du taxon i

Ainsi l'indice donnera une note de qualité au sol qui sera comprise entre 0 et 20.

Nuria RUIZ CAMACHO
Patrick LAVELLE
IRD, UMR 137 Biodiversité et Fonctionnement du Sol
ruiz@bondy.ird.fr

Elena VELASQUEZ
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomia

Bibliographie

European Commission (EC), 2002. Towards a thematic strategy for soil protection, Discussion Paper COM (2002)-179. Commission of the European Communities, Brussels.

European Commission (EC), 2006. Establishing a framework for the protection of soil and amending directive, proposal for a directive of the European Parliament and of the Council COM (2006)-232 final. Commission of the European Communities, Brussels.

Millenium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being, World Resources Institute, Washington, DC. http://www.millenniumassessment.org

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development), 2004. Agricultural impacts on soil erosion and soil biodiversity: developing indicators for policy analysis. In Proceedings of an OECD Expert Meeting, Rome, March 25-28, 2003. ISBN: 92-64-19920-9

PAOLETTI M.G., 1999. Invertebrates biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes. Practical use of invertebrates to assess sustainable land use. Elsevier

RUIZ N., 2004. Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Thèse de Doctorat de l'Université Paris 6, Spécialité Science de la Vie, 14 septembre 2004, Bondy: 327pp.

UNEP (United Nations Environmental Protection), 2000. Decisions adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at Its Fifth Meeting Nairobi, 15-26 May 2000, UNEP/CBD/COP/5/23.

VELASQUEZ E., LAVELLE P., ANDRADE M., 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. Soil Biology and Biochemistry n° 39 pp.3066-3080

Menu
Buffet

15 ANS DE SUIVI DES
ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée

Le bilan hydrique et ses variations interannuelles sont des informations essentielles pour comprendre et interpréter le fonctionnement et les dysfonctionnements des écosystèmes (croissance des arbres, état sanitaire, variations interannuelles de l'état des cimes, bilans minéraux, etc.). Pour la forêt française, la disponibilité en eau est le principal facteur limitant de la production et ceci, quelle que soit la région forestière. Même en Lorraine, les variations interannuelles de croissance radiale du hêtre dépendent à plus de 70 % du niveau de déficit hydrique de l'été en cours et de l'été précédent.

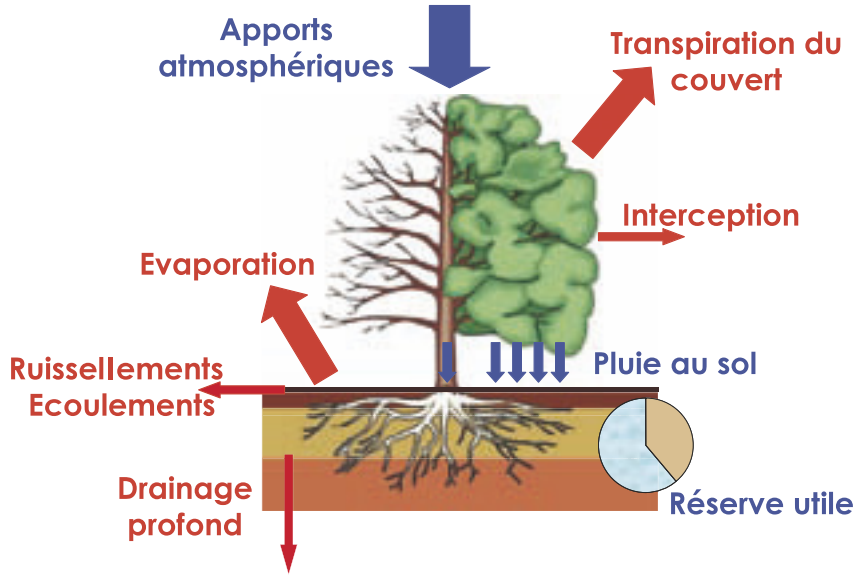


Fig. 1 : le bilan hydrique forestier simplifié

Les éléments du bilan hydrique pour un système forestier

Calculer un bilan hydrique consiste à déterminer, pour une période de temps donnée (le jour, le mois, la saison, l'année), les quantités d'eau :

- interceptée par le couvert ;
- disponible pour la végétation dans les différentes couches de sol ;
- consommée par la végétation (évapotranspiration) ;
- drainée par chaque couche de sol et au-delà de la zone des racines.

Si les trois premières quantités d'eau peuvent être mesurées, ce n'est pas le cas pour le flux d'eau drainé : cette quantité est donc nécessairement obtenue par calcul.

Les évolutions de ces quantités d'eau sont calculées pour un système donné (figure 1). Ce système est limité, en haut, par les houppiers (autrement dit l'interface couvert/atmosphère), et en bas, par le volume de sol colonisé par les systèmes racinaires (l'interface sol/racines). L'eau qui sort de la zone d'enracinement traverse le sous-sol, recharge les nappes phréatiques et les cours d'eau : elle ne fait alors plus partie du « bilan hydrique » mais du « bilan hydrologique ».

Établir un bilan hydrique consiste à calculer les variations de quantité d'eau disponible dans le sol : à un instant donné, le volume d'eau dans le sol résulte de la différence entre les entrées et les sorties du système. Pour mener ce calcul, il faut connaître les données climatiques locales (ou variables d'entrées) et les caractéristiques du sol et du peuplement considéré.

Caractériser l'eau qui entre, la réserve du sol et l'effet du peuplement

L'eau qui entre dans le système correspond pour l'essentiel aux apports atmosphériques (pluie et neige). Sauf cas particulier, les remontées capillaires, les eaux de ruissellement ou les écoulements latéraux dans le sol, sont négligés. Les précipitations journalières nécessaires aux calculs proviennent soit du réseau d'observation de Météo-France, soit directement des postes du sous-réseau météorologique forestier RENECOFOR. Plus le poste fournissant la pluviométrie est proche du peuplement considéré, meilleur sera le calcul.

Il faut ensuite connaître la réserve utile du sol, caractéristique pédologique et hydrique définie par différence entre la teneur en eau du sol à deux humidités théoriques caractéristiques : i) la capacité au champ, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale qui peut être retenue par le sol une fois toute l'eau gravitaire écoulée et ii) le point de flétrissement permanent, c'est-à-dire au point où les végétaux ne peuvent plus extraire l'eau du sol pour des raisons physiques. La réserve utile du sol (l'eau pouvant

être consommée par la végétation) est alors la différence entre le volume d'eau à la capacité au champ et le volume d'eau au point de flétrissement.

Les caractéristiques indispensables du peuplement concernent sa phénologie : feuilles persistantes ou espèce décidue, date de débourrement et de chute des feuilles (ces observations sont réalisées sur les placettes RENECOFOR), indice foliaire du peuplement (désigné par LAI = *leaf area index*). Cette caractéristique clé des couverts correspond à la surface projetée de feuilles en m² par m² de sol. Mais ce paramètre n'est pas mesuré en routine sur les placettes RENECOFOR (voir le poster « Détermination de l'indice foliaire sur les placettes feuillues du réseau » en fin de volume).

Caractériser l'eau qui sort

L'eau qui sort du système est plus difficile à quantifier puisque l'on parle cette fois d'eau transpirée par la végétation, d'eau évaporée par le sol et d'eau drainée. Ces volumes sont calculés à l'aide de fonctions mathématiques plus ou moins élaborées selon les modèles de bilan hydrique et en utilisant là encore des données météorologiques (Météo-France ou RENECOFOR). Ces données sont les températures minimale et maximale journalières, l'humidité relative ou le déficit de saturation de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Combinées entre elles, ces variables permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP), une variable synthétique qui estime la quantité d'eau pouvant être évaporée dans l'atmosphère pendant une journée en dehors de tout processus biologique (l'ETP quantifie la demande atmosphérique. Elle n'est que la traduction du fait que le linge sèche mieux en été avec une petite brise qu'en hiver).

Les quantités d'eau consommées par la végétation (transpiration des couverts) dépendent très étroitement de la phénologie. La cinétique de consommation en eau dépend à la fois des conditions climatiques (ETP) et de l'état de développement du feuillage (date de débourrement, indice foliaire et date de chute des feuilles). De plus, la disponibilité en eau dans le sol elle-même peut induire une régulation de la consommation.

Une autre fraction d'eau sort également du système via l'interception. Une part plus ou moins grande des pluies va être piégée par le feuillage des arbres. Cette eau est « perdue » puisqu'elle n'atteindra jamais le sol, elle sera réévaporée dans l'atmosphère après l'épisode pluvieux. La quantité d'eau interceptée dépend à la fois de l'intensité et de la nature de la précipitation, du type de végétation (feuillus/résineux) et de la quantité du feuillage, donc de la dynamique saisonnière de l'indice foliaire : en hiver, pour les feuillus, l'interception est très faible ; au printemps, l'interception augmente au fur et à mesure de la mise en place des feuilles ; en été, l'interception est maximale ; en automne l'interception décroît avec la chute des feuilles. Les résineux, feuillés toute l'année, interceptent plus de précipitations que les feuillus. À pluviométrique identique, un peuplement d'épicéa avec un indice foliaire de 10 va piéger sur ses aiguilles beaucoup plus d'eau (et ceci pendant toute l'année) qu'un peuplement de pin dont les indices foliaires sont toujours faibles. Une hêtraie avec un indice foliaire de 8 interceptera une grande partie des précipitations pendant la saison de végétation mais la chute des feuilles à l'automne permettra une réhydration du sol plus précoce et plus complète que sous la pessière.

Ainsi, l'indice foliaire des peuplements est une variable clé pour un calcul réaliste des bilans hydriques, de la consommation en eau par les peuplements et des flux d'eau drainés.

Ajuster le modèle

Les variables climatiques et les paramètres du sol et du peuplement étant connus, le calcul quotidien de la réserve en eau du sol est assuré par un modèle de bilan hydrique. Le modèle, développé à l'INRA par A. Granier et N. Bréda, réalise les calculs et génère un fichier de sorties permettant en outre de visualiser jour après jour l'état de la réserve en eau du sol, les quantités d'eau drainées dans les couches profondes, les quantités d'eau interceptées et transpirées par la végétation, etc. (figure 2).

Une étude, commencée en 2000, a permis d'illustrer les points clés de la détermination des paramètres et des variables d'entrée : nous avons calculé des bilans hydriques pour les placettes du sous-réseau météorologique RENECOFOR après avoir rassemblé les différentes informations nécessaires publiées dans différents rapports descriptifs de l'état initial des sites du réseau. Ce premier travail d'évaluation a été entrepris pour quantifier le poids des différents facteurs (données météorologiques et caractéristiques des peuplements) sur les résultats des calculs de bilans hydriques.

Ne pas mésestimer la variabilité spatiale des précipitations

Le bilan hydrique d'une parcelle forestière est avant tout déterminé par les données climatiques. Ces données peuvent varier considérablement dans l'espace, et même sur de courtes distances. Les valeurs d'ensoleillement varient peu sur de grandes étendues (excepté en zones montagneuses où les effets de confinement peu-

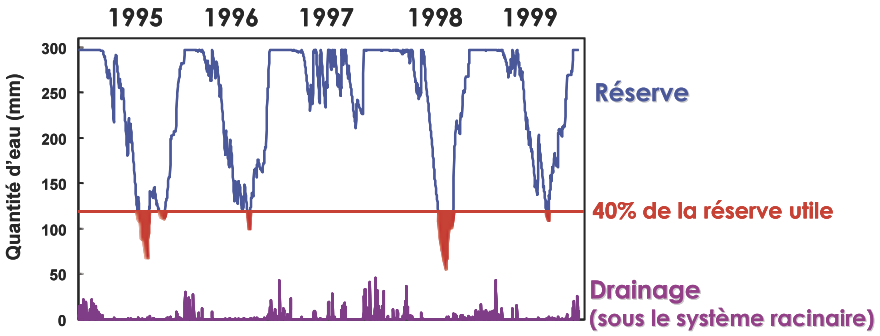


Fig. 2 : exemple d'un calcul de bilan hydrique pour la placette CHP 40 (hypothèse de 300 mm pour la réserve utile, LAI de 5,6 m²/m²)

La réserve en eau du sol, pleine au sortir de l'hiver, se vide progressivement puis se recharge à l'automne. Si l'année est très pluvieuse (1997) les arbres disposent d'une réserve conséquente toute l'année. Lors des années plus sèches, la réserve en eau du sol peut passer en dessous d'un seuil limite qui correspond à 40 % de la réserve utile : les arbres (quelle que soit l'espèce) régulent alors leurs échanges hydriques et carbonés avec l'atmosphère en fermant leurs stomates. La courbe violette présente les quantités d'eau sortant du système et susceptibles de drainer des éléments minéraux.

vent avoir une influence non négligeable). Les températures montrent une plus grande hétérogénéité spatiale surtout sur des gradients altitudinaux. Par contre, les quantités de précipitations peuvent évoluer considérablement sur de courtes distances, à la fois en terme de volume (quantités annuelles des précipitations), et en terme de répartition durant l'année (une pluie de 20 mm n'est pas équivalente à 10 pluies de 2 mm, en particulier en raison de l'interception par le couvert forestier). L'utilisation des données météorologiques RENECOFOR ou Météo-France comme variables d'entrée dans le calcul des bilans hydriques n'est donc pas un choix sans conséquences puisqu'il peut conduire à des résultats très différents, tant du point de vue de la caractérisation des années sèches que du point de vue des quantités d'eau drainée.

Difficultés d'estimation de la réserve du sol et de la profondeur colonisée

Le paramètre du peuplement étudié le plus sensible est la réserve en eau du sol. Cette grandeur, ou les valeurs caractéristiques (capacité au champ et point de flétrissement permanent) permettant de la calculer, est difficilement accessible sur le terrain puisqu'elle nécessite, soit des campagnes de mesures longues et répétées dans le temps et dans l'espace, à l'aide d'appareils de mesure calibrés spécialement pour chaque site, soit de longues analyses de laboratoire. D'une façon générale, on calcule donc ces réserves à partir de modèles appelés « *fonctions de pédotransfert* ». Le plus simple de ces modèles, bien connu des forestiers, correspond aux valeurs de Jamagne données selon les 15 classes du triangle des textures. Pour des modèles plus complexes, il est nécessaire de connaître la granulométrie des différents horizons, leur densité apparente et quelques paramètres chimiques comme la quantité de matière organique. Malheureusement, et bien qu'il existe de très nombreuses fonctions de pédotransfert (nous en avons testé une trentaine), aucune n'est pleinement satisfaisante en raison de la spécificité des sols forestiers (sols très acides ou très calcaires, souvent très chargés en éléments grossiers, et contenant beaucoup plus de carbone organique que les sols agricoles). Sur les placettes RENECOFOR, il n'est pas rare que, en fonction de la méthode utilisée, les réserves utiles calculées pour une placette varient d'un facteur 1 à 4 (figure 3). La notion même de « point de flétrissement permanent », qui a été définie par les agronomes, est sujette à caution dans le cas des peuplements forestiers puisque des études écophysiologiques ont montré que les potentiels hydriques auxquels les arbres peuvent prélever l'eau du sol sont supérieurs à ceux déterminés pour les cultures.

Deux autres paramètres indispensables concernent l'enracinement des arbres. Ce sont, d'une part, la profondeur maximale colonisée par les racines fines des arbres (et non les grosses racines visibles sur les culées de chablis), profondeur qui va directement influer sur la valeur de la réserve en eau, et, d'autre part, la répartition des racines fines dans chaque horizon du sol. En effet, la densité de racines fines détermine l'absorption d'eau par les arbres, et donc influence directement l'humidité de chaque couche.

Pour paramétriser un modèle de bilan hydrique, on pourrait être tenté de prendre en compte uniquement les premiers décimètres de sol (60 à 80 cm) là où l'on constate en général un très fort enracinement. Cependant, plusieurs études ont montré que ces racines « superficielles » sont insuffisantes pour expliquer les quantités d'eau transpirées par les arbres, et qu'il est nécessaire de considérer la profondeur maximale d'enracinement (il n'est pas rare d'atteindre 2 ou 3 m). Les quantités de racines fines présentes à ces profondeurs sont extrêmement faibles, mais elles assurent la quasi-totalité de l'approvisionnement en eau des arbres pendant l'été. Par exemple, dans un peuplement de frênes près de Nancy, il a été mesuré que l'eau transpirée en juillet et août provenait des seuls horizons profonds (au-delà d'1 m) et que cette eau était captée par seulement 8 % du système racinaire

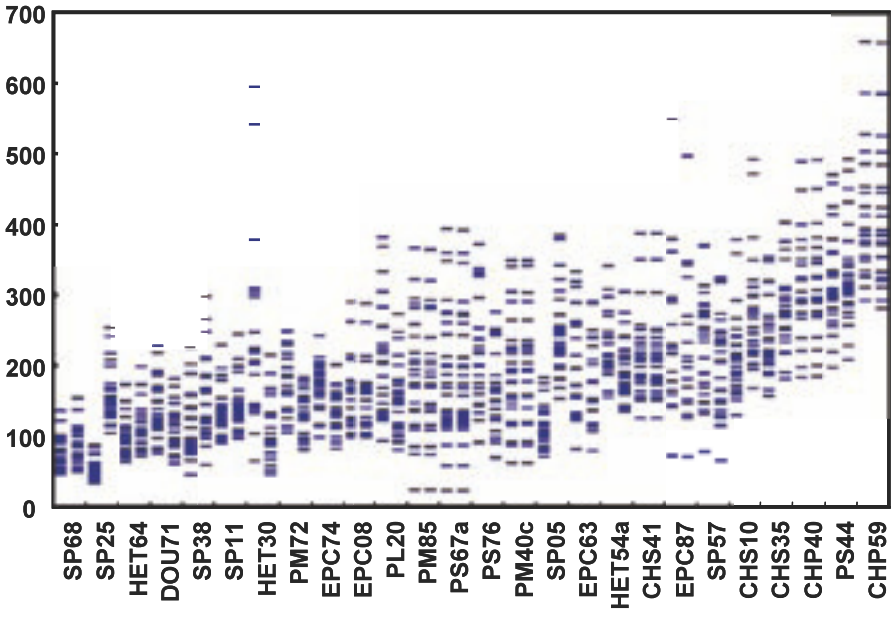


Fig. 3 : réserves utiles en eau (mm) calculées pour les deux fosses de chacune des placettes du sous-réseau météorologique forestier selon plusieurs fonctions de pédotransfert

Par exemple, pour la placette HET 30, les valeurs obtenues sur la fosse 1 varient de 50 mm à 600 mm.

des arbres. En forêt de la Harth, les chênes capables de résister aux sécheresses récurrentes sont ceux dont les racines traversent les horizons caillouteux et peuvent ainsi s'alimenter jusqu'à 2,50 m de profondeur.

Même si des observations pédologiques ont été réalisées sur les placettes du réseau RENECOFOR pour qualifier les propriétés physicochimiques des sols, les données caractérisant les systèmes racinaires sont encore insuffisantes tant du point de vue de la profondeur de sol colonisée par les racines fines que du point de vue de leur répartition dans les différents horizons. Enfin, la densité du sol qui est nécessaire pour bien reproduire les flux d'eau drainée rapidement, ainsi que les dynamiques de réhydratation à l'automne, n'est pas encore connue avec suffisamment de précision sur les placettes RENECOFOR.

En conclusion

Les résultats de la pré-étude réalisée à partir des données météorologiques acquises sur la période 1995-1999 devront bien entendu être généralisés sur une période de temps plus longue. Mais d'ores et déjà, nous avons pu mettre en évidence les difficultés et les limites des données disponibles à ce jour pour le paramétrage du compartiment sol/racines nécessaire au calcul de bilans hydriques. Si les observations phénologiques sont maintenant utilisables pour paramétrer la saison de végétation, l'indice foliaire n'est pas mesuré sur RENECOFOR. Nous insistons sur l'importance de ce paramètre, qui détermine non seulement les besoins en eau de la parcelle mais qui contribue également à l'interception des précipitations, donc à la quantité d'eau qui entre dans le sol. Enfin, en ce qui concerne les données météorologiques, il sera nécessaire d'entreprendre dans un avenir proche une intercomparaison des mesures acquises sur le réseau RENECOFOR et par Météo-France. Ces analyses ont déjà motivé des évolutions dans le réseau, et devront encore s'adapter aux questions scientifiques et finalisées auxquelles le réseau souhaite contribuer.

Vincent BADEAU
Nathalie BRÉDA
INRA - Centre de Nancy, UMR INRA UHP Écologie et Écophysiologie Forestières
Équipe Phytoécologie
badeau@nancy.inra.fr
breda@nancy.inra.fr

Références disponibles chez les auteurs

Interprétation climatique et bioclimatique des variations interannuelles de croissance des arbres*

Au début des années 1990, le « Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers » (RENECOFOR) a été mis en place par l'Office National des Forêts. En 1997, une étude dendrochronologique, associant mesures et datation des cernes d'accroissement annuels, a été entreprise afin de caractériser l'histoire des 102 peuplements avant l'installation du réseau. Dans le contexte du réchauffement climatique et notamment des effets potentiels des vagues de chaleur observées récemment, la question de la sensibilité des essences et de leur adaptation en réponse à ces modifications environnementales est devenue une question majeure de la communauté forestière internationale. Une meilleure connaissance des seuils de réponse des espèces au climat « moyen » mais également aux extrêmes, en liaison avec les conditions locales de croissance, devrait permettre de guider le gestionnaire dans les futurs choix des espèces à favoriser selon les contextes locaux. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions, des analyses visant à expliquer le déterminisme climatique des variations interannuelles de croissance ont été entreprises sur une partie des chênaies, des hêtraies, des pessières et sapinières du réseau. Cet article présente la synthèse des analyses menées sur 41 des 102 peuplements. Ces sites retenus correspondent à 5 espèces et couvrent une vaste gamme de conditions pédoclimatiques (figure 1 et tableau 1). Les objectifs sont de définir les principaux paramètres climatiques modulant la croissance radiale pour chaque essence, de mettre en évidence les effets des conditions locales sur la sensibilité au climat et de comparer la réponse entre espèces.

Aperçu méthodologique

Les 1 220 arbres concernés ont été carottés à cœur à 1,30 m (26 à 30 arbres par site ; 99 205 cernes). Les carottes ont été mesurées, puis interdatées à l'aide d'années caractéristiques de façon à s'assurer du bon synchronisme des séries de cernes. Ces années reflètent généralement l'effet de conditions climatiques extrêmes et correspondent aux années pour lesquelles au moins 75 % des arbres du peuplement présentent une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente. La part de la variation des largeurs de cernes non liée au climat (qui correspond au « bruit » indésirable) est ensuite éliminée à l'aide de programmes mathématiques spécifiques. Dans une dernière étape, les séries d'indices obtenus sont moyennées par date de façon à obtenir les chronologies moyennes de chaque peuplement. C'est à partir de ces courbes moyennes que les relations cerne - climat sont analysées. Divers paramètres statistiques sont calculés afin de juger de la qualité et de la force du signal climatique contenu dans les cernes.

La contrainte hydrique a été quantifiée en durée et en intensité par un modèle de bilan hydrique journalier. Après paramétrage précis des données stationnelles (réserve utile maximale en eau du sol, indice de surface foliaire, durée de la saison de végétation) et l'intégration des données climatiques journalières relatives aux conditions météorologiques de chaque peuplement (issues du réseau Météo France), le modèle simule

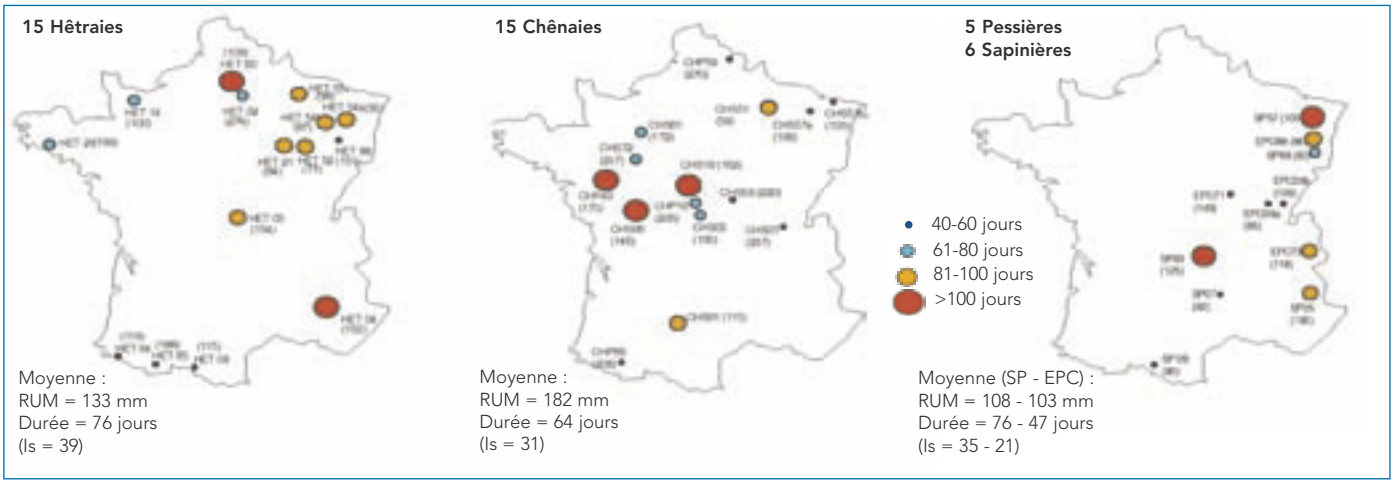


Fig. 1. : localisation des 41 peuplements et caractéristiques de la durée moyenne du déficit hydrique (période 1961-1990)

HET = hêtre, CHS = chêne sessile, CHP = chêne pédonculé, SP = sapin pectiné, EPC = épicéa commun, avec le numéro du département. Entre parenthèses, la réserve *utile maximale en eau du sol (en mm). Is = indice de déficit hydrique (plus la valeur est élevée et plus la sécheresse est intense).*

* *Cette présentation a déjà été publiée dans notre N° 15 sous le titre : "Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat : ce que RENECOFOR nous a appris".*

	Hêtre	Chêne	Epicea	Sapin
Nb peupl.	15	15	5	6
Nb arbres	450	443	149	178
Nb de cernes	33810	33614	14237	17544
Ht (m)	21,4-30,2	17,7-30,4	22-34,8	25,1-29,3
Dia (cm)	29-50	25-44	41-52	39-58
Age (ans)	54-160	54-139	58-185	54-168
Dens. (n/ha)	201-633	190-569	401-746	322-427
Alt.(m)	50-1300 (470)	57-370 (222)	600-1700 (1028)	400-1360 (1040)
RUM (mm)	77-274 (133)	59-270 (182)	65-149 (110)	60-190 (108)
Lc (mm)	1,36-3,80 (2,3)	1,34-2,38 (2,0)	1,48-4,00 (2,38)	0,99-3,38 (2,47)
Années caractéristiques				
1994		40 %		
1991				- 21 %
1989	- 34 %	- 25 %		
1986			- 24 %	- 35 %
1982		47 %		
1977	62 %			52 %
1976	- 43 %	- 31 %		
1973			- 24 %	
1972		16 %		
1969				34 %
1963			41 %	
1962		- 24 %	- 29 %	- 31 %
1959	- 35 %			
1958	64 %	59 %		
1956		- 27 %	- 24 %	- 45 %
1955			38 %	35 %
Paramètres climatiques apparaissant dans				
minimum 50 % des cas	**BH juin (26,6 %)**		**BH juillet et août (19,6 %)** Temp max août	**BH août à oct (n-1) (19,8 %)**
40 à 50 % des cas	BH juil.	**BH juillet (18,5 %)** BH oct (n-1) Temp max déc (n-1)	Temp max juillet	BH oct (n) Temp max fév
30 à 40 % des cas		BH juin BH août BH sept BH oct		BH juin à août Temp max juin

Tab. 1 : synthèse des conditions écologiques des 41 peuplements et des résultats des analyses climatiques

Les caractéristiques dendrométriques correspondent aux valeurs en 1994. RUM = Réserve utile maximale en eau du sol (en mm). Lc = largeur moyenne du cerne par peuplement (en mm). Les valeurs entre crochets correspondent aux moyennes. Pour les années caractéristiques, les valeurs correspondent aux variations moyennes de croissance. Un signe « - » indique une croissance réduite. Pour les paramètres climatiques, les variables en gras indiquent les facteurs prépondérants pour chaque espèce. Le chiffre entre crochets indique le pourcentage de variations des largeurs de cernes expliqué par ce paramètre. BH = bilan hydrique (indice de déficit hydrique). Temp max = température maximale moyenne (en °C). n= année en cours ; n-1 = année précédente.

le changement du contenu en eau du sol entre deux journées successives. In fine, les deux variables utilisées pour l'analyse des relations cerne — climat sont un indice et un nombre de jours de déficit hydrique. Cet indice peut être cumulé mensuellement ou annuellement ou sur des périodes plus précises. Il reflète les processus de régulation stomatique des arbres selon l'évolution du contenu en eau du sol. Quand ce dernier passe en dessous du seuil de 40 % de la réserve utile maximale, il y a fermeture des stomates et donc diminution de la transpiration et de l'assimilation carbonée. La croissance des arbres est freinée. Plus la valeur de cet indice est grande et plus l'intensité de la contrainte est forte pour les peuplements. Le nombre de jours de déficit hydrique traduit la durée de la mise en place de ces processus et donc la durée de la sécheresse. Sur la période 1961-1990 et, pour l'ensemble des 41 peuplements, il y a eu en moyenne 67 jours de déficit hydrique annuel (figure 1). En moyenne, les hêtraies ont subi davantage de contraintes que les chênaies (10 à 15 jours de plus) en liaison avec des conditions stationnelles moins favorables (notamment des réserves utiles plus faibles).

Pour chaque peuplement, le déterminisme climatique des variations de croissance a été analysé sous deux angles. Dans un premier temps, seules les années caractéristiques ont été comparées aux données climatiques. Cette analyse permet de mettre en évidence l'effet de conditions météorologiques extrêmes mais rares sur la croissance. Dans un second temps, les variables et les périodes clés jouant un rôle significatif sur la croissance des arbres sur le long terme ont été définies à partir de l'analyse des corrélations entre les paramètres climatiques et les indices de croissance (calcul des modèles climatiques). Les paramètres climatiques ont été organisés de façon à former des combinaisons de 24 régresseurs mensuels (12 indices de déficit hydrique et 12 températures minimales ou maximales) associant à la fois les données de l'année n et l'année n-1 afin de prendre en compte d'éventuels arrière-effets. Selon les données climatiques disponibles, les analyses ont porté sur une période de 32 (1963-1994) à 46 ans (1949-1994).

Sensibilité aux évènements extrêmes

Sur la période 1946-1994, l'analyse a montré qu'en moyenne 3 années par décennie ont présenté des

croissances remarquables. Des sécheresses exceptionnelles ou des froids hivernaux intenses sont les facteurs les plus souvent en cause dans ces comportements particuliers.
Les hivers très rigoureux 1955-1956 et 1985-1986 (hivers les plus froids sur l'ensemble de la période étudiée) se sont traduits par des réductions fortes de croissance dans la majorité des peuplements de résineux (en moyenne -37 %), et pour la moitié des chênaies pour l'hiver 1955-1956 (-27 %). Ces réductions sont associées aux températures minimales extrêmes de février qui ont présenté des valeurs moyennes plus basses de 7 à 12 °C par rapport à la normale. Pour ces deux années froides, la réduction de croissance a été supérieure d'en moyenne 60 % dans les sapinières par rapport aux pessières confirmant la plus grande sensibilité du sapin au gel intense.
Les chênaies et les hêtraies ont réagi fortement en 1976, 1989 et 1958. Les années 1976 et 1989, qui correspondent à des croissances réduites, se sont caractérisées par des sécheresses au moins deux fois supérieures à la normale en durée et/ou intensité. En revanche, l'année de forte croissance 1958 est l'expression d'un stress hydrique modéré voire nul (figure 2). Par rapport aux chênaies, les années sèches se sont traduites par des réductions supérieures de près de 40 % dans les hêtraies et l'année humide par un cerne plus large d'environ 10 %. Les travaux d'écophysiologie menés depuis les dernières années permettent d'apporter des éléments explicatifs en liaison avec les différences d'anatomie du bois, de phénologie et de régulation du flux transpiratoire. Il est également important de souligner que les hêtraies étudiées présentent globalement des conditions stationnelles et climatiques moins favorables que les chênaies les rendant ainsi plus sensibles aux aléas. Ainsi, pour le hêtre, la sensibilité aux conditions météorologiques annuelles dépend très étroitement de la réserve utile maximale en eau du sol. La sensibilité est maximale sous le seuil de 100 mm.

Concernant les deux chênes, il n'est pas apparu d'années caractéristiques spécifiques à chaque espèce, mais les variations de croissance ont été plus prononcées dans le cas des chênes pédonculés. Ceci est cohérent avec les résultats d'autres travaux utilisant la même approche dendroécologique. Ils coïncident également avec les résultats récents des travaux d'écophysiologie qui montrent que la distinction physiologique des deux espèces est réelle mais n'apparaît évidente que dans le cas de déficits hydriques importants et prolongés. Les différences quant à la structure des vaisseaux et des cernes et aux propriétés hydrauliques expliquent, en partie, ces comportements différents.
D'autres évènements ont marqué également les peuplements comme, par exemple, les sécheresses de 1962 pour les résineux et les chênes, de 1991 pour les sapinières et de 1973 pour les pessières. À l'opposé les années « humides » 1977, 1969, 1955 ont coïncidé avec des fortes croissances pour le sapin, 1955 et 1963 pour l'épicéa, 1982 et 1994 pour les chênes (sessiles).

Réponse aux conditions moyennes

Les modèles climatiques expliquent entre 10 et 60 % des variations interannuelles des largeurs de cernes et prennent en compte entre 2 et 8 paramètres. Pour toutes les essences, le bilan hydrique joue un rôle central dans le déterminisme de ces variations alors que l'effet direct des températures est moins fréquent (tableau 1 et figure 3).

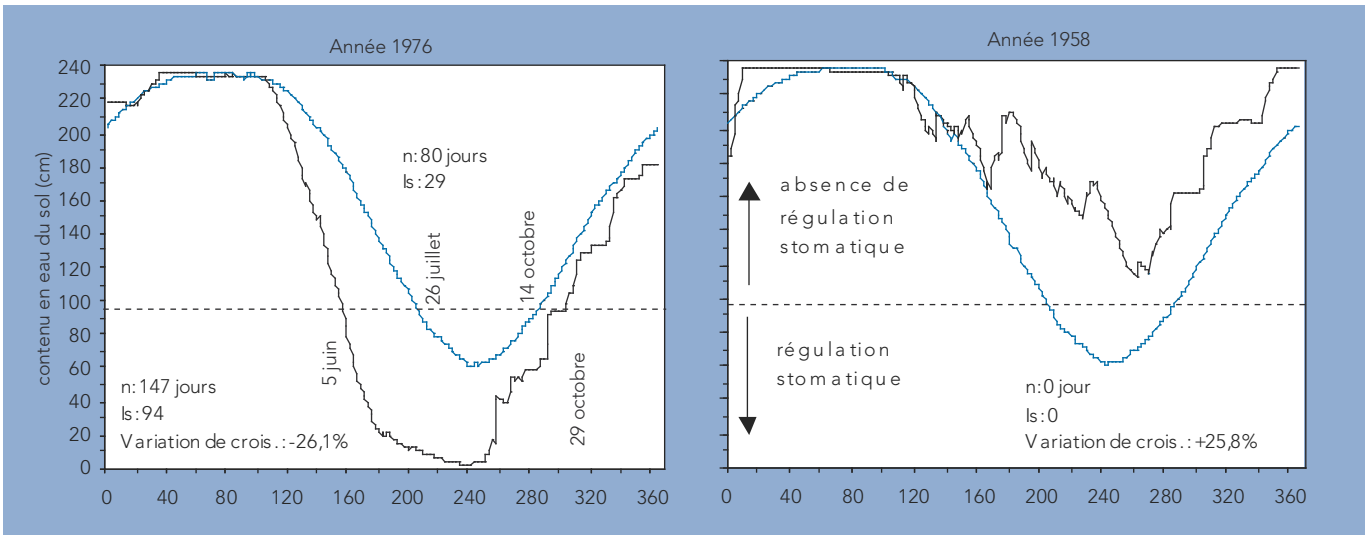


Fig. 2 : évolution (trait noir) de la réserve utile en eau du sol pour l'année sèche 1976 et l'année humide 1958 dans la chênaie sessiliflore de la forêt domaniale de Bercé (72)

Les dates de début et de fin de la sécheresse sont indiquées, ainsi que les deux valeurs des indices de stress : n = nombre moyen de jours de sécheresse, Is = indice moyen de déficit hydrique. Le trait bleu indique l'évolution moyenne de la réserve en eau (1961-1990) avec, en italiques, les conditions moyennes. Le trait en pointillé indique le seuil de 40% de la réserve à partir duquel il y a régulation stomatique (diminution de la transpiration et de la croissance).

Pour le hêtre, la croissance est très fortement dépendante des conditions d'humidité du début d'été. Le déficit du mois de juin explique en moyenne à lui seul près de 30 % de la variabilité interannuelle. La synthèse menée sur les hêtraies européennes montre que ce résultat est généralisable. Les conditions climatiques de juin (ou juillet) interviennent dans plus de 80 % des études. Des déficits hydriques pendant cette période sont également d'autant plus défavorables que la station est sèche : faible réserve utile maximale en eau du sol, exposition chaude, etc. Les analyses montrent également que même si le hêtre réagit fortement à un stress par une croissance réduite, il est capable de retrouver rapidement un niveau satisfaisant d'accroissement si les conditions redeviennent favorables. Par exemple, pour les sécheresses de 1976 ou 1989, il a été très souvent observé un retour à une forte croissance un ou deux ans après le stress. Dans l'état actuel de nos connaissances, le hêtre apparaît donc comme une des essences les plus sensibles au déficit hydrique mais également comme une des plus réactives (capacité de récupération très rapide).

Contrairement aux hêtraies, **les chênaies** ne semblent pas répondre à un paramètre unique mais à plusieurs facteurs dont le poids et la nature peuvent fortement varier selon les sites. Si certaines années extrêmes permettent de distinguer les deux espèces de chêne, la réactivité au climat moyen apparaît similaire pour les deux essences. Pour le chêne, c'est le bilan hydrique du milieu d'été (juillet) qui est le facteur climatique prépondérant en expliquant environ 20 % des variations d'accroissement mais seulement pour un peuplement sur deux. Pour une partie des chênaies, il apparaît également que l'absence de sécheresse en automne et des températures hivernales clémentes participent à la mise en place d'un cerne large l'année suivante (tableau 1). Le niveau d'explication relativement faible des modèles (moins de 30 % en moyenne) pourrait être mis en relation avec les conditions pédo-climatiques globalement peu limitantes des chênaies étudiées : faible altitude, climat tempéré humide associé à des sols profonds et à réserve utile en eau élevée. Ces différences de conditions écologiques pourraient également expliquer en partie les différences notables de comportement observées entre les chênaies et les hêtraies (stations globalement moins favorables).

Concernant les résineux, le comportement de **l'épicéa commun** se rapproche de celui du hêtre avec un rôle majeur des conditions de l'année en cours et une mise en place du cerne fortement sous la dépendance de la sécheresse estivale. La période clé est centrée sur les mois de juillet et août dont le déficit hydrique cumulé explique à lui seul environ 20 % de la variation des accroissements (tableau 1).

La réponse du **sapin** est très différente. Le signal climatique est essentiellement lié au déficit hydrique de la fin de la saison de végétation précédente (août à octobre). Ainsi, la mise en place du cerne de l'année n dépend en grande partie des arrière-effets c'est-à-dire des conditions de l'année précédente. Un hiver clément semble également jouer un rôle important à travers un effet stimulant des températures clémentes de février et/ou avril. Pour mettre en évidence des effets du déficit hydrique de l'année en cours, il est nécessaire de considérer séparément le bois initial et le bois final dans le cerne annuel. Avec une telle analyse, il apparaît clairement que c'est la mise en place du bois initial de l'année n qui est étroitement dépendante du déficit hydrique cumulé de la fin de saison de l'année n-1. Ce seul facteur explique près de 30 % de la variation de la largeur de ce compartiment. Plus tard dans la saison, c'est l'intensité de la sécheresse du début d'été (juin-juillet) qui module la mise en place du bois final (taux d'explication moyen de 18 %). Comme pour les chênes, la croissance du sapin apparaît donc fortement sous la dépendance des conditions de l'année précédente.
Les résultats sur les résineux sont cohérents avec le modèle général de la réponse des conifères aux basses latitudes ou altitudes qui met en évidence le rôle central de la sécheresse sur la mise en place du cerne. En effet, les 11 peuplements étudiés correspondent à des forêts de basses altitudes (moyenne : 1 004 m) du Sud-Ouest de l'Europe soumises à des climats plutôt « chauds » et humides. Une analyse à plus grande échelle montre que l'importance du bilan hydrique décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la latitude et/ou de l'altitude. Ainsi, en Europe Centrale ou du Nord, l'action du facteur thermique devient prépondérante (effet direct et unique). D'une façon similaire, la sensibilité au facteur thermique augmente selon le gradient altitudinal. La température, à travers notamment les gelées et son effet sur la longueur de la saison de végétation, devient le facteur explicatif essentiel dès que l'on passe les seuils de 1 300 - 1 500 m d'altitude.

Conclusions

Pour les contextes de plaine et de basses altitudes (< 1 000 m) étudiés, c'est bien le bilan hydrique qui joue un rôle central dans la dynamique des peuplements. Ainsi, hêtre et épicéa réagissent fortement à la sécheresse de début de saison alors que les chênes et le sapin semblent être davantage sous la dépendance des conditions de fin d'été ou d'automne. Pour ces deux espèces, des effets thermiques hivernaux sont également

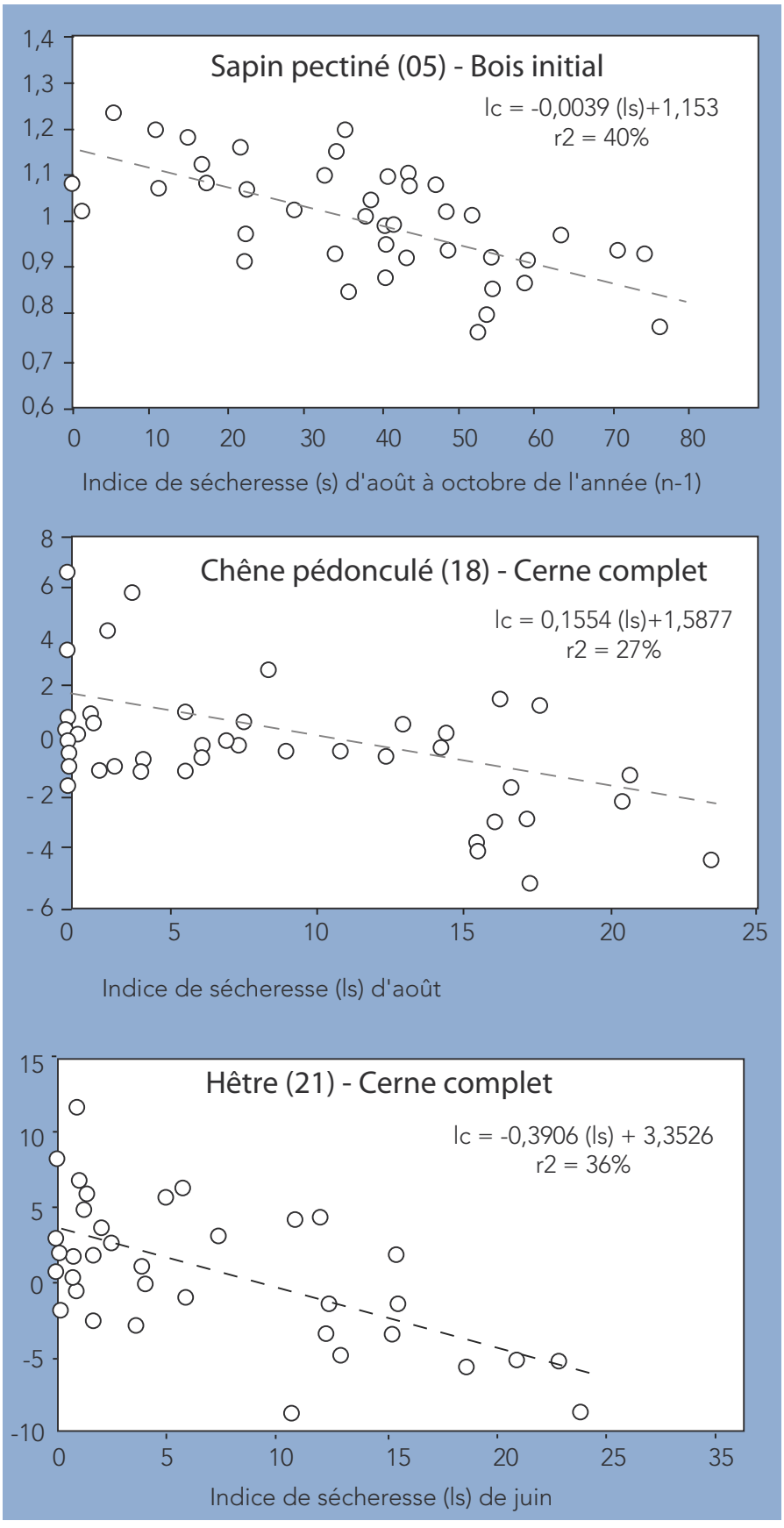


Fig. 3 : exemple de corrélation entre les indices de croissance (Ic) et les indices de sécheresse (Is) pour trois peuplements

Plus la valeur de Is est élevée et plus la sécheresse pour la période correspondante est intense.

souvent observés (effets positifs des températures clémentes). Même s'il est impossible de prédire avec certitude la dynamique future des écosystèmes forestiers dans le cadre du réchauffement climatique et l'augmentation envisagée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, il apparaît cependant très important de bien considérer dès maintenant le choix des essences et l'adéquation avec les stations pour minimiser les risques de dysfonctionnement futur. Un réchauffement hivernal notable ainsi que des modifications des périodes d'apparition des épisodes chauds et secs pourraient donc avoir des conséquences très différentes selon les essences. Pour le hêtre, par exemple, un seuil de 100 mm de réserve utile correspond à un niveau de forte sensibilité aux aléas. Cependant, cette essence a toujours été capable de « récupérer » même sur des stations limites. Cela ne signifie pas que dans les années futures de nouveaux comportements (dépérissements ?) apparaissent suite à des dépassements de « seuils physiologiques » non observés jusqu'à présent. Ainsi, un suivi précis des effets des canicules de juillet 2003 et d'août 2006 devrait apporter des nouveaux éléments quant à la résistance réelle de cette essence à de tels évènements. Il est évident que le même suivi doit être entrepris pour les autres essences, et que le praticien doit être, plus que jamais, à « l'écoute de sa forêt ».

François LEBOURGEOIS,
UMR LERFOB-INRA-ENGREF Nancy,
lebourgeois@engref.fr

La bibliographie complète est disponible auprès de l'auteur. Les résultats détaillés sont disponibles dans des articles publiés dans les revues Trees (2005, 19 : 385-401), Revue Forestière Française (2005, 57 : 33-50 ; 2006, 58 : 29-44 et 419-432) et Annals of Forest Science (2007, 64 : 333-343).

Évolution de la nutrition des peuplements : vers une carence générale en phosphore ?

La diminution généralisée des teneurs foliaires en phosphore sur les placettes du réseau RENECOFOR révèle un dysfonctionnement trophique dont le niveau de gravité est à préciser et dont l'interprétation possible reste fonction des résultats de recherches obtenus par ailleurs. Pour autant, cette diminution renforce l'impérieuse nécessité d'une gestion forestière respectueuse de la ressource « sol » dans le double contexte des changements globaux et de l'intensification de l'exploitation pour le bois énergie.

Maintien de l'alimentation minérale des écosystèmes forestiers, vulnérabilité du système, et impact des activités humaines

L'efficacité du recyclage des éléments nutritifs (via les retombées de litière) et les faibles stocks de certains éléments dans les sols sont deux caractéristiques majeures du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers. La conséquence directe est une forte vulnérabilité de ces écosystèmes à toute perte excessive d'éléments nutritifs (exploitation, acidification, immobilisation…). Selon les sols considérés, leur vulnérabilité peut être très différente. Ainsi en France 4 zones sont particulièrement vulnérables : les Vosges, le massif landais, la Sologne — la forêt d'Orléans, et les Ardennes (Nicolas *et al.*, 2007). Si la restauration de la fertilité des sols forestiers par amendements est possible (Bréthes, 2007), le contexte historique de la gestion forestière en France montre que cette possibilité a été très peu mise en pratique contrairement à d'autres pays européens.

Une autre donnée fondamentale pour situer l'enjeu de notre propos est l'aspect évolutif du fonctionnement des écosystèmes en réponse aux changements globaux actuellement en cours. Deux grands facteurs joueront probablement un rôle majeur dans le potentiel d'adaptation des essences forestières aux changements climatiques : l'alimentation hydrique et l'alimentation minérale. La compréhension du couplage entre ces deux alimentations reste aujourd'hui très fragmentaire et constitue une question de recherche majeure. Enfin la demande de prélèvement de la ressource bois pour le bois-énergie augmente sensiblement et pose la question des limites acceptables pour le maintien de la fertilité des sols.

Ces différents éléments exigent à la fois une approche raisonnée des prélèvements ligneux (Nicolas *et al.*, 2007) pour ne pas dépasser les potentialités des sols, et un suivi à long terme de l'état nutritionnel des forêts. Le réseau RENECOFOR offre la possibilité de décrire l'évolution de l'état nutritionnel de différentes essences forestières depuis 1993. Après une description de cet état initial sur le réseau, l'objet de cet article est d'abord de faire le point sur les évolutions au cours du temps, ensuite de présenter des interprétations possibles des tendances observées ainsi que de pointer des pistes de recherches complémentaires qui seraient nécessaires, et enfin d'en tirer des recommandations pratiques pour les gestionnaires.

Les analyses foliaires : un outil pour évaluer le statut nutritionnel des arbres

Contrairement aux analyses de sol, les analyses foliaires permettent d'apprécier l'état nutritionnel instantané des arbres forestiers et de suivre au cours du temps les déséquilibres éventuels (carences ou excès d'éléments nutritifs) qui peuvent affecter les peuplements. L'avantage majeur de ces analyses réside dans leur caractère intégrateur : de la disponibilité des éléments dans le sol, de leur accessibilité pour les arbres et de la capacité des arbres eux-mêmes à les utiliser dans leur métabolisme. Pour autant, l'interprétation de ces analyses n'est possible que si un protocole de prélèvement des échantillons est rigoureusement respecté tout au long du suivi. De nombreuses sources de variabilité affectent les teneurs foliaires en nutriments parmi lesquelles on retiendra : l'essence, la période dans l'année, l'individu, la hauteur dans l'arbre, l'orientation, l'âge des arbres… Le protocole retenu (voir encadré 1) permet soit de réduire cette variabilité (période dans l'année, position dans l'arbre…), soit d'intégrer certaines sources de variabilité (orientation, différences entre arbres…).

Les nutriments analysés rassemblent les macronutriments d'une part (azote, potassium, calcium, phosphore, soufre, magnésium) et les micronutriments d'autre part (chlore, manganèse, fer, cuivre, zinc, sodium, aluminium). L'interprétation des teneurs foliaires par essence se fait le plus souvent par rapport à des teneurs de référence. Ces références se rattachent à deux sys-

1 - Protocole d'échantillonnage

Depuis 1993, les analyses foliaires sont réalisées annuellement jusqu'en 1999, puis tous les 2 ans sur l'ensemble des 102 placettes du réseau. Les échantillons de feuilles sont prélevés sur 8 arbres par placette pour constituer un échantillon composite. Un deuxième lot de 8 arbres permet de changer de lot d'arbres si les houppiers du 1er lot deviennent trop clairs. Dans ce cas un double échantillonnage est réalisé l'année du changement.

Sur chaque arbre les échantillons sont toujours prélevés au fusil, dans le tiers supérieur du houppier, pour analyser les feuilles les plus actives photosynthétiquement. Au sein de chaque placette les échantillons sont prélevés dans différentes directions pour éviter un biais lié à l'exposition. Les périodes de prélèvement sont identiques pour l'ensemble des années (juillet-août pour les feuillus et novembre-décembre pour les résineux) ce qui permet de ne pas prendre en compte les variations intra-annuelles des teneurs foliaires.

2 - Deux systèmes de référence pour l'interprétation des teneurs foliaires

Le premier système repose sur des critères fonctionnels de diminution de croissance et d'apparition de symptômes visibles (coloration foliaire anormale et pertes de feuilles). Les seuils, définis par élément nutritif et par essence, ont été déterminés grâce à des expérimentations le plus souvent en conditions contrôlées. Ce système français a été adapté d'après Bonneau (1995) et Croisé *et al*. 1999.

Dans ce système, certains seuils manquent simplement du fait de l'absence de mise en évidence expérimentale. C'est notamment le cas pour beaucoup de micronutriments. Malgré la simplicité d'utilisation de ces seuils, deux limitations doivent être soulignées. La première tient au fait que ces seuils ont été déterminés sur jeunes plants. Or nous savons par ailleurs que les teneurs foliaires en nutriments diminuent avec l'âge des arbres. Cela revient à dire que les seuils présentés sont vraisemblablement surestimés par rapport aux seuils réels sur arbres adultes. Depuis les tempêtes de décembre 1999, la régénération naturelle de certaines placettes offre la possibilité de mesurer en parallèle les teneurs foliaires sur arbres adultes et sur jeunes plants. La deuxième limitation tient au fait que, pour réaliser un diagnostic foliaire pertinent, on doit prendre en compte non seulement les teneurs individuelles de chaque nutriment mais également les rapports entre eux. La simple comparaison à des seuils individuels par éléments constitue finalement une première approche mais elle doit être complétée par l'étude de « profils nutritionnels » intégrant l'ensemble des nutriments. Cette approche commence à être explorée dans la recherche mais n'a pas été utilisée pour nos données.

Le deuxième système de référence est mentionné ici à titre d'information, il ne sera pas utilisé. Il ne comporte aucune référence à des critères fonctionnels et définit simplement des gammes de valeurs moyennes entre une borne inférieure et une borne supérieure observée dans 16 pays européens. Ce système trouve son utilité dans des études à l'échelle Européenne.

tèmes dont les objectifs sont nettement différents (voir encadré 2).

État initial (1993 – 1997) : teneurs foliaires élevées en azote et faibles en phosphore

Lors de l'implantation du réseau RENECOFOR, les peuplements ont été sélectionnés en partie d'après leur aspect visiblement sain et l'absence de problèmes phytosanitaires visibles au niveau des houppiers. Malgré ce critère, les analyses moyennes sur les 5 premières années du suivi révèlent des teneurs foliaires élevées en azote et des teneurs au contraire souvent faibles en phosphore sans qu'elles n'entraînent des symptômes visibles de carence (figure 1).

La moitié des placettes présente des teneurs foliaires moyennes en azote supérieures à l'optimum selon le système fonctionnel français (voir encadré 2). Pour le phosphore, 1/3 des placettes présente des teneurs foliaires entre le seuil de carence et le seuil critique (figure 1). On observe presque systématiquement des teneurs inférieures au seuil critique pour les placettes de douglas, de pin sylvestre et maritime. Le seul nutriment présentant ponctuellement une carence claire est le magnésium. Trois sites sont en dessous du seuil de carence : la sapinière en Moselle (SP 57), les hêtraies des Vosges (HET 88) et du Tarn en Montagne Noire (HET 81).

Depuis 12 ans : diminution sensible en phosphore, proche des seuils critiques ou de carence selon les essences

L'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR couvre une gamme étendue d'essences, de sols et de climats. Cette diversité de facteurs permet de décrire l'évolution au cours du temps des

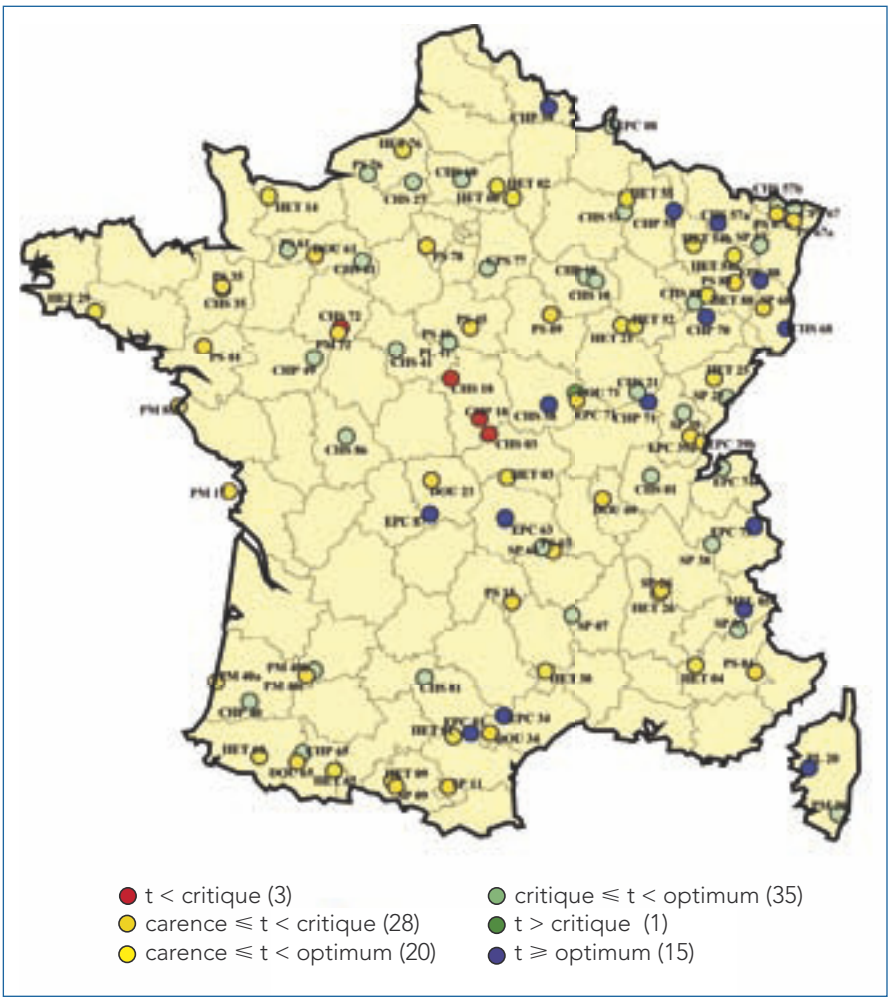


Fig. 1 : teneurs foliaires moyennes (t) en phosphore (1993 – 1997) pour l'essence principale des 102 placettes du réseau

teneurs foliaires soit par placette, soit par groupes de placettes comparables du point de vue nutrition minérale. L'essence et le type de sol (acide ou plus riche) sont les deux principaux facteurs expliquant les différences de teneurs foliaires en nutriments. Les groupes obtenus sont indiqués dans le tableau 1. L'utilisation de ces groupes pour décrire une tendance temporelle est plus robuste que les évolutions site par site à l'échelle du territoire. Par contre, elle présente le risque de ne pas détecter certaines évolutions locales. C'est pourquoi les évolutions au cours du temps ont également été analysées par placette. L'absence de tendance par groupe de placettes peut également résulter de l'existence de sous populations avec des tendances en sens opposé qui se compensent.

Dans une série temporelle de données, toute la variabilité observée n'est pas uniquement due à une éventuelle tendance au cours du temps. Ici, trois sources de variabilité contribuent à la variabilité totale observée : les effets « année », « placette » et « résiduel » (tableau 2 p. 124). Un effet « âge » aurait pu être rajouté, mais on considère qu'il est négligeable sur 15 ans dans la gamme d'âge des arbres des placettes. L'effet « année » ne doit pas être confondu avec la tendance au cours du temps (tendance à long terme). Il est parfaitement possible que la variabilité inter annuelle d'un jeu de données « masque » une certaine stabilité à long terme ou, au contraire, une forte tendance temporelle.

L'analyse par groupe de placettes montre surtout une diminution des teneurs foliaires en phosphore (figure 2 p. 124) de 12 % à 19 % selon les essences. Pour le hêtre, cette diminution est d'autant plus marquée que les sols sont acides. Chez les groupes de placettes les plus représentés en effectif, la tendance au cours du temps représente entre 7 % et 13 % de la variabilité globale (tableau 2). On remarquera cependant (résultats non montrés) que la première source de variabilité des macronutriments est liée à la placette dans chaque groupe (l'effet « placette » explique 19 % à 88 % de la variabilité).

Actuellement, les teneurs foliaires en phosphore sont proches, soit des seuils critiques pour les placettes de chênes, de hêtre et de sapin, soit des seuils de carence pour les placettes de pin sylvestre et maritime. Tout en gardant à l'esprit les conditions d'utilisation de ces seuils, et en supposant que la tendance linéaire se poursuivra à l'identique dans les années à venir (hypothèse très simplificatrice) l'extrapolation des tendances suggère l'atteinte du seuil critique dans 9 ans pour les placettes de chêne pédonculé, et l'atteinte du seuil de carence dans respectivement 4, 13, 20 et 27 ans pour les placettes de pin maritime, de pin sylvestre, de hêtre sur sol acide et de sapin.

Pour les autres macronutriments les résultats significatifs vont généralement dans le sens d'une diminution des teneurs foliaires sauf pour le potassium dont la teneur foliaire augmente avec le temps dans les peuplements de résineux. Une légère tendance à la baisse des teneurs foliaires en azote doit être relevée en précisant que ces valeurs restent globalement élevées et le plus souvent au-dessus des valeurs

Groupes	Nb	Masse foliaire	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Cl
Chêne pédonculé - Sols acides	9				↘	↘	(↘)			↗
Chêne sessile - Sols acides	22		↘		↘↘					↗
Hêtre - Sols acides	18	↗	(↘)		↘↘↘↘		↘			↗↗
Hêtre - Sols eutrophes	8				↘	↘				↗
Douglas - Sols acides	6		↘					(↗)		
Épicéa - Sols acides	12		(↘)			(↘)				
Épicéa - Sols eutrophes	3	↗	↘			(↘)			↗	
Pin maritime - Sols acides	5				↘↘↘	(↗)				
Pin sylvestre - Sols acides	14				(↘)					
Sapin pectiné -Sols acides	6		(↘)		↘			↗↗		
Sapin pectiné - Sols eutrophes	5		↘↘							

Tab. 1 : évolution temporelle (1993 à 2005) des teneurs foliaires en macro nutriments pour les différents groupes de peuplements

L'augmentation « ↗ » ou la diminution « ↘ » sont indiquées avec leur degré de signification comme suit, P < 0.1 : (↗) ou (↘), P ≤0.05 : ↗ ou ↘, P ≤0.01 : ↗↗ ou ↘↘, P ≤0.001 : ↗↗↗ ou ↘↘↘, P ≤0.0001 : ↗↗↗↗ ou ↘↘↘↘. L'absence de flèche indique la stabilité.

optimales. Le cas du soufre est remarquable par l'absence de tendance significative malgré une forte réduction des apports atmosphériques enregistrée sur le réseau (voir Coddeville, Ulrich *et al.*, ce volume). Cette constatation peut être liée à un effet différé dans le temps de l'accumulation de soufre des 150 dernières années.

Les micronutriments foliaires présentent des tendances moins claires, sauf pour le chêne sessile sur sols acides dont les teneurs en Mn, Zn et Cu diminuent avec le temps. Les teneurs foliaires en Cl augmentent au cours du temps chez les feuillus.

L'analyse par placette aboutit globalement aux mêmes conclusions, et confirme notamment la diminution de phosphore foliaire avec 40 % des placettes concernées par cette diminution. Elle précise les résultats pour le soufre, en montrant que la diminution est effective sur les placettes pour lesquelles les dépôts sont les plus élevés.

Interprétations possibles de la diminution du phosphore foliaire

À elles seules, les mesures réalisées sur le réseau RENECOFOR ne permettent pas d'interpréter la diminution du phosphore foliaire. Une démarche de modélisation mécaniste, reposant sur des processus biologiques serait nécessaire pour mieux comprendre l'enchaînement conduisant à une telle évolution. Passons en revue les différentes hypothèses extraites de travaux de recherche.

Une première interprétation pourrait être liée à un effet « âge ». Nous savons que généralement les teneurs foliaires diminuent des jeunes plants aux arbres adultes. Il est cependant peu probable que cette explication ait un poids important dans

	% de la variance totale expliquée par			
	Effet linéaire du temps	Effet année	Effet placette	Effet résiduel
Chêne sessile	13	5	70	12
Hêtre	7	1	58	34
Pin sylvestre	10	16	60	14

Tab. 2 : proportion de la variance totale des teneurs foliaires en phosphore expliquées par différents effets dans le cas des placettes sur sol acide de chêne sessile, de hêtre et de pin sylvestre

notre suivi qui a porté sur des arbres déjà adultes au début du réseau (à l'exception des pins maritimes, épicéas du Massif Central et douglas).

Une autre interprétation plus probable met en jeu à la fois les caractéristiques du cycle du phosphore et les besoins accrus d'éléments nutritifs pour la croissance conduisant finalement à un déficit en phosphore par excès d'azote. Le cycle du phosphore (P) dans les écosystèmes forestiers est quasiment fermé, ce qui veut dire que les apports soit atmosphériques, soit par la roche mère sont extrêmement faibles, que le P est recyclé très efficacement par le retour des litières au sol, et que les formes du P accessibles dans le sol pour les arbres sont très peu abondantes. Ces caractéristiques impliquent que toute exportation excessive liée à une exploitation trop forte présente un risque d'appauvrissement en P pour l'écosystème. L'exploitation de bois représente la forme la plus directe d'exportation et donc de perte de phosphore pour l'écosystème, mais d'autres formes existent et sont reliées à l'acidification et l'eutrophisation des milieux.

L'eutrophisation correspond à des apports excessifs d'azote dans le milieu ; cela contribue à la stimulation de la croissance (avec l'augmentation de CO_2 atmosphérique et l'augmentation concomitante de la température moyenne annuelle) et augmente simultanément les besoins de tous les éléments nutritifs qui peuvent alors devenir limitants selon leur disponibilité dans le sol. La diminution du phosphore foliaire pourrait être due en partie à ce déséquilibre. L'augmentation de la productivité moyenne des arbres forestiers depuis le début du 20e siècle a été mise en évidence en France et dans presque toute l'Europe (Augusto et Dambrine, 2001 ; Dhôte *et al.*, 2007) avec toutefois de fortes différences régionales de la tendance en particulier pour le hêtre (augmentation de vitesse de croissance plus forte dans le Nord Est que dans le Nord Ouest ; Dhôte *et al.*, 2007). Il est très intéressant de constater pour cette essence que ces différences régionales sont cohérentes avec des dépôts d'azote plus importants dans le Nord Est que dans le Nord Ouest mis en évidence avec les

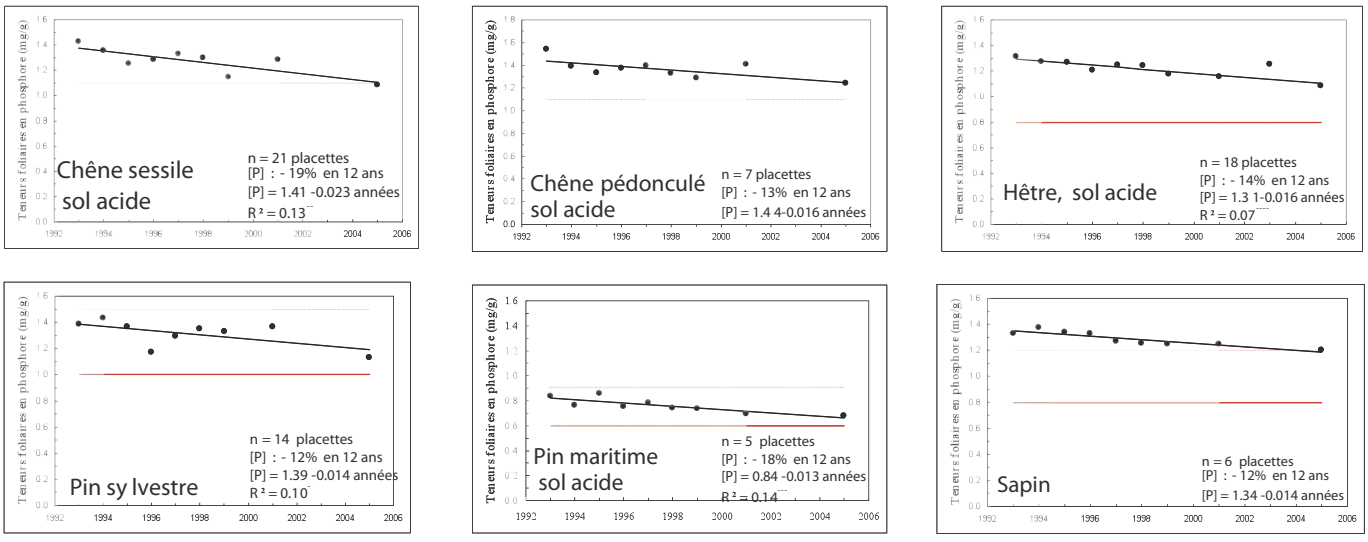


Fig. 2 : évolution des teneurs foliaires en phosphore au cours du temps dans différents groupes de placettes RENECOFOR

Les traits fins rouges indiquent les seuils critiques (quand ils sont connus) et les traits épais rouges les seuils de carence. Pour le hêtre, les placettes belges et du Luxembourg sont comprises dans le jeu de données (d'où une valeur en 2003, année où les analyses n'ont pas été réalisées en France). « [P] : » donne la tendance calculée sur 12 ans ; « [P] = » correspond à la régression linéaire.

mesures de dépôts sur le réseau RENECOFOR (Croisé *et al.*, 2005).

Quant au mécanisme d'acidification des écosystèmes forestiers, il peut également contribuer à un déficit d'alimentation en phosphore par immobilisation de ce dernier sous des formes indisponibles dans le sol. L'acidification repose pour une large part sur les apports atmosphériques d'azote et de soufre. Les mesures réalisées sur le réseau RENECOFOR montrent une réduction importante des dépôts de soufre mais qui ne se retrouve pas encore de manière très nette au niveau des analyses foliaires. Les dépôts d'azote par contre restent sensiblement constants (Ulrich *et al.*, 2007), ils continuent à contribuer à l'acidification des sols et pourraient expliquer une diminution de la disponibilité en phosphore pour les arbres.

Une autre cause possible de diminution du phosphore foliaire serait une réduction de disponibilité du phosphore dans le sol par une diminution de l'activité mycorhizienne qui contribue normalement pour une large mesure à son assimilation racinaire. Les changements climatiques avec la diminution de la teneur en eau du sol réduisent également le transport par diffusion du phosphore dans le sol, et peuvent conduire à des difficultés d'alimentation des arbres.

Nous savons par ailleurs que les changements climatiques induisent un allongement de la saison de végétation, notamment par un débourrement plus précoce. Il est possible que les variations saisonnières des teneurs foliaires en nutriments soient affectées par les changements climatiques. En continuant à prélever toujours aux mêmes périodes dans l'année (juillet – août pour les feuillus), il n'est pas exclu qu'on assiste à une dérive des teneurs simplement liée au décalage phénologique.

Il ressort finalement de ces connaissances deux candidats principaux pour expliquer la diminution des teneurs foliaires en phosphore : les dépôts atmosphériques d'azote qui agissent simultanément sur la croissance des arbres et sur la disponibilité en phosphore dans le sol, et les changements climatiques jouant sur la disponibilité en phosphore dans le sol.

Quelles implications pour le gestionnaire ?

La diminution des teneurs foliaires en phosphore est suffisamment générale en France pour engager des mesures de préservation des sols, non seulement sur les sols les plus sensibles à la perte d'éléments minéraux nutritifs (Vosges, Landes, Sologne, forêt d'Orléans, Ardennes…), mais également sur l'ensemble des sols forestiers qui sont, rappelons-le, globalement pauvres par rapport aux sols agricoles. La mise en évidence de cette diminution apporte un nouvel élément chiffré montrant la nécessité de prendre des mesures de gestion pour conserver une fertilité compatible avec une productivité forestière soutenue pour les générations à venir.

Deux domaines d'action sont incontournables : maîtriser les impacts de l'exploitation sur la ressource minérale du sol, et diminuer fortement des dépôts atmosphériques d'azote. Ce dernier point relève avant tout des réglementations de réduction des émissions d'azote. Par contre, le forestier dispose de moyens pour limiter les exportations d'éléments minéraux des écosystèmes forestiers. Ces écosystèmes fonctionnent d'un point de vue nutritif en flux tendu (les stocks nutritifs sont très faibles par rapport aux besoins des arbres) et un recyclage efficace des éléments nutritifs (sol, bois, feuilles, litière, sol…) doit être préservé. Dans l'optique du développement du bois énergie, les mesures suivantes contribuent à la préservation de la fertilité des sols (voir pour plus de détails le guide de l'Ademe pour la récolte raisonnée des rémanents en forêt : Cacot *et al.*, 2006 ; Nicolas *et al.*, 2007) :

- avant toute exploitation pour le bois énergie, évaluer les potentialités du sol ;
- raisonner la fréquence d'exploitation selon l'essence, l'âge, les types de peuplements et de la sensibilité des sols à un appauvrissement minéral (document ADEME) ;
- sur feuillus, exploiter de préférence hors période feuillée, mais dans ce cas la question du tassement des sols doit être prise en considération ;
- laisser sécher sur place au moins 3 mois les branchages avant broyage pour ne pas exporter les feuilles et les brindilles (ce qui conduit par la même occasion à une meilleure qualité des plaquettes forestières) ;
- réaliser un suivi rigoureux des exploitations (dates et conditions de mise en œuvre) dans le sommier ; ces éléments seront indispensables pour mieux comprendre des baisses éventuelles de productivité.

En conclusion

Vers une carence générale en phosphore ? Deux éléments de réponse :

1) Les résultats présentés montrent clairement une diminution sensible des teneurs foliaires en phosphore aussi bien chez les feuillus que chez les résineux analysés. Cette diminution est plus marquée sur les sols les plus pauvres et acides mais elle est également décelable sur des sols moins pauvres.
2) Par contre il est indispensable de préciser la validité des seuils critiques et de carence pour des arbres adultes avant d'être réellement en mesure de prédire une carence généralisée en phosphore. Pour cette raison la poursuite des

analyses foliaires, des observations phytosanitaires et de la croissance des arbres est indispensable sur la régénération en parallèle avec les peuplements adultes pour mieux définir ces seuils.

En tout état de cause, les teneurs foliaires en phosphore représentent actuellement un indicateur de l'état nutritionnel des arbres et soulignent clairement l'amorce d'un dysfonctionnement qu'il est indispensable de prendre en compte dès à présent dans une gestion plus que jamais respectueuse de la ressource minérale des sols et du recyclage des éléments nutritifs empruntés par les arbres au sol.

Luc CROISÉ
ONF - Département Recherche
luc.croise@onf.fr

Mathieu JONARD
Université catholique de Louvain-la-Neuve, Belgique
Unité des Eaux et Forêts
jonard@efor.ucl.ac.be

Bibliographie

AUGUSTO L., DAMBRINE E., 2001. L'acidification dans le massif vosgien : comprendre les mécanismes et apporter des solutions. Brochure INRA, 38 p.

BONNEAU M.,1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF ed., 367 p.

BRÊTHES A., 2007. Restaurer la fertilité et l'activité des sols forestiers dégradés. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 18, pp. 58-72

CACOT E. (Coord.), EISNER N., CHARNET F., LÉON P., RANTIEN C., RANGER J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers : ADEME. 36 p.

CROISÉ 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. Fontainebleau : ONF. 413 p.

CROISÉ L., ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2005. Le suivi des dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers en France. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 7, pp. 4-10

DHÔTE J-F., BONTEMPS J-D., HERVÉ J-C., RITTIÉ D., VALLET P., 2007. Changements de productivité à long terme dans les hêtraies du Nord de la France. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 3 « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques », pp. 74-80

NICOLAS M., CHARNET F., RANGER J, RANTIEN C., BRÊTHES A., MENGIN-LECREULX P., SARDIN T., 2007. Bois-énergie : maîtriser les impacts. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 15, pp. 36-45

Relation entre les stades phénologiques et les variables climatique

Cette présentation a déjà été publiée dans le N° 13 des Rendez-Vous techniques sous le titre "Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR : Variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique".

La phénologie des essences forestières a été jusqu'à présent très peu étudiée. Le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) constitue actuellement la base forestière la plus complète en terme de diversité d'essences (10 espèces), de répartition géographique (peuplements adultes en conditions naturelles répartis sur l'ensemble du territoire) et du nombre d'années (observations depuis 1997). En 2005, une étude a été entreprise afin de dresser un bilan de la variabilité interspécifique et spatiale des cycles de feuillaison des peuplements du réseau et d'élaborer des modèles liant les différentes phases (débourrement et jaunissement) aux données géographiques, stationnelles et météorologiques disponibles. Cet article présente les principaux résultats de ce travail.

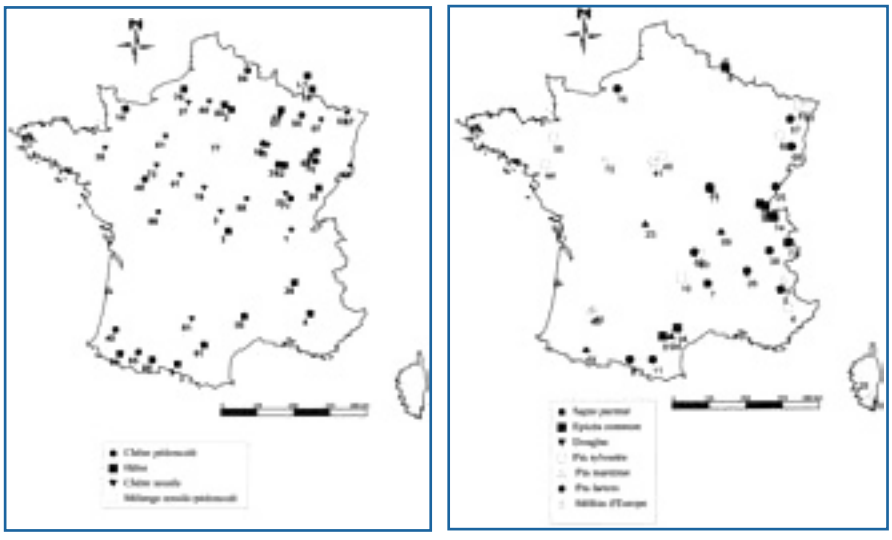


Fig. 1 : localisation géographique des peuplements du réseau RENECOFOR
Le chiffre indique le numéro de département

Parmi les 102 peuplements constituant le réseau, seuls les 89 sites (47 feuillus et 42 résineux) ayant fait l'objet d'au moins 3 années d'observation sur la période 1997-2003 ont été pris en compte (547 observations au total) (Figure 1). Près de 90 % des peuplements disposent d'au moins 5 années d'observation et 51 % d'une série complète de 7 ans. Les différents modèles ont été calculés sur les 79 peuplements disposant de données climatiques proches des sites : altitudes comparables et données thermique et/ou d'insolation homogènes et continues sur la période (sources : réseau Météo-France ou RENECOFOR). Sur chaque peuplement et pour chaque année, les observations ont été réalisées hebdomadairement, de mars à juin pour le débourrement et de septembre à novembre pour le jaunissement. Plus de 70 % des observations ont été faites à l'aide de jumelles. Les notations se rapportent aux dates de l'année (exprimées en jour julien, c'est-à-dire en nombre de jours à partir du 1er janvier) pour lesquelles une proportion donnée des 36 arbres « observation » de chaque peuplement a atteint un stade de développement précis.

Pour chaque événement du cycle, deux dates sont considérées :

- Au printemps (pour toutes les espèces), la première date (dd1) correspond à la date à laquelle 10 % des arbres présentent sur au moins 20 % du houppier des bourgeons ouverts avec l'apparition des premières petites feuilles ou aiguilles. La seconde (dd9) correspond au jour julien auquel 90 % des arbres présentent ces caractéristiques.
- A l'automne, la première notation (jj1) correspond à la date à laquelle 10 % des arbres présentent un début de jaunissement sur au moins 20 % du houppier. A la seconde date (jj9), 90 % des arbres présentent ces caractéristiques.

À partir de ces 4 dates, 4 durées (longueurs) de la saison de végétation (lsv) ont été définies. Pour les modèles, ce sont les valeurs moyennes calculées sur les 7 années qui ont été prises en compte.

Saison de végétation : différences géographiques et entre espèces

Sur la période 1997-2003, la saison de végétation débute en plaine entre la première et la troisième semaine d'avril. En contexte montagnard, elle débute plus tardivement dans les 15 premiers jours de mai. La fin de la saison correspond à la troisième semaine d'octobre (jaunissement 90 %) et la saison de végétation dure généralement entre 180 et 200 jours (feuillus uniquement). Elle est plus longue dans le Sud et l'Ouest que dans l'Est et le Nord (décalage de plus d'un mois pour certaines années). Il apparaît également un effet espèce très fort dans les cycles phénologiques. (Figures 2 et 3 et Tableau 1) Ainsi, le débourrement des chênes est plus précoce d'environ 15 jours par rapport à celui du hêtre : fin de la première semaine d'avril pour les

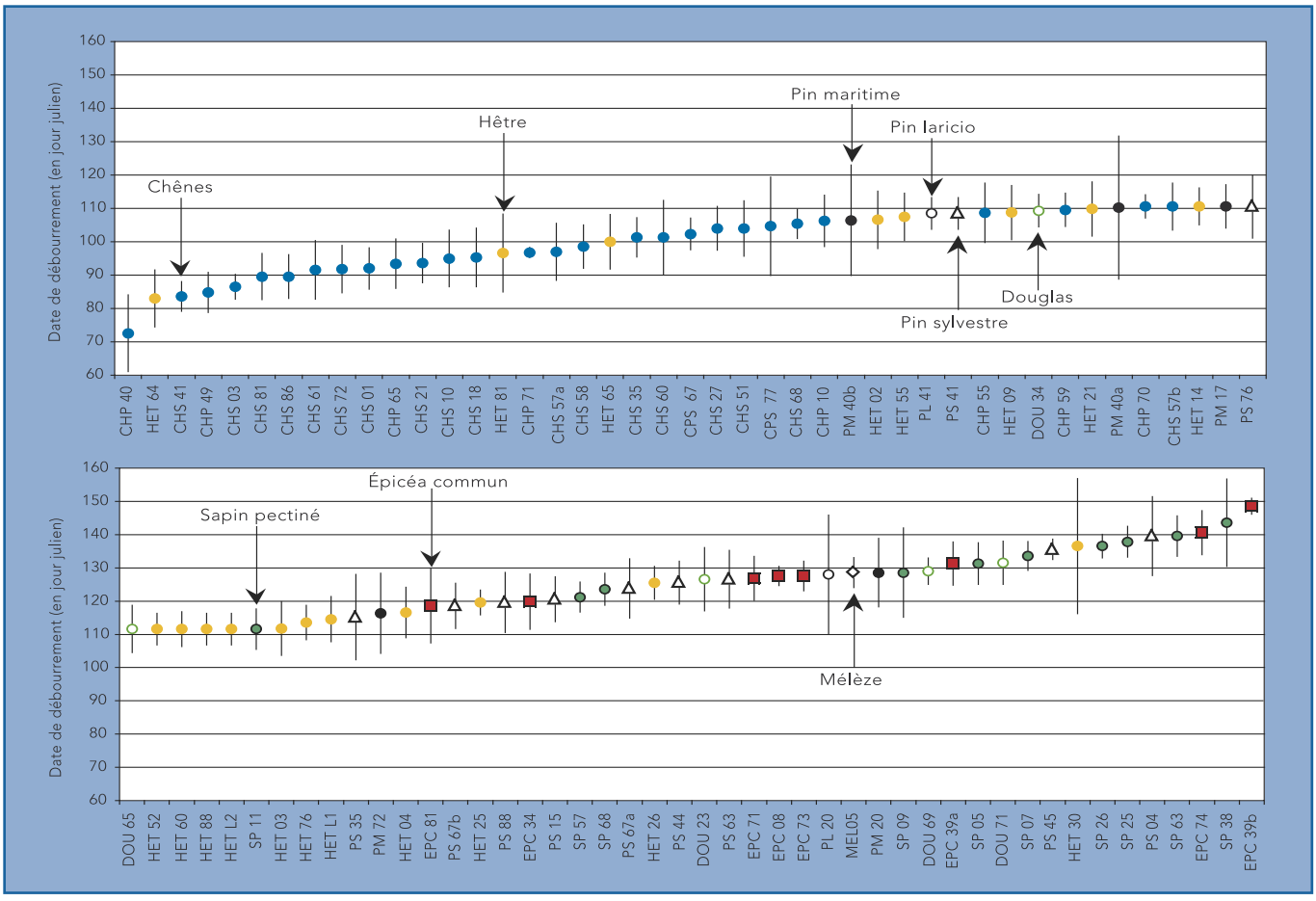


Fig. 2 : classement par ordre croissant des 89 peuplements selon la date moyenne de débourrement (stade 10 %)
La barre verticale représente l'écart-type (période 1997-2003)

Espèce	Nb peupl.	Nb. Obs.	Débourrement stade 10 %	Jaunissement stade 90 %	Durée (jours) Saison vég.
Chêne sessile *	20	110	6 avril (10)	24 octobre (10)	201 (16)
Chêne pédonculé	8	47	8 avril (15)	25 octobre (13)	201 (25)
Hêtre	19	120	21 avril (13)	17 octobre (16)	179 (23)
Pin maritime	5	29	25 avril (15)		
Pin laricio de Corse	2	10	30 avril (17)		
Douglas	5	32	2 mai (11)		
Pin sylvestre	11	70	3 mai (12)		
Mélèze d'Europe	1	7	9 mai (5)	10 octobre (5)	158 (8)
Épicéa commun	8	53	10 mai (12)		
Sapin pectiné	10	63	12 mai (11)		

* y compris les deux peuplements mélangés CHS/CHP

Tab. 1 : dates moyennes des évènements phénologiques par espèce (période 1997-2003).
Les valeurs entre parenthèses correspondent aux écarts moyens en jours

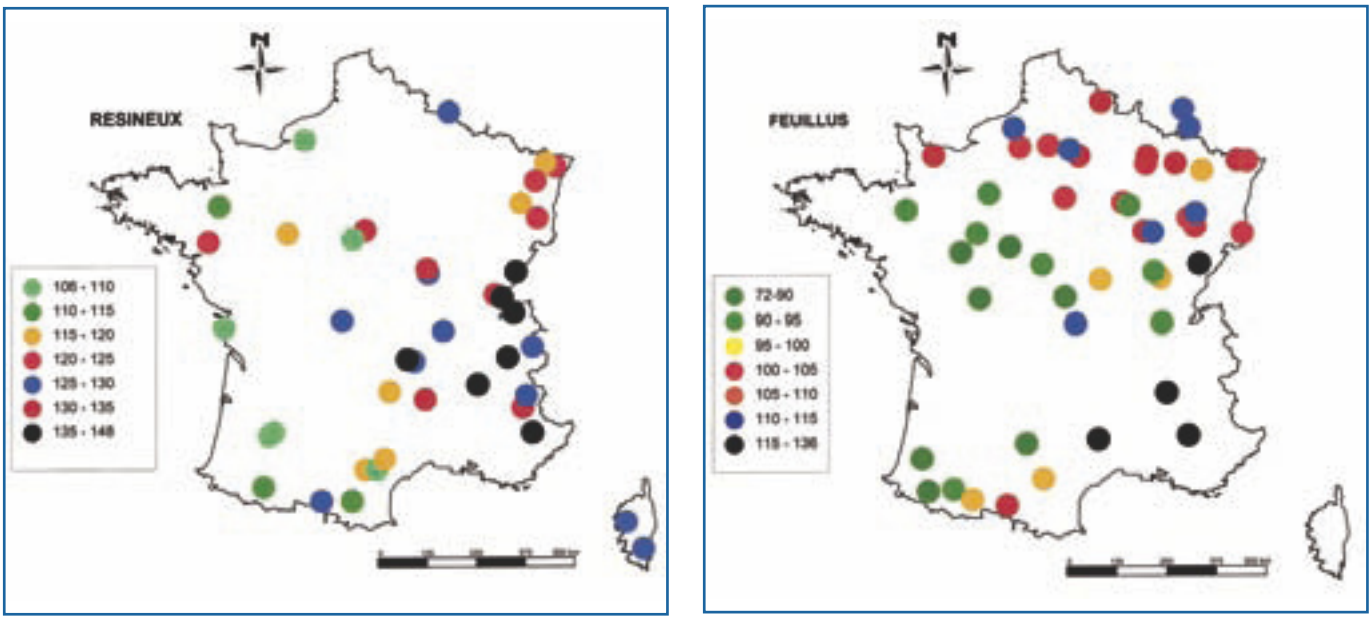


Fig. 3 : dates moyennes du débourrement (stade 10 % exprimé en jour julien ; période 1997-2003) pour les résineux (carte de gauche) et les feuillus (carte de droite)

chênes contre troisième semaine pour le hêtre. Le jaunissement des chênes étant plus tardif que celui du hêtre, la durée de la saison est plus longue de près de 20 jours pour les chênes. Le débourrement des résineux apparaît globalement plus tardif mais comme la majorité des peuplements est localisée en contexte de montagne l'effet altitude joue certainement un rôle majeur. Pour l'épicéa et le sapin (altitude moyenne des peuplements = 1 000 m), le débourrement a lieu en moyenne vers le 10 mai.

Les données du réseau ont permis de construire des modèles liant la phénologie aux variables environnementales

En étudiant statistiquement le lien entre variables environnementales et stades phénoloqiques, nous avons constaté qu'il est plus facile de prédire la date de débourrement que celle du jaunissement. Pour le débourrement, la date correspondant au stade 10 % a été plus facile à modéliser que celle du stade 90 %. Pour le jaunissement, c'est le stade 90 % qui a permis d'obtenir les meilleurs modèles. Concernant la longueur de la saison de végétation, c'est la durée comprenant ces deux stades qui a été une des mieux prédites.

Pour les peuplements étudiés, une augmentation de 100 m d'altitude se traduit par un retard de débourrement de 2 jours (gamme 15 à 1 850 m) et une réduction de 3 jours de la longueur de la saison de végétation (Figure 4). Une augmentation de 1 °C de la température (printanière ou annuelle) se traduit par une précocité de 6 jours du débourrement et une augmentation de 10 jours de la saison de végétation (Figure 4). Le jaunissement est retardé d'environ 5 jours par degré d'augmentation de température automnale.

Concernant les modèles plus complexes, la date de débourrement et la durée de la saison de végétation peuvent être prédites avec une assez grande précision (entre 5 et 7 jours) avec quelques paramètres facilement accessibles : l'altitude, la latitude, l'essence (feuillus ou résineux) et la température de mars. Le meilleur modèle global fait intervenir ces 4 paramètres et explique plus de 80 % de la variabilité de la date de débourrement avec une erreur de l'ordre de 7 jours (Figure 5). Les modèles interspécifiques font également ressortir le rôle central de ces trois paramètres, notamment pour le hêtre dont la date peut être prédite à trois jours près. La photopériode semble également jouer un certain rôle (bien que secondaire) car le rayonnement global et/ou la durée d'insolation apparaissent significatifs dans certains cas. Par exemple, pour le sapin, la date moyenne de débourrement est prédite à moins de 3 jours près en associant la latitude et la durée d'insolation de janvier-février.

Conclusions

Ces sept années d'observation ont permis, pour la première fois au niveau national, de préciser la variabilité interspécifique et régionale de la phénologie des principales essences forestières. Les résultats très intéressants déjà obtenus mettent clairement en évidence la nécessité de maintien de telles observations dans les peuplements forestiers : de longues séries d'observations sont indispensables pour bien cerner les mécanismes qui gouvernent actuellement les différentes phases phénologiques des arbres. Elles le sont plus encore pour comprendre et « prédire », dans la mesure du possible, la réaction des écosystèmes forestiers aux variations du climat déjà observées et prévues pour l'avenir.

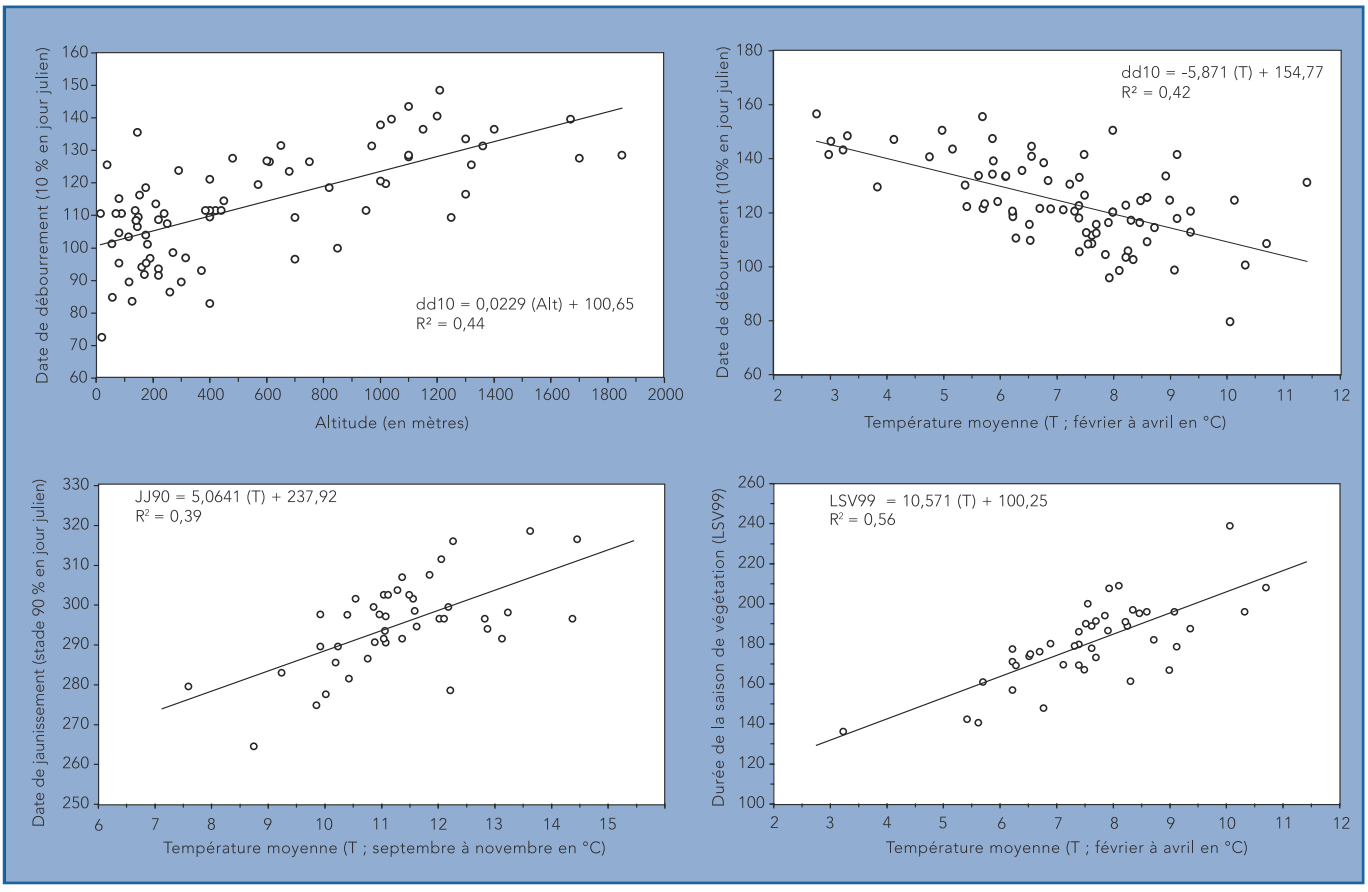


Fig. 4 : relations directes entre les cycles phénologiques et les variables altitudinale et thermique

Le jaunissement et la longueur de la saison de végétation ne concernent que les feuillus. Chaque point est la moyenne sur la période 1997-2003 du stade phénologique considéré pour un peuplement.

François LEBOURGEOIS,
Jean-Claude PIERRAT,
Philippe GODFROY
LERFOB-INRA-ENGREF Nancy,
lebourgeois@engref.fr

Erwin ULRICH,
Sébastien CECCHINI,
Marc LANIER
ONF Département Recherches
prenom.nom@onf.fr

Bibliographie

La bibliographie complète est disponible auprès des auteurs

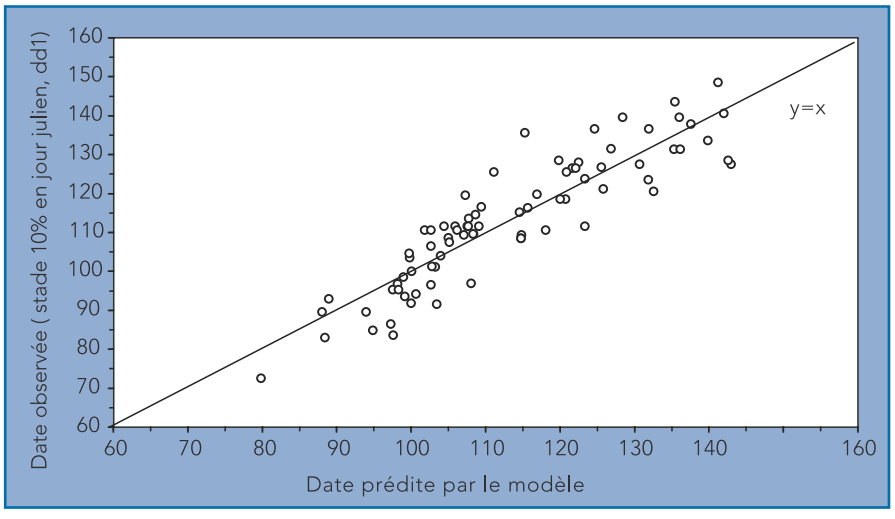
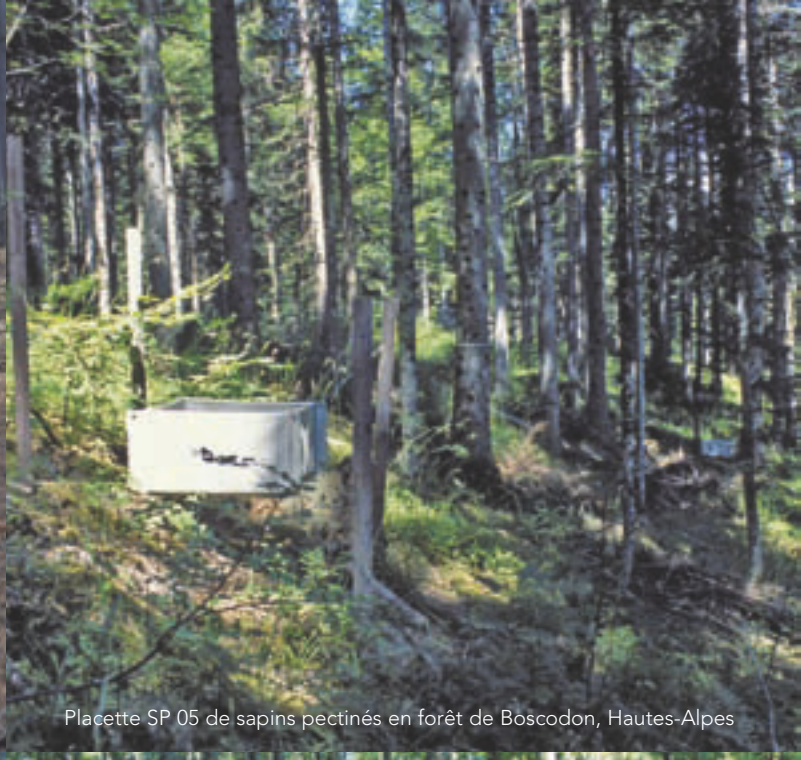


Fig. 5 : relation entre les dates observées et les dates prédites par le modèle pour l'ensemble des 79 sites

La distribution est assez proche de l'idéal que représente la droite y = x ; l'équation réelle est :
Date prédite = -9,9764 + 16,1006 (espèce) + 0,0201 (altitude) + 2,524 (Latitude) – 1,7158 (Tmoy mars)
Avec : espèce = 0 pour les feuillus et 1 pour les résineux ; altitude en m, latitude en degrés, température moyenne en ° C.

Placette PL 20 de pins laricio en forêt d'Aïton, Corse



Placette SP 05 de sapins pectinés en forêt de Boscodon, Hautes-Alpes

Placette SP 25 de sapins pectinés en forêt de Ban, Doubs

Placette HET 25 de hêtres en forêt de la Verrière du Gros Bois, Doubs

Placette CHS 03 de chênes sessiles en forêt de Tronçais, Allier

Placette DOU 71 de douglas en forêt d'Anost, Saône-et-Loire

Ateliers sur les questions émergentes Présentation

Pour cette sixième session, les participants au colloque étaient invités à se répartir en 3 ateliers de débat et réflexion. Ne sont rappelées ici que les indications du programme sur le thème et l'animation de ces ateliers, dont la restitution s'inscrit dans la huitième et dernière session, consacrée aux « enjeux et perspectives ».

Atelier « bioindication »

Par leur présence, certaines espèces ou groupes d'espèces (végétales, animales) traduisent un état particulier d'un milieu donné. Des évolutions du milieu se répercutent sur ces espèces « bio-indicatrices » et en particulier les plus sensibles d'entre elles. Dans cet atelier les besoins émergents en matière de bio-indication seront débattus à l'exemple de la composition floristique, de l'ozone, des métaux lourds et de la macrofaune dans les sols.

Animateurs : Jean-Claude Gégout (ENGREF, Équipe Écosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage, Nancy), Patrick Lavelle(Université Paris VI, VII et XII, Laboratoire d'Écologie des Sols Tropicaux) Laurence Dalstein (Groupe International d'Études des Forêt Sud Européennes, Nice), Madeleine Günthardt-Goerg (Institut Fédéral de Recherche sur la forêt, la neige et le paysage, WSL, Suisse).

Atelier « modélisation »

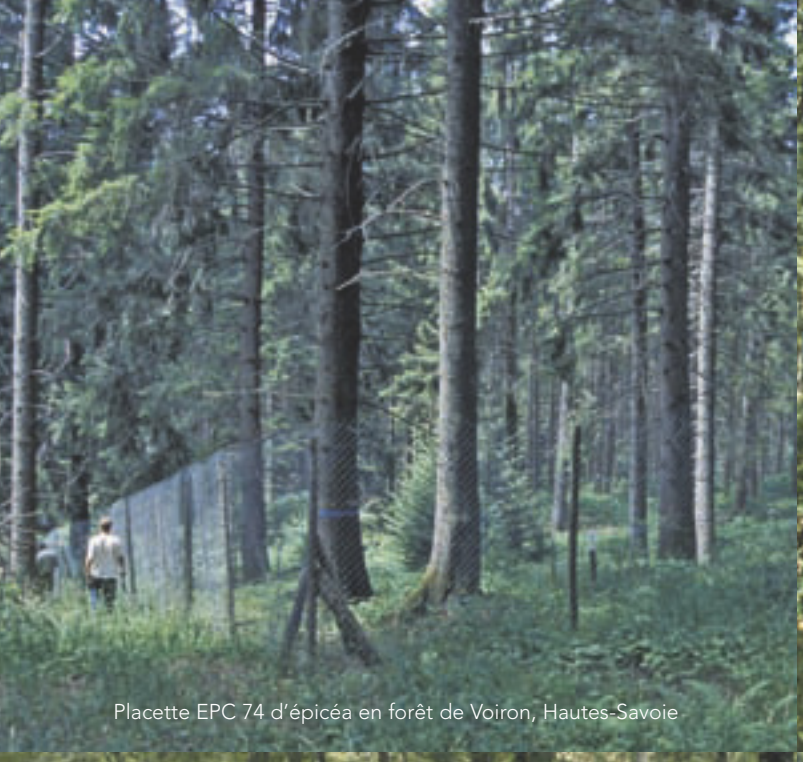
Un modèle dans le cadre de la recherche forestière est un e fonction mathématique qui traduit les lois de la nature et permet de caractériser un paramètre là où la mesure est difficilement accessible. Ces modèles représentent des outils utiles pour une meilleure compréhension des processus biologiques. Ils facilitent également le calcul d'indicateurs clés. Dans cet atelier les besoins émergents en matière de modélisation et utile pour la surveillance des forêts seront débattus à l'exemple de modèle hydriques et hydrochimiques ainsi que de modèles de croissance.

Animateurs : Vincent Badeau et Jean-Luc Dupouey (INRA, Équipe Phytoécologie forestière, Nancy), Jean-François Dhôte, ENGREF, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt/Bois, Nancy), François Lebourgeois (ENGREF, Équipe Écologie Forestière, Nancy).

Atelier « Comment améliorer l'observation des effets des changements globaux sur la forêt ? »

Pas d'indication particulière sur le thème cet atelier dont l'intitulé est suffisamment explicite.

Animateurs : Nathalie Bréda (INRA, Équipe Phytoécologie Forestière, Nancy), Jean-François Dobremez (professeur émérite, Université de Savoie), Guy Landmann (GIP ECOFOR, Paris), Myriam Legay (Interface INRA, Équipe Phytoécologie Forestière, Nancy et ONF, Département Recherche, Fontainebleau).



Placette EPC 74 d'épicéa en forêt de Voiron, Hautes-Savoie

Placette HET 30 de hêtres en forêt d'Aigoual, Gard

Placette HET 14 de hêtres en forêt de Cerisy, Calvados

Placette EPC 71 d'épicéa en forêt de Glenne, Saône-et-Loire

Placette SP 25 de sapins en forêt de Ban, Doubs

Placette SP 38 de sapins en forêt domaniale de Saint Hugon, Isère

Collaboration de longue durée entre l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts du Grand-Duché de Luxembourg

Suite à la prise de conscience internationale du lien entre la vitalité des forêts et la pollution atmosphérique, les pays d'Europe centrale ont pour la plupart lancé dans les années 80 des programmes pour suivre et évaluer en détail l'état de santé de leurs forêts. Notamment un réseau de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers a été mis en place au début des années 90 à l'échelle internationale. Quinze ans plus tard, ces observations et expériences ont permis de déceler des variations temporelles, voire même des évolutions globales de certaines caractéristiques relatives aux milieux forestiers. Néanmoins les études des dernières décennies ont bien montré la nécessité de poursuivre les programmes lancés, la connaissance de nombreux mécanismes de ces écosystèmes présentant encore des incertitudes non négligeables.

Avant de se focaliser, dans le cadre précité, sur la collaboration entre l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts du Grand-Duché de Luxembourg, il s'impose de donner un aperçu sur la forêt luxembourgeoise.

La forêt luxembourgeoise en bref

Au Grand-Duché de Luxembourg la surface couverte de forêts s'élève à environ 89 000 hectares, ce qui correspond à un taux de boisement de 34,3 % et à une surface boisée par habitant de 0,20 hectare. Le Luxembourg figure donc, comparé aux pays et régions limitrophes, parmi les territoires les plus boisés.

La forêt bénéficiant du régime forestier, dite publique, concerne 45 %, dont 72 % appartiennent aux communes, 25 % à l'état et 3 % aux établissements publics. La forêt privée représente les 55 % restants. Tandis que l'*Oesling*, la partie nord du pays, se caractérise par un taux de boisement élevé (41,6 %) et par une très forte proportion de forêt privée, le *Gutland* au sud est boisé sur 31,2 % de son territoire et 62 % de cette forêt appartiennent à des propriétaires publics. Il faut noter que la forêt du Grand-Duché est morcelée de façon non négligeable. En effet, les massifs forestiers de surface supérieure à 1 000 hectares représentent 35,5 % de la surface boisée totale et sont situés plutôt au nord.

Quant à sa structure, la forêt luxembourgeoise est constituée majoritairement de futaies (87 %) et 13 % de taillis. Les trois essences hêtre, chêne et épicéa commun se partagent l'essentiel de la surface boisée avec respectivement 30 %, 28 % et 23 %. Les forêts du sud sont en grande majorité feuillues, au nord elles sont par contre largement dominées par des pessières et taillis de chêne.

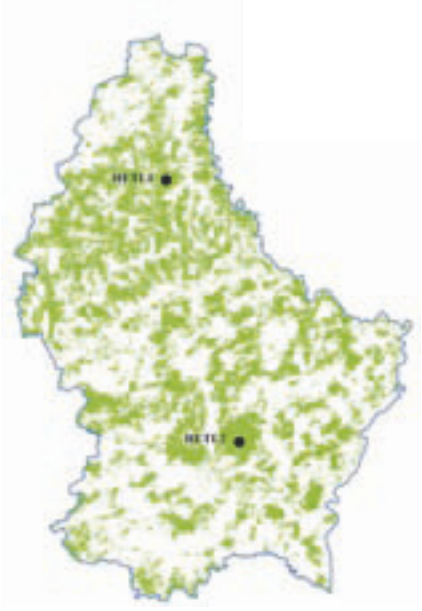
Cadre scientifique et politique international

Suite à une pollution atmosphérique de plus en plus préoccupante provoquant des dégâts étendus dans les forêts européennes, le Grand-Duché de Luxembourg a été, dans le cadre de la conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe (Strasbourg, décembre 1990) un des États signataires de la résolution S1 sur la mise en place d'un réseau européen de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers. Se basant sur les règlements n° 1091/1994 et n° 2152/2003 (Forest Focus), le Luxembourg participe à ce monitoring permanent et intensif à l'intermédiaire de deux placettes de niveau II.

Administration des Eaux et Forêts
Grand-Duché de Luxembourg
Réseau de placettes de suivi à long terme des écosystèmes forestiers au Grand-Duché
EVALUATION DES DONNEES
Année 2001

Le réseau de niveau II au Grand-Duché

Les deux placettes contribuant au réseau européen de placettes permanentes de suivi des écosystèmes forestiers (figure 1, tableau 1) sont installées en



Placette	HET L1	HET L2
Altitude	450 m	385 m
Topographie	terrain en pente (35 %)	terrain plat
Géologie	schistes et grès quartzeux	grès
Pédologie	sol brun faiblement lessivé	sol brun lessivé
Âge de la futaie en 1994	futaie régulière de ±125 ans	futaie régulière de ±110 ans
Structure, essence(s)	étage principal : hêtre et chêne étage secondaire : hêtre et charme	étage unique : hêtre

Fig. 1 et Tab. 1 : localisation et caractéristiques des deux placettes luxembourgeoises de niveau II type « RENECOFOR »

hêtraie puisque le hêtre est l'essence autochtone dominante. Elles sont situées dans deux régions forestières caractéristiques du Grand-Duché : l'une située dans la forêt domaniale du Gruenewald (sur le grès de Luxembourg) dénommée HET L2, l'autre dans la forêt domaniale de Hosingen, au lieu-dit Pënzebierg (en Ardenne) dénommée HET L1. Le choix de la propriété de l'État s'explique par une plus grande flexibilité et simplicité au niveau du travail et des procédures administratives. Ces placettes ont été sélectionnées selon des critères écologiques (station) ou sylvicoles (représentativité de l'essence, homogénéité et âge du peuplement). Cette tâche s'était avérée assez difficile, beaucoup des hêtraies luxembourgeoises ayant présenté, au temps de l'installation, des trouées dues aux chablis de 1990. Les peuplements du Gruenewald et de Hosingen ont donc été deux des rares sites à satisfaire aux critères fixés. À chacune des deux placettes en forêt est associée une placette hors couvert disposant d'une station météorologique.

Le réseau en question permet un suivi permanent et intensif de l'état des forêts afin de mieux connaître le comportement des peuplements forestiers face aux aléas climatiques et à l'évolution de l'environnement atmosphérique.

Coopération avec l'Office national des forêts

En 1992, l'Administration des eaux et forêts a demandé le rattachement des deux placettes luxembourgeoises de niveau II au réseau français RENECOFOR. Elle a opté pour cette collaboration pour plusieurs raisons :
le Grand-Duché s'est engagé au niveau international dans la protection des forêts contre la pollution atmosphérique,
l'administration ne disposait ni du personnel ni de l'infrastructure nécessaires pour réaliser les travaux exigés pour le réseau de niveau II,
le Luxembourg avait toutes les raisons de profiter de la présence du réseau français RENECOFOR déjà existant ainsi que de l'expérience approfondie des spécialistes de l'Office national des forêts dans ce domaine.

La coopération se fait sur base d'un contrat d'assistance technique entre l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts. C'est ainsi que le premier contrat entre les deux partenaires a été signé le 3 mai 1993. Les contrats sont conclus pour une durée de trois ans, les détails techniques et le montage financier sont à leur tour fixés annuellement par avenant.

Sont assurés par l'ONF et ses sous-traitants : les mesures dendrométriques, l'inventaire floristique, les prélèvements pédologiques et foliaires et l'analyse des différents échantillons.

L'assistance technique que l'Office national des forêts apporte à l'Administration des eaux et forêts concerne en outre la supervision scientifique du projet, l'installation du matériel, le traitement informatique des données, la formation du personnel, la formulation des demandes d'aide financière à présenter à l'Union européenne et plus généralement toute action relevant du fonctionnement du réseau, ainsi que l'assistance à la rédaction de rapports annuels.

Marc Wagner

La placette du Gruenewald, près de la ville de Luxembourg (HET L2)

Marc Wagner

Installation de la station météorologique sur la placette de Hosingen (HET L1). De gauche à droite : Jean-Pierre Arend, Erwin Ulrich et Christian Bremer.

Sont assurés par le personnel de l'Administration des eaux et forêts : les notations de défoliation, les observations phénologiques, la collecte de la litière et des eaux de pluie, la collecte des capteurs d'ozone et d'ammoniac, et enfin l'envoi des données au centre de recherche commun de l'Union européenne situé à Ispra (Italie).

Le personnel forestier luxembourgeois réalise donc à son tour la maintenance légère et la surveillance des placettes sous couvert et hors couvert, les travaux d'échantillonnage, certaines observations ainsi que les relations avec les organismes internationaux. L'installation des placettes ainsi que les premières observations et mesures ont été effectuées en 1993.

Relations avec le public

Le suivi des écosystèmes forestiers n'est pas vu comme un projet aux fins uniquement internes. L'Administration des eaux et forêts cherche le contact avec le public et tient bien à lui expliquer les objectifs de ce réseau ainsi que le dispositif des différentes placettes. Le projet réalisé en collaboration avec l'Office national des forêts fait donc l'objet d'interventions régulières dans les médias luxembourgeois.

C'est ainsi que l'Administration des eaux et forêts a inauguré le 27 mai 1994 officiellement les placettes au Grand-Duché en présence du ministre de l'environnement luxembourgeois ainsi que de délégués de l'Office national des forêts et de la Commission européenne. L'administration a également proposé d'accueillir la 13e réunion annuelle du sous-réseau CATAENAT au Grand-Duché. Cette réunion, qui s'est tenue le 16 et 17 mars 2004 a été organisée conjointement par l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts. En outre, le public a la possibilité de s'informer sur le réseau par l'intermédiaire de visites guidées proposées par les triages forestiers.

Enfin le rapport annuel reprenant les données des placettes RENECOFOR ainsi que leurs interprétations est distribué chaque année au personnel de l'Administration des eaux et forêts, aux établissements d'enseignement ainsi qu'aux ministères, administrations et aux centres de recherches directement ou indirectement concernés.

Champ d'application des résultats

Les résultats issus du réseau de suivi à long terme des écosystèmes forestiers trouvent leur champ d'application au niveau international aussi bien qu'au niveau national.

D'abord, ce réseau permet de remplir les obligations et engagements internationaux du Grand-Duché notamment envers la Commission européenne et le PIC Forêt. Les résultats font par exemple l'objet des rapports exécutifs et techniques de la Commission économique pour l'Europe. Le nombre élevé de demandes des données par des organismes de recherche montre d'ailleurs bien l'importance de ce réseau pour les études scientifiques d'envergure internationale.

L'intérêt du réseau RENECOFOR ne se limite pas seulement à la connaissance de l'état actuel des forêts en Europe et des éventuels changements de leur fonctionnement au cours des décennies à venir. Au niveau du Grand-Duché, les résultats à eux seuls sont peu représentatifs. Mais ils permettent néanmoins de fournir un certain

L'écosystème forestier placé sous haute surveillance

Le ministre de l'Environnement, Alex Bodry, et le directeur de l'administration des Eaux et forêts, Edmond Lies, ont présenté hier dans la forêt du Grunewald, une des deux placettes installées spécialement pour le suivi à long terme de l'écosystème forestier.

Les deux placettes permanentes existantes au Grand-Duché ont été réalisées suite à la Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe de 1990 dont le Luxembourg a signé la résolution sur la mise en place d'un réseau européen de suivi de la forêt.

Les deux placettes d'une superficie d'un demi hectare se trouve dans une hêtraie du Grunewald et de la forêt de Hosingen.

Ces instruments de surveillance et de mesures ont pour but de mieux connaître le comportement des peuplements forestiers face aux aléas climatiques et à l'évolution de la pollution atmosphérique.

Les observations concernent les arbres eux-mêmes (croissance, analyses chimiques des feuilles...), le sol (évolution, analyses chimiques...), le climat et la chimie des eaux de pluie.

Sous des apparences très simple de bric et de broc, ce type de placette permet de suivre l'évolution de l'écosystème forestier.

Le Républicain Lorrain du 28 mai 1994 rend compte de l'inauguration des placettes luxembourgeoises

nombre d'informations sur certains processus agissant sur les écosystèmes et aident à mieux les comprendre.

Les résultats acquis peuvent ainsi fournir les bases scientifiques lors des décisions politiques au Luxembourg. Le secteur agricole s'est vivement intéressé aux données sortant des analyses des eaux de pluie, notamment aux concentrations d'azote et de soufre. Dans le domaine de la recherche, les analyses de la litière, permettant de mesurer l'importance et la fréquence de la fructification des arbres, ont fait l'objet de demandes dans le cadre des travaux de recherches relatifs au développement et à la gestion des populations de gibier et à la prolifération du virus Hanta transmis par des rongeurs. De façon générale, les informations provenant des deux placettes luxembourgeoises aident le personnel forestier sur le terrain à mieux interpréter les différents symptômes de dépérissement présents en forêt.

Perspectives

Vu l'importance du rôle que le réseau RENECOFOR joue au niveau du Grand-Duché de Luxembourg aussi bien qu'au niveau international, et vu la nécessité d'étudier d'avantage certains mécanismes des écosystèmes forestiers, il est prévu de poursuivre la collaboration intense et fructueuse entre l'Office national des forêts et l'Administration des eaux et forêts au-delà du programme européen Forest Focus. Le contrat pour la période 2007-2009 vient d'être signé.

Au niveau international, le Grand-Duché a également l'intention de continuer son engagement dans le domaine forestier, notamment en ce qui concerne le PIC Forêt et le programme Life +. L'Administration des eaux et forêts a donc la volonté de poursuivre, après des ajustements éventuels, les travaux de monitoring aussi bien nationaux qu'internationaux relatifs à la pollution atmosphérique.

Claude PARINI
Administration des Eaux et Forêts
Service de l'Aménagement des Bois
et de l'Économie Forestière
claude.parini@ef.etat.lu

Collaboration entre les dispositifs BRAMM et RENECOFOR

Le dispositif BRAMM (Biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par les mousses) est un dispositif de surveillance de la qualité de l'air dont le principal objectif est la cartographie de la pollution de fond à l'échelle nationale (France métropolitaine), sur la base des niveaux de concentrations en métaux accumulés dans les mousses.

Depuis les années 1950, les phénomènes de pollution atmosphérique ont pris une importance croissante aux niveaux environnemental, économique et sociopolitique. Parmi les polluants concernés, les métaux font l'objet d'une attention particulière en raison des risques qu'ils peuvent présenter pour la santé humaine et des dangers liés à leur rémanence dans les écosystèmes. Ces préoccupations ont conduit les pays signataires de la convention de Genève (1979) à s'engager, dans le cadre du protocole d'Aarhus (Danemark, 1998), à une réduction des émissions de certains métaux (cadmium, plomb et mercure) et à encourager la surveillance de leurs dépôts et des niveaux de contamination des différents compartiments de l'environnement.

De nombreux pays tendent à privilégier la surveillance des métaux en utilisant des organismes vivants bioindicateurs, plutôt que des méthodes physico-chimiques souvent plus contraignantes et coûteuses, d'autant plus que le territoire à surveiller est étendu. Les bioindicateurs permettent de rendre compte de l'exposition des organismes vivants aux polluants. Parmi les organismes bioindicateurs, certaines espèces capables d'accumuler de grandes quantités de polluants, et parfois même jusqu'à des niveaux nettement supérieurs au niveau de contamination du milieu environnant, sont aujourd'hui largement utilisées. Parmi ces organismes, les mousses, de par leur contact quasi exclusif avec le milieu aérien (voir encadré), sont reconnues comme d'excellents capteurs des métaux atmosphériques. Leur pérennité ainsi que leur tolérance aux fortes teneurs métalliques en font des témoins continus de la pollution et les rendent disponibles toute l'année pour des études de biosurveillance.

Utilisation des mousses en biosurveillance

Les mousses, de par leurs propriétés morphologiques et physiologiques, sont reconnues comme d'excellents capteurs des métaux atmosphériques. Leur emploi dans la biosurveillance de la qualité de l'air repose sur les caractéristiques suivantes :

- L'absence de système racinaire et de tissus conducteurs développés fait du dépôt atmosphérique (dépôt sec et humide) la principale source en eau et éléments nutritifs. Le substrat a une influence minime dans la nutrition des mousses.
- L'absence (ou le faible développement) de cuticule protectrice ainsi que la finesse des feuilles, qui ne comportent souvent qu'une couche de cellules, accroissent la perméabilité des tissus à l'eau et aux minéraux, incluant les ions métalliques.
- Les parois cellulaires contiennent de nombreux sites de fixation (ligands) chargés négativement qui vont efficacement capturer et retenir les cations[1] métalliques.

De nombreuses études ont montré la parfaite adéquation des mousses pour la cartographie des dépôts élémentaires et la localisation des sources de métaux, bien que l'analyse des métaux dans les mousses ne fournisse pas une mesure directe du dépôt atmosphérique. Les mousses sont surtout utilisées pour mettre en évidence les évolutions spatio-temporelles des dépôts métalliques

La surveillance des dépôts métalliques par les mousses

Le dispositif BRAMM s'inscrit dans un contexte européen de surveillance des dépôts métalliques par les mousses : le programme « *Atmospheric heavy metal deposition in Europe — estimation based on moss analysis* ». Dix éléments métalliques sont suivis en routine : arsenic, cadmium, cuivre,

[1] *Cation = ion chargé positivement*

chrome, fer, mercure, plomb, nickel, vanadium et zinc. Initié dans les années 80 par le Conseil nordique, puis étendu à partir de 1990 à la majeure partie de l'Europe, ce programme est depuis 2001 intégré aux activités du programme international concerté sur le suivi des écosystèmes naturels et grandes cultures (PIC Végétation) au sein du groupe de travail sur les effets de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique à longue distance. Reconduit tous les cinq ans environ (1990, 1995-96, 2000 et 2005-06), ce programme porte actuellement sur environ 7 000 sites de prélèvement répartis dans 32 pays européens. La participation française au programme européen démarre avec la campagne de 1996 (Galsomies *et al.*, 1999 et Gombert *et al.*, 2005 ; voir encadré BRAMM).

Le nombre de sites échantillonnés, au cours de la campagne française 2006, est de 536 sites répartis sur l'ensemble du territoire et autant que possible éloignés de toute source ponctuelle de contamination. Il s'agit de sites ruraux, majoritairement localisés en milieu forestier (93 %).

Les mousses sont prélevées au sol, dans une zone non contaminée et plane, de préférence dans des sites découverts (dans les trouées forestières si elles existent), à plus de 3 m des troncs (pour éviter que les mousses ne soient soumises aux pluviolessivats). En France, la diversité des milieux rend nécessaire l'échantillonnage de cinq espèces de mousses terricoles différentes (figure 1) : *Scleropodium purum*, *Hypnum cupressiforme*, *Thuidium tamariscinum*, *Pleurozium schreberi* et *Hylocomium splendens*. Néanmoins, les 3 premières espèces sont collectées dans 95 % des sites, alors que les deux dernières espèces sont échantillonnées dans seulement 5 % des sites.

Le dispositif BRAMM

Mise en place du dispositif BRAMM
La France a participé aux 3 dernières campagnes européennes, en 1996, 2000 et 2006. La première campagne française est assurée par le laboratoire d'écologie (UMR 7625) de l'université Paris VI, en collaboration avec le LPS (CEA-CNRS). Les deux campagnes suivantes ont été mises en œuvre par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) en collaboration avec des laboratoires publics (LISA, IFREMER et LBE) et privés.
L'ADEME contribue financièrement au fonctionnement et au développement du dispositif depuis 1996.

Objectifs du dispositif BRAMM
Pour la France comme pour chaque pays participant au programme européen, les objectifs de ce dispositif sont les suivants :
• cartographier les valeurs de concentrations élémentaires mesurées dans des mousses collectées en situation de fond sur l'ensemble du territoire national ;
• localiser les sources importantes d'émission en métaux et l'étendue des zones particulièrement polluées ;
• caractériser les sources de contamination en distinguant les pollutions locales ou régionales et les contaminations transfrontières à longue distance ;
• surveiller sur le long terme les variations des niveaux des retombées atmosphériques en métaux, à partir des données des campagnes précédentes.

Accessibilité des données
L'ensemble des données est à disposition sur demande au MNHN et sera prochainement intégré à la banque de données sur la qualité de l'air gérée par l'ADEME.

Les éléments métalliques sont dosés à l'état de traces. Toutes les précautions sont donc prises pour ne pas contaminer les échantillons de mousses, et ceci dès leur récolte (usage de gants), pendant leur transport, leur stockage (sachet étanche) et durant toutes les manipulations ultérieures (salle blanche).

Collaboration entre BRAMM et RENECOFOR

L'aide technique et scientifique apportée par le personnel de l'ONF (réseau RENECOFOR) a contribué dès le début à faciliter la mise en œuvre du dispositif BRAMM. En effet, le choix de certains sites de collecte s'est appuyé sur les inventaires floristiques (pour la strate muscinale) réalisés pour les placettes RENECOFOR. De plus, des agents de l'ONF et les experts botanistes intervenant pour les inventaires floristiques ont participé à la collecte d'échantillons de mousses en 1996 et 2000. Enfin, le réseau RENECOFOR, par l'intermédiaire de son responsable national E. Ulrich, participe activement au comité de pilotage du dipositif BRAMM organisé par l'ADEME.

La collecte d'échantillons de mousses à proximité des stations RENECOFOR, favorise l'interprétation des données issues des mousses par comparaison aux données RENECOFOR mesurées sur les placettes forestières (dépôts atmosphériques sous et hors couvert, analyses foliaires et concentrations en éléments du sol).

Distribution spatio-temporelle sur les placettes RENECOFOR

Il n'existe aucune valeur de référence (valeur réglementaire ou seuil de toxicité) à laquelle se référer pour juger des effets des valeurs élevées sur les écosystèmes ou sur la santé

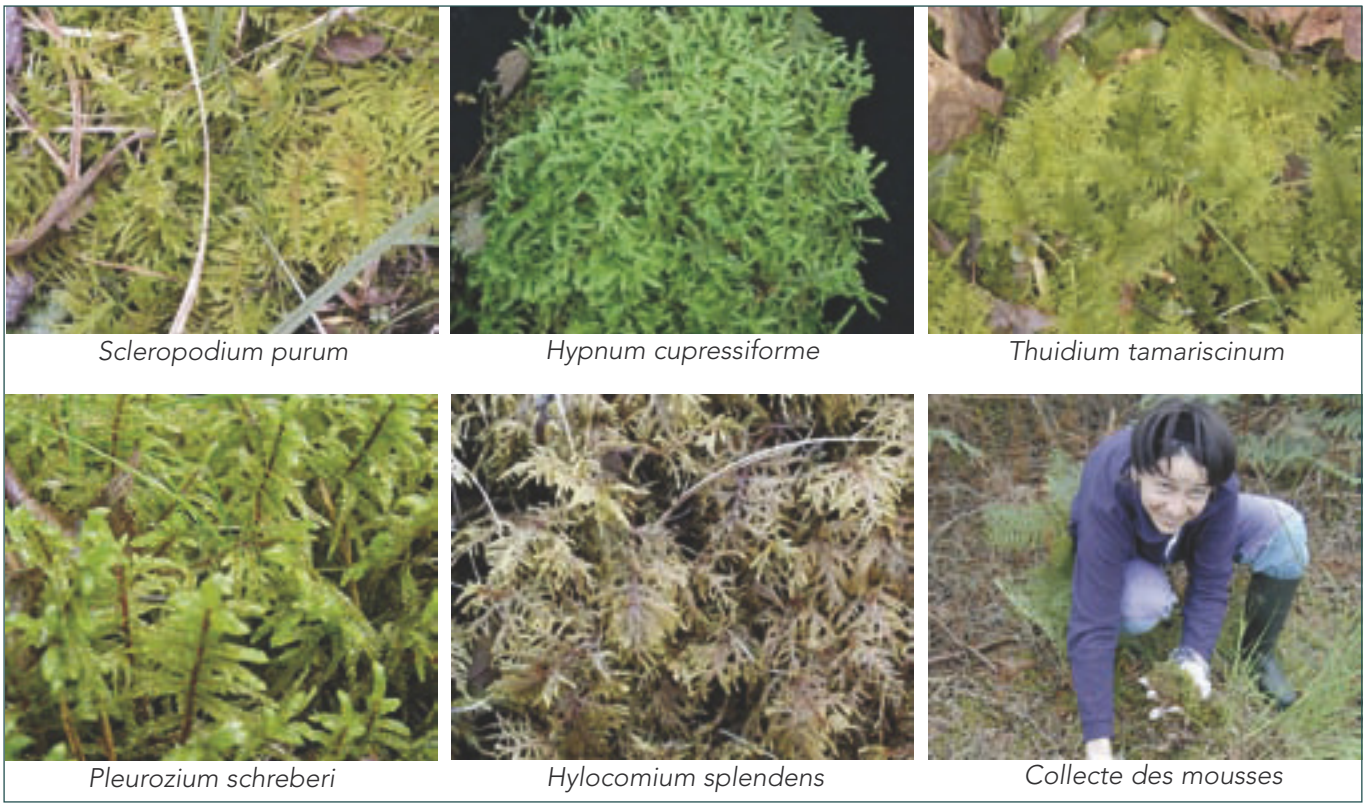


Fig. 1 : cinq espèces de mousses collectées

humaine. Quel que soit le type d'expression des résultats (cartographie par exemple), les valeurs maximales indiquent seulement les niveaux de concentrations les plus importants dans les sites échantillonnés (aucune notion de toxicité ou de pollution avérée du site).

Dans l'objectif du réseau RENECOFOR de comprendre l'évolution du fonctionnement des écosystèmes forestiers, le dispositif BRAMM permet de fournir des informations spatiales et temporelles concernant les dépôts atmosphériques métalliques. Dans une optique d'intercomparaison des dispositifs existants, l'échantillonnage du dispositif BRAMM est autant que possible privilégié à proximité des stations RENECOFOR. En 2006, 61 sites RENECOFOR (dont 23 du sous-réseau CATAENAT) ont fait l'objet de prélèvement de mousses. Pour les 3 campagnes, 37 sites RENECOFOR identiques font partie du dispositif BRAMM, le nombre par campagne étant plus élevé. L'échantillonnage a été fait à proximité immédiate de placettes RENECOFOR ou au maximum à 500 m de distance.

Sur les 61 sites échantillonnés en 2006 à proximité des placettes RENECOFOR, d'importants écarts de concentration en éléments métalliques sont relevés entre les échantillons de mousses. L'écart le plus important est observé pour le mercure qui présente un rapport de 3,8 entre les placettes CHS 10 (0,05 $\mu g.g^{-1}$) et SP 07 (0,192 $\mu g.g^{-1}$). Certaines placettes présentent en outre des valeurs de concentration élevées pour plusieurs éléments C'est le cas de SP 07 qui, en plus du mercure, présente aussi la valeur de concentration maximale en plomb (21 $\mu g.g^{-1}$). Afin de caractériser chacun de ces sites par un indice synthétique représentatif d'un panel d'éléments métalliques, un indice de contamination peut être calculé (modifié d'après Gombert *et al.*, 2005) :

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_{ij} - X_i}{X_i}$$

avec :
Sj = indice de contamination dans le site j
Xij = teneurs de l'élément i dans le site j
Xi = médiane de l'élément i sur les 61 sites RENECOFOR
n = nombre d'éléments métalliques pris en compte dans l'indice

Les résultats sont présentés dans la figure 2. Seuls sont représentés, en bleu, les 6 sites (10 % des 61 sites) présentant les indices les plus faibles, et en rouge, les 6 sites les plus contaminés au regard de l'indice. Le fait de considérer uniquement les éléments anthropiques ou l'ensemble des éléments change peu la distribution des sites. Globalement, on observe que les sites les moins contaminés sont

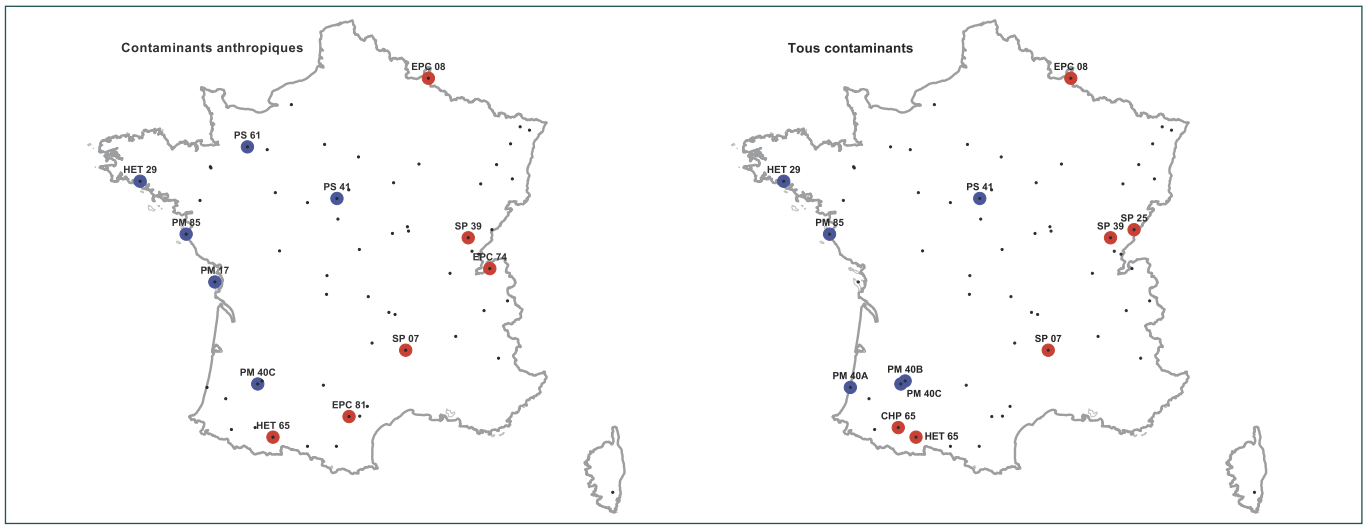


Fig. 2 : carte des indices de contamination calculés pour les éléments essentiellement anthropiques (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) ou pour l'ensemble des éléments (les mêmes + Cr, Fe, Ni, V)

En rouge les 6 sites présentant les indices les plus élevés et en bleu les indices les plus faibles.

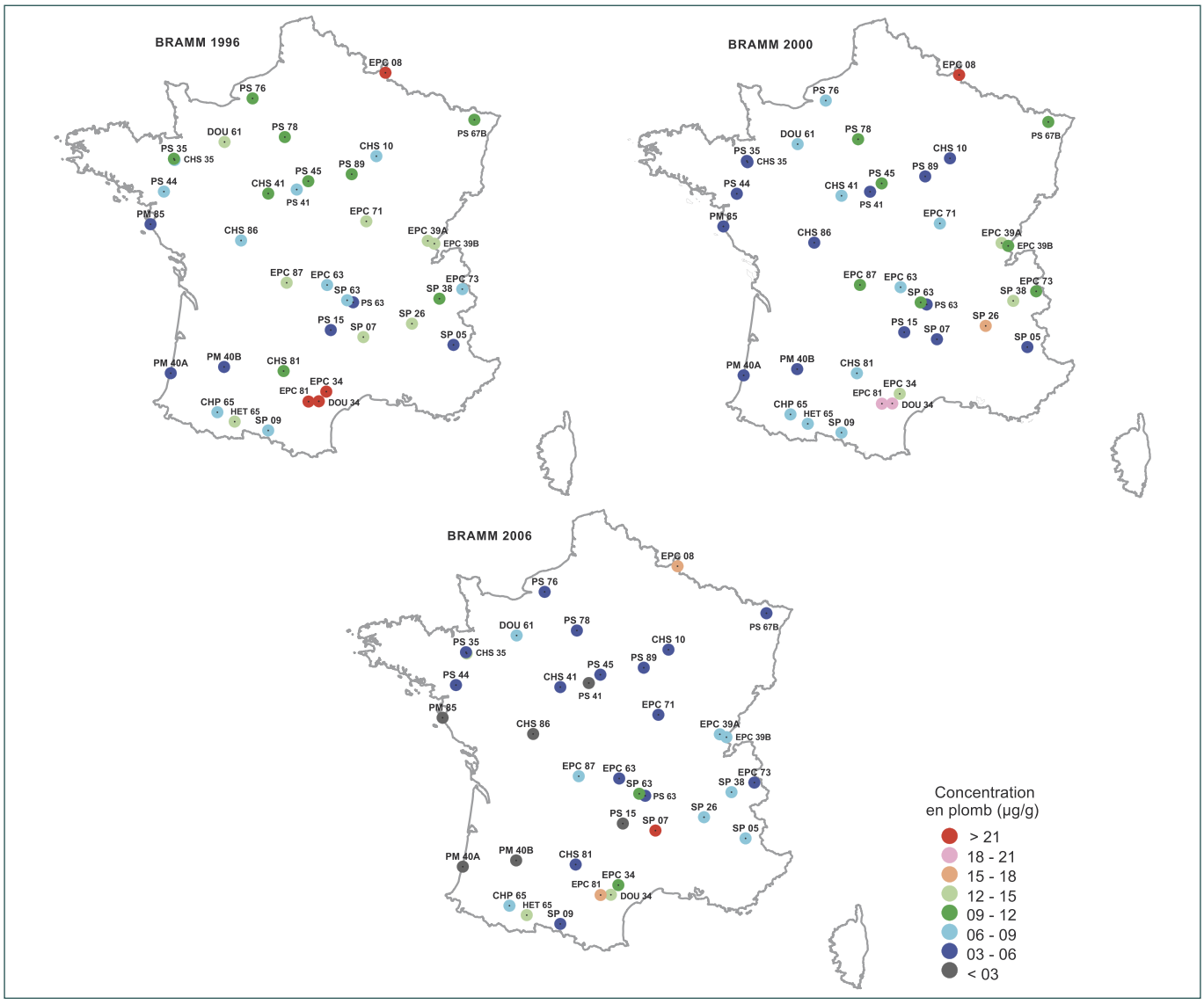


Fig. 3 : évolution temporelle des concentrations en plomb dans les mousses échantillonnées à proximité de 37 placettes RENECOFOR

localisés sur la façade atlantique et dans le centre de la France, alors que les sites les plus contaminés sont localisés dans le sud-ouest et sur la façade est de la France. La distribution spatiale des sites RENECOFOR reflète les tendances observées à partir de l'ensemble des 536 sites du dispositif BRAMM.

Dix années de biosurveillance par les mousses permettent de dresser les premières tendances d'évolution spatio-temporelle des contaminants métalliques. Parmi les éléments suivis, le plomb est l'élément montrant la diminution la plus significative entre 1996 et 2006. Sur les 37 sites communs aux 3 campagnes, le plomb montre une diminution globale d'environ 50 % entre 1996 (médiane de 10,2 $\mu g.g^{-1}$) et 2006 (médiane de 5,2 $\mu g.g^{-1}$). (figure 3)

Cette tendance à la baisse des concentrations dans les mousses met en évidence la diminution de la charge environnementale en plomb. Celle-ci s'explique par la diminution des émissions en provenance des sources diffuses (suite à l'interdiction de l'essence plombée en France) et des sources fixes (incinérateurs et industries métallurgiques). Néanmoins, la tendance d'évolution des concentrations en plomb dans les mousses peut être ponctuellement à la hausse, comme c'est le cas pour le site situé à proximité de la placette RENECOFOR SP 07 (les raisons de cette augmentation restent encore pour l'instant inexpliquées).

Conclusion

Le dispositif BRAMM est actuellement le seul dispositif permettant d'estimer les niveaux de retombées métalliques en pollution de fond sur l'ensemble du territoire national (plus de 500 sites).

Les cartes de distribution spatiale des concentrations mesurées dans les mousses fournissent une information relative sur les niveaux de dépôt en France et permettent d'identifier les sites susceptibles d'être contaminés. Ces données peuvent aussi servir à l'élaboration des cartes de charges critiques en métaux[2] qui déterminent les zones du territoire soumises aux excès de dépôts et identifient les écosystèmes sensibles. Ainsi, ces informations contribuent à l'amélioration générale des connaissances concernant les effets des dépôts atmosphériques sur les écosystèmes.

Le suivi temporel du dispositif BRAMM permet dès à présent de dresser les tendances d'évolution sur 10 ans des dépôts métalliques en pollution de fond. Il contribue ainsi à guider les politiques mises en œuvre en matière de réduction des émissions dans le cadre de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique à longue distance et d'en évaluer les efforts de réduction. Ces informations participent également, dans le cadre du réseau RENECOFOR, à la compréhension de l'évolution à long terme des écosystèmes forestiers.

Sébastien LEBLOND
Catherine RAUSCH
Muséum National d'Histoire Naturelle
Laboratoire de Cryptogamie
sleblond@mnhn.fr
crausch@mnhn.fr

Sandrine GOMBERT
Institut EGID, Université Bordeaux 3
sandrine.gombert@egid.u-bordeaux.fr

Laurence GALSOMIES
ADEME
Département Surveillance de la Qualité de l'Air
laurence.galsomies@ademe.fr

Bibliographie

GALSOMIES L., SAVANNE D., LETROUIT M.A., AYRAULT S., CHARRE B., 1999. Retombées atmosphériques de métaux en France : estimation par dosage dans des mousses - Campagne 1996. Paris : ADEME. 187 p.

GOMBERT S., GALSOMIES L., RAUSCH de TRAUBENBERG C., LEBLOND S., LOSNO R., COLIN J.L., CHARRE B., 2005. Pollution atmosphérique par les métaux - Biosurveillance des retombées. Les Ulis : EDP Sciences/ADEME. 108 p.

[2] Définition de la charge ou niveau critique : valeur d'exposition à un ou plusieurs polluants en dessous de laquelle des effets significatifs indésirables sur des éléments sensibles de l'environnement n'apparaissent pas en l'état actuel des connaissances

Vulgarisation par les responsables locaux

Les forestiers responsables locaux des placettes RENECOFOR ne sont pas de simples opérateurs. C'est aussi sur eux que repose la communication du réseau, son intégration dans le tissu local, à plusieurs niveaux : intégrer le suivi particulier des placettes dans la gestion forestière ordinaire, informer les promeneurs de l'importance de ces installations (a priori surprenantes), et s'en servir de support pour promouvoir la recherche correspondante et ses résultats auprès de publics variés.
En voici trois témoignages contrastés, dans les Vosges, au Mont Aigoual et au Pays de Sault.

L'exemple du site SP 57 d'Abreschviller, dans les Vosges

Le massif forestier d'Abreschviller est situé au pied du Donon, sommet des Vosges gréseuses qui culmine à 1 000 m d'altitude. Bien que situé administrativement dans le département de la Moselle, il se trouve aussi aux confins des deux départements lorrains de la Meurthe-et-Moselle et des Vosges, ainsi que du département alsacien du Bas-Rhin.

Présentation de la forêt

Assise sur un substrat gréseux, la forêt est composée principalement de résineux : sapins pectinés, épicéas, pins sylvestres, accompagnés de hêtres, de quelques chênes et de rares érables sycomores.
La flore y est peu diversifiée mais spécifique du massif vosgien : myrtille, alisier blanc, sorbier des oiseleurs, etc. Le grand gibier est composé des cervidés (cerfs et chevreuils) et de sangliers. Deux espèces d'oiseaux font l'objet de mesures de protection : le faucon pèlerin (arrêté de protection de biotope) et le grand tétras ou coq de bruyère (réserve biologique dirigée du Grossmann) pour lequel un aménagement spécifique est en cours d'étude. Un ou deux lynx ont été observés au phare à l'occasion de comptages de cerfs la nuit. La forêt a donc un double rôle de production et de conservation de la diversité biologique, notamment pour le tétras.

Situation de la placette et fréquentation

La placette SP 57 se trouve dans une zone de forêt productive à 3 km d'Abreschviller (1 500 habitants), à 80 km de Nancy et de Strasbourg, et à 100 km de Metz. De nombreux sentiers sont régulièrement entretenus et balisés par une association régionale, le Club vosgien. Un circuit pédestre très visité passe à 30 m de la placette SP 57 et un panneau explicatif présente ses objectifs ; un autre sentier circulaire touche la partie hors couvert où se trouve la station météorologique automatique. Les installations sont donc facilement visibles de l'extérieur de leur grillage de protection.

Quelques exemples d'actions en interne et auprès de partenaires intéressés

La station a été présentée aux forestiers locaux sur leur demande pour leur expliquer ce que représentent les objectifs du réseau, ainsi que le travail hebdomadaire sur un tel site ; avec eux la visite a pris un caractère technique avec emploi d'un vocabulaire professionnel et discussion des objectifs relatifs à la gestion forestière.

Aux visiteurs scolaires envoyés par l'éducation nationale nous nous efforçons de présenter la placette sous un aspect scientifique élémentaire. Mais avec les écoles forestières, face à de futurs forestiers, nous adoptons une présentation plus technique, recourant au vocabulaire forestier, en soulignant

le fait qu'ils auront peut-être un jour la chance de travailler sur une placette. C'est à cette occasion que j'ai appris que le réseau RENECOFOR était au programme des écoles forestières.

Le dimanche 17 mai 1998 : visite guidée dans le cadre d'un séminaire de l'institut forestier européen (EFI), dirigé par M. Granier de l'INRA Nancy. L'après midi, le groupe de scientifique visitait la station SP 57 hors et sous couvert. Les objectifs de la placette ont été exposés avec le document de présentation préparé à cet effet (synthèse des connaissances acquises depuis le début du réseau, réalisé au centre de coordination par S. Cecchini) ainsi que quelques résultats plus récents. Les scientifiques ont pu commenter notre travail hebdomadaire, et nous leur avons expliqué les diverses difficultés rencontrées. Les visiteurs étant étrangers, et comme je ne pratique pas l'anglais, M. Granier assurait la traduction.

Quelques exemples d'actions envers le grand public

Exposition à la fête de la forêt au Moulin d'Eschviller près de Bitche à la frontière allemande en mai 2003 (2000 à 3 000 visiteurs) : Avec les collègues de Bitche un stand a été monté en mettant en place un système de collecte des précipitations sous forêt et un dispositif de collecte des solutions de sol ainsi que des panneaux explicatifs conçus à cet effet par le centre de coordination du réseau. De nombreux visiteurs se sont intéressés à notre installation et principalement les visiteurs allemands, la frontière étant située à 3 ou 4 km. Ceux-ci ont été très curieux et beaucoup plus attentifs que nos compatriotes aux problèmes écologiques.

Exposition à la fête de la forêt à Saint Quirin à 8 km d'Abreschviller (1 000 visiteurs) en août 2004 : c'était pratiquement la même présentation qu'à Eschviller mais avec la station météorologique automatique aimablement prêtée par la société PULSONIC. Sous un soleil de plomb les visiteurs se sont aussi arrêtés pour se mettre à l'ombre et profiter des commentaires. Une remarque intéressante est venue de l'un d'entre eux : « Votre installation et vos études ne prennent pas en compte toutes les relations existantes dans les écosystèmes forestiers ». Quelques années plus tard, une étude sur la macrofaune et une sur les champignons étaient lancées dans le réseau, comme si cette remarque avait été entendue…

Article de presse : un article est paru dans le Républicain Lorrain sous la rubrique « Grande région » (tirage : 150 000 exemplaires). Venu sur le terrain, le journaliste bénéficia d'une visite personnalisée. La première question pertinente fut à l'entrée de l'enclos de la placette où il demanda pourquoi la végétation était différente à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui bien sûr est dû à la présence du gibier ; cette anecdote pour souligner que ce qui est évident pour des initiés ne l'est pas toujours pour un profane.

Classes « découverte des métiers » : Par convention avec l'éducation nationale nous recevons des classes de 3ème des collèges, ainsi que d'autres classes de lycée ; et pour diversifier les sorties nous leur proposons la visite de la placette. Ceci nous a permis de nous rendre bien vite compte que la placette est un excellent outil pédagogique pour expliquer les relations dans l'écosystème forestier.

Conclusion

Au-delà de sa vocation première, la placette SP 57 est donc également un outil pédagogique qui peut être utilisé pour diverses sorties forestières. C'est un atout pour les forestiers qui ont la chance d'être voisins d'une telle installation.

François MOUCHOT
Pierre TRITHARDT
ONF, agence de Sarrebourg
francois.mouchot@onf.fr
pierre.trithardt@onf.fr

L'exemple du Mont Aigoual, placette HET 30 : communiquer ou pas ?

La médiatisation, la sensibilisation aux problèmes de pollution, la demande croissante d'information ainsi que la localisation de la placette « hors couvert » (station météorologique, récolte des précipitations pour analyse, mesures des concentrations d'ozone et d'ammoniac dans l'air) nous ont amenés à communiquer à un très large public nos interventions et les résultats obtenus sur cette placette. Compte tenu des conditions locales, pérenniser cette vulgarisation est une nécessité !

Présentation du massif de l'Aigoual

La montagne de l'Aigoual est située sur la bordure sud-est du Massif Central et appartient à la chaîne des Cévennes. Les conditions climatiques extrêmes, dont les épisodes pluvieux cévenols sont bien connus (600 mm en 48 heures les 7 et 8 novembre 1982 ; 10,32 m de neige cumulée au sommet de l'Aigoual durant l'hiver 1996), ainsi que le relief et la diversité géologique (schiste, calcaire, granit…) en font un lieu très riche en flore : de la garrigue à la pelouse subalpine.
La placette HET 30 fait partie de la forêt domaniale de l'Aigoual

G. Monzo, ONF

G. Monzo, ONF

G. Monzo, ONF

(15 000 ha) en zone centrale du Parc National des Cévennes.

Fréquentation du massif

À proximité de la mer Méditerranée et de grandes métropoles (Montpellier, Nîmes, etc.), la qualité des paysages offerts et ses contrastes en font un massif très fréquenté toute l'année. Un million de visiteurs viennent annuellement sur le massif, dont 80 000 à l'exposition permanente de Météo France et 300 000 au sommet de l'Aigoual. La création récente d'un écomusée forestier, à proximité immédiate de la placette, au col de la Sérreyrrède (col le plus fréquenté des Cévennes) en fait un point d'arrêt naturel. Le panneau d'information du réseau a incité beaucoup de personnes à prendre contact avec le responsable pour de plus amples informations.

Vulgarisation du site RENECOFOR

Deux années d'adaptations techniques aux rigueurs du climat ont été nécessaires pour rendre la placette totalement fonctionnelle ; la communication pouvait alors commencer.

En interne : nous avons présenté la placette aux forestiers locaux et aux forestiers en visite sur le massif (1996 : forestiers ONF Jura ; 1999 : ingénieurs forestiers allemands).

En externe : à travers le Festival Nature du Parc National des Cévennes, lorsque le thème annuel était « L'eau patrimoine naturel » ou l'association « Il était une fois la Forêt de l'Aigoual » 4 à 5 visites annuelles étaient organisées à l'intention du grand public (10 à 15 personnes par visite). À cette occasion était distribué le résumé synthétique de cette placette réalisé par le centre de coordination de Fontainebleau. Au cours de manifestations locales comme la fête de la transhumance, la fête de la forêt (5 000 à 10 000 personnes) figuraient dans l'exposition itinérante de l'ONF des explications sur le fonctionnement et les résultats du réseau. En 1995, lors de la fête de la forêt de l'Aigoual Erwin Ulrich est venu présenter le réseau à un public averti : scientifiques et élus régionaux.

La presse régionale a été sollicitée : pas moins de 5 articles sont parus dans le *Midi Libre* et la *Lozère Nouvelle* de 1998 à 2005. Ce laboratoire de plein air sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, ses installations complexes ont surpris les journalistes. Des titres évocateurs de Midi Libre en témoignent : « Deux étranges placettes dans la forêt de l'Aigoual » ; « La hêtraie de l'Aigoual, poumon vert sous surveillance ».

Historique scientifique de l'Aigoual

Depuis le 16e siècle le massif de l'Aigoual a fait l'objet de recherches, notamment en matière botanique, dont celles de Charles FLAHAUT (directeur de l'institut botanique de Montpellier) qui au moment du reboisement du 19e siècle a créé sous l'impulsion de Georges FABRE une vingtaine d'arboretums. Quatre sont encore suivis par la faculté des sciences de Montpellier. La placette a bien sûr attiré ces scientifiques qui n'ont pas hésité à la visiter et à utiliser les résultats dans leur enseignement.

Vulgarisation future

Un film d'une dizaine de minutes, relatant les différentes interventions des responsables locaux, commencé en 2002 en partenariat avec l'association « Les amis de l'Aigoual » est déjà diffusé dans les offices de tourisme locaux.

Une salle d'exposition dans l'écomusée du Parc National des Cévennes peut être mise à disposition pour présenter le réseau et la placette HET 30. Le centre de coordination de Fontainebleau doit dans un futur proche contribuer à sa réalisation.

Conclusion

La gestion rigoureuse de ce réseau, ses résultats en font un référentiel de plus en plus utilisé par des scientifiques de tous les horizons, mais également au niveau interne par les aménagistes (données dendrométriques, floristiques, pluviométriques, phénologiques et de fructification).

L'intéressement réel des responsables locaux aux actions et aux résultats ne peut qu'inciter à conti-

G. Monzo, ONF (et Uderzo)

nuer la communication, et à souhaiter que ce réseau arrive à vivre au moins jusqu'au terme initialement prévu.

Guy MONZO
Francis MILHAU
ONF, agence du Gard – Unité territoriale de l'Aigoual
guy.monzo@onf.fr
francis.milhau@onf.fr

L'exemple de la placette SP 11 en forêt de Callong-Mirailles (Aude)

Faire du simple avec du compliqué… c'est certainement ce que pensent beaucoup de forestiers de terrain, lorsqu'ils sont questionnés sur leur placette observatoire. Et pourtant, faire partager aux collègues de travail comme au public ce qu'est le réseau RENECOFOR est une démarche intéressante, aussi bien pour le public que pour ceux qui l'entreprennent.

Avant de parler de ce que peuvent être l'information diffusée et des moyens mis en place, il est nécessaire de rappeler ce qu'est la nature du travail demandé, et pourquoi il peut être utile de diffuser de l'information.

Le temps à consacrer à la placette : il est de l'ordre d'une demi-journée hebdomadaire à laquelle peuvent se rajouter de la maintenance, des observations, des prélèvements… Ceci a une influence sur l'organisation du travail, au niveau individuel mais aussi collectif. Il est donc important que cette activité soit clairement définie et reconnue, aussi bien pour l'opérateur que pour l'environnement professionnel.

Le travail de terrain : les récoltes des échantillons nécessitent un travail méthodique et méticuleux. Ces opérations, qui ne présentent aucune complexité particulière, sont axées majoritairement sur des prélèvements et de l'échantillonnage. Une des particularités de ces récoltes est la durée dans le temps. L'aspect répétitif peut engendrer de la lassitude et par voie de conséquence influer sur la qualité des résultats des prélèvements.

La nécessité de préserver le site de récolte : la forêt domaniale de Callong-Mirailles où est située la

J-L. Fiol, ONF

J-L. Fiol, ONF

placette a une vocation touristique marquée, et la fréquentation en période de champignons est très importante. Informer le public sur ces installations est un moyen de prévenir le vandalisme et de préserver cette zone sensible en limitant les intrusions.

Les moyens de communication et d'information utilisés

La presse écrite locale

La Haute Vallée de l'Aude et le Pays de Sault sont des zones à dominante rurale où la presse locale bénéficie d'une large diffusion. À intervalles réguliers, des articles occupant d'un quart à une demi-page avec photos rappellent ce que sont ces installations et l'intérêt de ces observations (« Un laboratoire dans la Forêt de Callong », « La santé forestière surveillée », « Homme et nature : observation des écosystèmes »…). Ces articles sont réalisés en collaboration avec les correspondants locaux de la presse. Le message est généralement correctement relayé et a localement un impact important. Compte tenu des problèmes qu'a pu rencontrer la forêt depuis 2003 et des divers problèmes environnementaux, les lecteurs comme les journalistes sont demandeurs d'information sur tout ce qui touche à l'environnement et à ses perturbations.

La télévision

À la suite des problèmes de sécheresse de l'hiver 2006/2007, nous avons été contactés par France 2 et France 3 qui réalisaient des reportages pour les éditions du 13 h et du 20 h Trois reportages (1mn30) sur le dépérissement de la sapinière (voir encadré) ont été diffusés. L'absence d'eau dans le sol et les relevés météorologiques de la placette SP 11 ont illustré cette problématique. Au final de tels reportages présentent peu d'intérêt. Aborder en un temps aussi restreint le réseau RENECOFOR est impossible. L'image est le vecteur principal et le temps de parole limité. Pour un sujet aussi complexe que celui-ci, il serait préférable de travailler sur une production d'un quart d'heure à vingt minutes. Le sujet pourrait être rendu attrayant et dynamique. Une émission à vocation pédagogique et grand public comme « C'est pas sorcier » (France 3) serait bien adaptée.

Les publications ONF

Au cours de l'année 2006, deux sentiers touristiques ont été aménagés en forêt de Callong. En complément de ceux-ci, nous avons édité à 5 000 exemplaires un livret d'une trentaine de pages qui permet de conserver une trace écrite de ces promenades. La troisième partie de ce document est consacrée au réseau RENECOFOR. Après une présentation générale, 3 thèmes d'actualité illustrent le « pourquoi » de ce réseau : « L'ozone, un oxydant puissant », « La diminution du soufre dans les précipitations » et « Le changement climatique a-t-il une incidence sur la croissance des arbres ? ». Ce choix a été réalisé à partir de sujets avec lesquels le public est déjà familiarisé. L'écrit, qui est certainement le support le plus efficace lorsque l'on veut diffuser de l'information sur un sujet aussi diversifié et complexe que celui de ce réseau, passe par une compréhension de ce qu'attend le « grand public » à la lecture de ces quelques pages. Ces textes ne doivent pas s'apparenter à des extraits d'ouvrages scientifiques, des tracts ou des circulaires administratives. Les titres de chaque page sont importants. Ceux-ci incitent à la lecture, ou résument l'information développée dans le corps de texte. Pour être lu et crédible, il est indispensable de travailler en équipe. Ce livret disponible auprès de l'ONF, des Offices de Tourisme, des Communautés de Communes, réalisé en étroite collaboration avec les

ilan et Haute vallée

Un laboratoire dans la forêt de Callong

Extrait de « La Dépêche » du 1er octobre 1995

La sapinière audoise

La canicule de 2003 et les sécheresses des années suivantes ont eu des conséquences importantes sur la sapinière : en l'espace de 3 ans, plus de 100 000 m³ de sapins ont séché. Les facteurs limitants et parfois conjugués, que sont l'altitude, l'exposition et la nature du sol ont à cette occasion « redessiné » la carte des peuplements de certaines forêts, en modifiant la répartition et la composition en essences.

J-L. Fiol, ONF

Comprendre l'intérêt des études de ce réseau au travers de quelques exemples :

1- l'ozone : un oxydant puissant

De quel ozone parle-t-on ?

L'**ozone** est un gaz (O_3).

Il faut bien différencier celui contenu dans la stratosphère (entre 12 et 50 km d'altitude) et celui présent dans la troposphère (entre le sol et 12 km). La limite entre ces deux couches s'appelle la tropopause. Il y circule des vents violents qui limitent très fortement les échanges entre couches. L'ozone stratosphérique protège la vie sur la terre en filtrant une partie des rayons ultraviolets.

Comment se forme l'ozone troposphérique ?

L'ozone de la troposphère devrait être naturellement faible. Mais il s'en forme dans l'air chargé en polluants dit « primaires » tels que les oxydes d'azote qui sont produits par la combustion des carburants fossiles (automobiles, chauffage, etc) et les composés organiques volatils provenant des émissions naturelles et humaines (automobiles, raffineries, combustion des déchets, etc). Ces réactions sont activées par le rayonnement solaire.

Quelle est l'action de l'ozone sur la végétation ?

Depuis la fin des années 1980, l'ozone troposphérique est connu pour ses fortes concentrations. L'ozone étant un des oxydants les plus puissant, il réagit avec toutes les surfaces de matériaux ou cellules vivantes qui ne sont pas suffisamment protégées. Il a un effet néfaste sur la végétation car il attaque les feuilles en entrant par les voies respiratoires (les stomates) et en détruisant les cellules. A long terme cela peut entraîner une diminution de croissance, une perturbation de la reproduction des espèces les plus sensibles et une perturbation des écosystèmes.

3- Le changement de climat a-t-il une influence sur la croissance des arbres ?

Le roussissement précoce des feuilles en milieu d'été et leur chute prématurée observée suite à la canicule de 2003 sur une grande variété d'essence et dans une très large gamme de conditions stationnelles ont rappelé de façon spectaculaire le rôle clé du climat sur la vitalité des écosystèmes. A l'heure actuelle, la réalité d'un réchauffement climatique n'est plus à démontrer aussi bien en France qu'au niveau planétaire.

Même si de fortes interrogations persistent sur une augmentation éventuelle de la fréquence et de l'intensité des phénomènes exceptionnels, une meilleure connaissance de la sensibilité des essences forestières au climat est indispensable pour mieux appréhender les changements futurs.

Allongement de la saison de végétation

Globalement, il apparaît que, depuis les années 1950, les dates des événements printaniers (apparition des feuilles) ont avancé de 2 à 4 jours par décennie et que celle des phases automnales (chute des feuilles) ont reculé de 1 à 3 jours. Ainsi, depuis 50 ans, la période d'activité des arbres s'est accrue de 10 à 15 jours.

Conséquences probables sur la sensibilité au gel

Il existe encore de très nombreuses interrogations sur les conséquences à long terme des changements observés. Parmi les questions actuelles, celle de la sensibilité aux gelées est une préoccupation majeure. Une modification du rythme d'accumulation des températures « froides » en hiver et « chaudes » en été pourrait se traduire par un ajustement moins efficace et un débourrement plus précoce. De fait les risques de gel seraient augmentés. Ceci pourrait également entraîner une modification des conditions de croissance et de concurrence entre arbre et entre les espèces.

Extrait de l'article de François Lefourgeois paru dans la Revue Forestière Française en 2005, « Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre au climat en France et en Europe », enseignant-chercheur, Equipe Ecologie Forestière, ENGREF - Centre de Nancy

Le dépérissement de la sapinière

Suite à la canicule de 2003, et les sécheresses de 2004 et 2006, le paysage de la sapinière du Pays de Sault a été profondément modifié. En l'espace de 3 ans, ce sont 100 000 m³ de sapins qui ont dépéri et séchés...

responsables du réseau, est le support grand public le plus élaboré dont nous disposions localement.

Extrait du livret « Sentier d'interprétation sylvicole et sentier du Pic du Bac » : des thèmes de l'actualité illustrent l'intérêt du réseau RENECOFOR

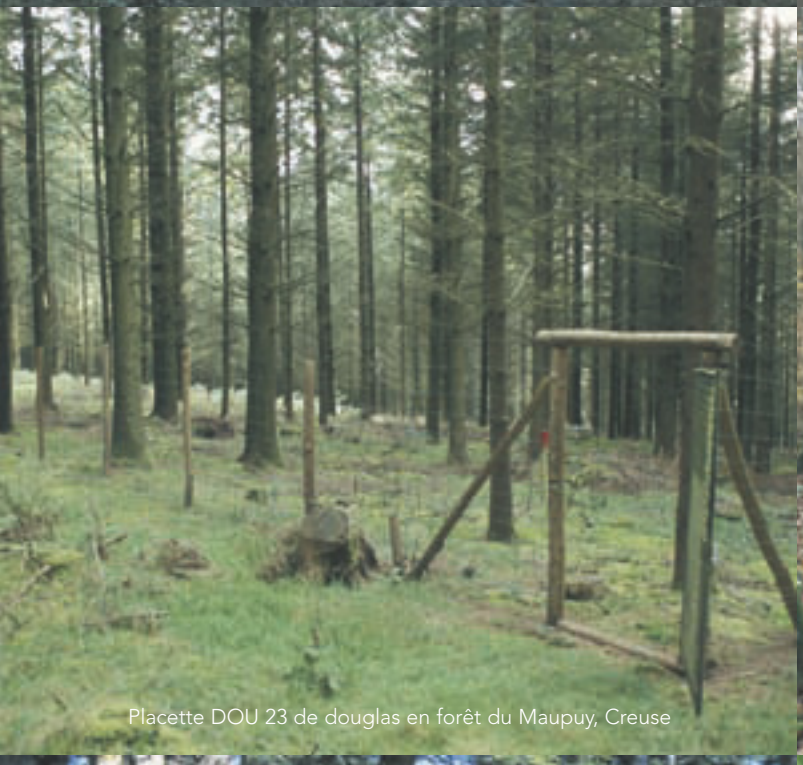
Les conférences

Dans le cadre des animations liées au tourisme, que ce soit sous forme d'accompagnement ou de conférences, la santé des forêts est abordée, thème pour lequel la demande du public est forte.

Jean-Luc FIOL
ONF, agence de l'Aude — Unité Territoriale Plateau de Sault
jean-luc.fiol@onf.fr

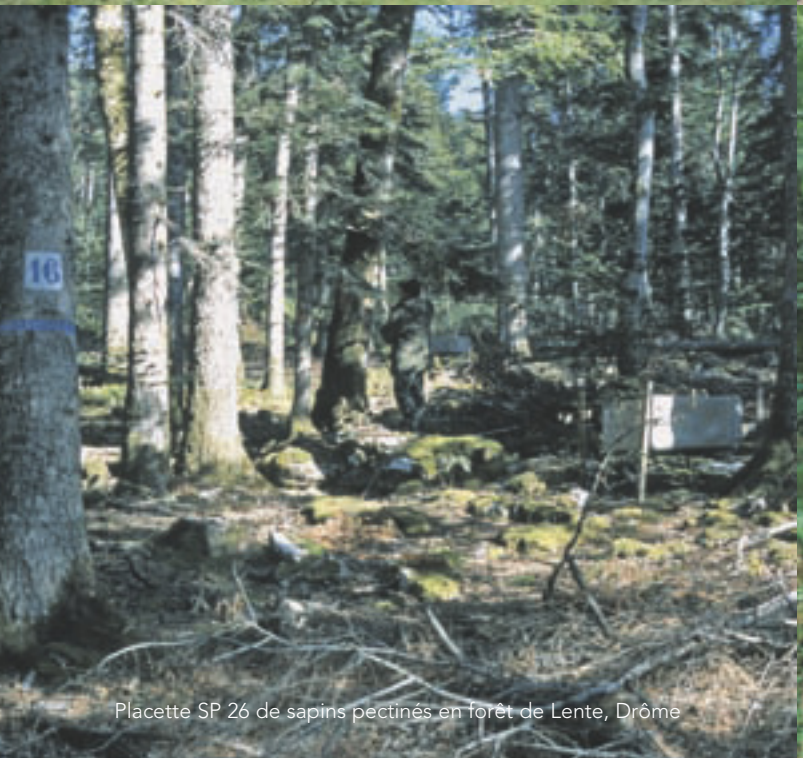
Placette PM 85 de pins maritimes en forêt de Notre Dame de Monts, Vendée

Placette PS 44 de pins sylvestres en forêt du Gavre, Loire-Atlantique



Placette DOU 23 de douglas en forêt du Maupuy, Creuse

Placette CHS 88 de chênes sessiles en forêt de Darney, Vosges



Placette SP 26 de sapins pectinés en forêt de Lente, Drôme

Placette HET 29 de hêtres communs en forêt de Carnoët, Finistère

Synthèse des ateliers Positionnement du réseau RENECOFOR vis-à-vis de quelques questions et approches émergentes : observation des changements globaux, bioindication et modélisation

Comment observer mieux les effets des changements globaux ? À quoi servent la bioindication et la modélisation ? Quelles perspectives s'ouvrent pour ces approches ? Comment le réseau RENECOFOR peut-il y contribuer ? Voici les questions qui ont été débattues dans les trois ateliers consacrés aux questions émergentes. Des débats de ces trois ateliers se dégagent des convergences, que cette synthèse vise à mettre en évidence. Elles reflètent l'évolution de notre vision des milieux naturels.

Passer du régime stationnaire au régime transitoire

Prise de conscience de tendances à long terme dues à l'action anthropique

La mise en évidence des changements globaux ébranle, depuis quelques décennies, certains paradigmes[1] fondateurs des sciences forestières, et en particulier la notion de station invariante. RENECOFOR a été créé suite à l'épisode des pluies acides, dans le sillage de cette prise de conscience que nos forêts ne sont pas dans un état stationnaire, comme l'a rappelé l'allocution de Georges Touzet et Christian Barthod. Une des missions du réseau était de construire des références pour faire la part du « bruit » des variations interannuelles, et des **tendances à long terme** suspectées.

La bioindication a connu ses premiers développements forestiers dans le même contexte de mise en évidence des **effets de la pollution** sur la végétation. En ce qui concerne l'ozone, elle a d'abord eu recours à des plantes sensibles introduites volontairement, puis s'est étendue à la flore spontanée. Des listes d'espèces sensibles, assorties de description des symptômes, sont aujourd'hui disponibles. Pour l'azote, l'intérêt complémentaire des lichens, sensibles aux dépôts atmosphériques azotés, et des végétaux vasculaires, répondant à l'azote disponible dans le sol, a pu être mis en évidence. Des progrès restent à réaliser en matière de bioindication du dépassement des charges critiques en azote. La bioindication permet également de caractériser la qualité des milieux forestiers pour la production. Elle est aujourd'hui utilisée à cette fin par des praticiens non spécialisés. Des améliorations à cet usage opérationnel peuvent encore être apportées, par exemple en recherchant à définir le nombre minimal d'espèces nécessaires dans un relevé (et leur choix) pour une bioindication fiable, en étendant les références aux milieux ouverts, ou encore en améliorant le diagnostic des carences en azote.

Dans le même temps, la prise de conscience du caractère évolutif de ces paramètres de la production s'est traduite par un change-

RENECOFOR, ONF

Atelier bioindication

RENECOFOR, ONF

Atelier modélisation

RENECOFOR, ONF

Comment améliorer l'observation des changements globaux en forêt

RENECOFOR, ONF

Synthèse des travaux

[1] *Un paradigme scientifique est un système de représentation et de pensée partagé par une communauté scientifique à une phase donnée de son développement.*

ment de cadre conceptuel pour la modélisation : les facteurs de la croissance des arbres ne varient plus seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps.

Changements climatiques : de nouveaux défis

Les changements climatiques nous poussent à franchir une étape supplémentaire : il ne s'agit plus seulement de mettre en évidence une tendance observée, mais de **se projeter dans l'avenir, grâce à la modélisation**, afin d'anticiper des changements prévisibles et de se mettre en état de les observer. Les modèles jouent là un rôle prospectif, et leurs résultats peuvent orienter l'acquisition de nouvelles données, alors que dans un schéma plus classique, les données expérimentales se situaient plutôt en amont de la démarche de modélisation.

Un autre effet des changements climatiques est de renouveler l'intérêt pour **les extrêmes climatiques et leurs conséquences** sur les arbres et les écosystèmes. Ce faisant ils attirent notre attention sur ce fameux « bruit » interannuel que l'on cherchait à filtrer pour dégager une tendance. De nouvelles méthodes d'analyse des données, ainsi que des analyses de sensibilité des modèles, doivent être mises en œuvre pour mieux analyser les aléas et les incertitudes. Au premier rang des évènements extrêmes (mais sans exclusive[2]), le risque de sécheresse nous pousse à mieux caractériser le fonctionnement hydrique des sols, et à rechercher des bioindicateurs susceptibles de nous renseigner sur les facteurs limitants qui y sont liés : le manque d'eau en saison de végétation, d'une part, et l'engorgement printanier d'autre part (tous deux susceptibles de s'aggraver sous l'effet des changements climatiques). La perspective des changements climatiques motive également la recherche d'indicateurs de vitalité pour les arbres, peuplements ou écosystèmes, et donc d'états de référence pour le fonctionnement des écosystèmes, ou l'état de la biodiversité.

Certains points faibles de nos réseaux de surveillance nous apparaissent, comme la **caractérisation de la régénération, et surtout de la mortalité**. Quels sont les flux de mortalité et leurs fluctuations dans les différents écosystèmes forestiers : quelle est la part de la mortalité de fond, comment se répartit-elle dans le peuplement ? À la lumière des questions actuelles, on peut faire également le constat de la **sous-représentation des écosystèmes en conditions limites**, à l'instar de Maurice Bonneau, un des pères fondateurs du réseau RENECOFOR, regrettant par exemple l'absence de la hêtraie supra méditerranéenne. Soulignons ici que la plupart des réseaux existant depuis plus de 15 ans n'ont pas été conçus pour ces nouvelles questions posées aujourd'hui et que si une adaptation est possible, elle ne pourra sans doute pas répondre à tout. Cette même perspective des changements climatiques soulève enfin des questions quant à la stabilité des bioindicateurs déjà mis au point : ces changements ne vont-ils pas modifier la part respective des différents facteurs qui agissent sur la végétation ?

Intégrer dans une approche globale des approches analytiques diversifiées

Si l'on qualifie ces changements de « globaux » ou « mondiaux », c'est parce qu'ils peuvent affecter le « globe » entier, mais peut-être aussi parce que le concept « englobe » des tendances de natures diverses, qui se sont développées simultanément avec l'activité humaine, et agissent en interaction sur les écosystèmes. Alors qu'un effet de loupe focalise actuellement notre attention sur les changements climatiques, l'impact majeur d'autres changements ne doit pas être perdu de vue, en particulier les impacts très importants des changements d'usage des sols (même le réseau RENECOFOR n'est constitué que pour moitié de forêts anciennes, c'est-à-dire de forêts qui n'ont jamais été défrichées).

Approche globale…

L'ensemble de ces tendances s'exerçant sur les écosystèmes requiert une approche également globale. RENECOFOR, en concentrant sur un même site des mesures de natures très diverses, obéit à ce principe. Chacune à leur façon, la bioindication et la modélisation peuvent se réclamer de cette approche globale : en procédant par l'observation des effets des changements environnementaux sur les espèces et les écosystèmes, la bioindication intègre naturellement les différentes tendances, y compris les interactions. En fournissant quant à elle un cadre de synthèse des connaissances, la modélisation donne tout son sens à cette approche globale.

…et démarches analytiques de complexité croissante

La mise en évidence et l'étude d'un changement dans les caractéristiques complexes et le fonctionnement fluctuant d'un écosystème forestier exige de la **rigueur méthodologique**. Clairement RENECOFOR est exemplaire, par la rigueur que le dispositif a apportée dans un certain nombre de domaines, par la description précise des protocoles, les démarches d'intercalibration, etc.

En matière de bioindication également la tendance est de plus en plus à développer des **approches analytiques**. Des valeurs indica-

[2] *Rappelons que l'évolution de la probabilité d'autres évènements extrêmes mérite également notre attention, en particulier le risque de tempêtes, ou encore le risque de gelée tardive, potentiellement affectés par les modifications de la phénologie des arbres (voir Morin, Chuine, RDVT, hors série n°3).*

trices d'Ellenberg (humidité, acidité, richesse en azote, lumière, température et continentalité) ou de Rameau, établies à dire d'expert, on passe avec EcoPlant à des conditions stationnelles préférées, calculées à partir d'une base de données rassemblant un grand nombre de relevés.

La décomposition du concept de station en facteurs explicitant les ressources ou les conditions du milieu : température, carbone, azote (éventuellement bioindiqués) est également le défi posé aux modèles de croissance, qui devront pour cela s'articuler avec des modèles basés sur les processus écophysiologiques.

En sortie des modèles, ce mouvement se traduit par la **complexification croissante des demandes et des évaluations** développées. Il ne s'agit plus seulement de comparer des itinéraires sur la base de la productivité (en quantité et en qualité), mais également sur la base de leur bilan de fertilité, de leurs performances par rapport au carbone ou sur la base des demandes de la société, comme par exemple l'accueil du public ou l'effet sur l'emploi. De même, les objectifs de la bioindication se diversifient, avec la recherche de plantes sensibles aux métaux lourds mobiles (zinc, cuivre, cadmium). On cherche à bioindiquer non plus seulement des réalités physiques, comme des dépôts polluants, mais des notions écologiques complexes, comme la biodiversité. Si l'on rencontre alors de sérieuses difficultés à établir un consensus sur l'objet même à mesurer, on peut noter des résultats intéressants, par exemple dans le domaine de la bioindication de l'ancienneté de l'état boisé.
Dans ce mouvement vers l'analytique, dans le cadre d'une approche globale des écosystèmes, RENECOFOR occupe une place de choix. On en attend en particulier de nouveaux progrès méthodologiques (par exemple en matière de description de la macrofaune du sol), le calage de références, ou encore la mise en relation d'approches portant sur des groupes taxonomiques différents, comme par exemple la confrontation de la bioindication de l'azote par les lichens et par les plantes vasculaires.

En guise de conclusion : faire tomber les barrières et articuler les dispositifs

Le progrès des bases de données mises en place au cours des dernières décennies, et celui des outils de traitement des données permettent maintenant la **mise en relation de données issues d'approches différentes, ou acquises à des échelles diverses**. Grâce aux bases de données, la bioindication sort des limites locales pour s'étendre à la grande région biogéographique.

La modélisation est un outil privilégié de ce dialogue entre échelles ou entre disciplines, avec par exemple le développement entrepris de modèles articulant dendrométrie et écophysiologie, qui apparaît comme une étape clé pour la simulation des effets des changements globaux.

L'amélioration de l'observation du changement climatique, dans le contexte des changements globaux, et du changement climatique en particulier, passera notamment par l'articulation des dispositifs existants pour l'élaboration d'un **tableau d'indicateurs variés**, rendant compte des différents impacts attendus du changement climatique :
- modifications phénologiques ;
- mouvements d'aire de répartition (reculs et avancées) ;
- changements de productivité ou vitalité des arbres ;
- changement de composition des communautés, d'équilibre entre espèces, et notamment entre arbres/bioagresseurs.

Par sa position intermédiaire entre réseau de suivi des écosystèmes et observatoires intensifs, par la dynamique de progrès méthodologique qu'il a instauré, par son ouverture sur les trois communautés de la gestion forestière, du suivi en continu et de la recherche, RENECOFOR peut jouer un rôle moteur dans cette dynamique.

Myriam LEGAY
interface Inra/ONF « Impacts du changement climatique sur la forêt et la gestion forestière »

Guy LANDMANN
GIP ECOFOR

Jean-François DHÔTE
Inra, LERFoB
(actuellement : ONF, Département Recherche)

François LEBOURGEOIS
ENGREF

…avec nos remerciements à Jean-Claude Gégout (Inra/LERFoB), animateur de l'atelier « Bioindication ».

Quelles évolutions possibles pour RENECOFOR ? Une analyse basée sur les résultats d'une évaluation scientifique

Mis en place dans un contexte marqué par le dépérissement des forêts en Europe, et l'émergence d'un processus politique paneuropéen centré sur la protection des forêts et assorti d'engagements nationaux et supranationaux, le réseau RENECOFOR de suivi continu (monitoring) des écosystèmes forestiers est opérationnel depuis 15 ans (1992-2007). L'ONF, son gestionnaire, a souhaité : i) tirer un bilan de cette activité, ii) revisiter les objectifs du réseau en fonction des grandes évolutions constatées et de nouveaux enjeux, iii) proposer les inflexions nécessaires découlant de considérations scientifiques, techniques et financières, et prenant en compte la dimension des partenariats nationaux et européen.

RENECOFOR, ONF

Première réunion du groupe d'évaluation (Paris, 19 mai 2006)

Une mission d'évaluation de RENECOFOR, commanditée par l'Établissement, a été conduite par un **groupe d'experts**[1] au cours de l'année 2006, sur la base de termes de référence précis, arrêtés conjointement par le commanditaire et le groupe d'évaluation. Ce groupe a rendu ses conclusions qui sont accessibles à tous[2] ; elles ont ensuite été présentées et discutées au Comité Scientifique de l'ONF (appelé CS dans la suite du texte) dans sa séance du 26 janvier 2007, puis affinées par un groupe *ad hoc* restreint (trois membres du groupe d'évaluation, le Président du CS de l'ONF, et le responsable ONF du réseau). La synthèse de ces démarches est ici présentée. Elle porte à la fois sur le bilan de RENECOFOR après quinze ans d'existence et sur des propositions pour son avenir ; elle présente des éléments d'aide à la décision de choix d'options, permettant de s'adapter à un nouveau contexte budgétaire. Les aspects budgétaires liés au financement futur de RENECOFOR ne faisaient pas, en tant que tels, partie du champ de l'évaluation scientifique.

Un bilan flatteur

La première conclusion du groupe d'évaluation souligne la **grande qualité** du travail conduit par RENECOFOR. La complexité des phénomènes et processus biophysiques à l'intérieur des écosystèmes forestiers est telle que les « bruits de fond » peuvent être plus forts que les « signaux » mesurés si les méthodes utilisées pour les appréhender ne sont pas assez cohérentes et rigoureuses. Les méthodes utilisées par RENECOFOR sont, de façon générale, mises en œuvre avec une grande rigueur, laquelle résulte de l'application des programmes « d'assurance qualité » (analyses chimiques, analyses floristiques, etc.) élaborés. Cette rigueur, saluée par les partenaires, a permis des progrès importants dans la connaissance des variables d'état des écosystèmes forestiers et de leur évolution (dérives). Les publications scientifiques et techniques sont nombreuses et riches, même si certains domaines sont mieux couverts que d'autres. Certaines d'entre elles figurent dans des revues de bon rang.

Le réseau, avec ses actions propres, ou en partenariat avec d'autres réseaux, a obtenu des résultats importants et/ou originaux, notamment concernant les thèmes suivants :

- évolution et spatialisation des dépôts atmosphériques ;

[1] *Le groupe d'évaluation présidé par F. JACOBÉE (MEDD) était composé de A. BASTRUP-BIRK (Centre Commun Recherche, Commission européenne), J.-L DUPOUEY (INRA), G. LANDMANN (ECOFOR), F. LEBOURGEOIS (Engref), M. LEGAY (INRA/ONF), A. PROBST (CNRS), J. RANGER (INRA)*

[2] *Voir sur le site web RENECOFOR dès la fin 2008*

- identification et description de symptômes d'ozone sur la végétation ;
- relations climat - croissance (hêtre, chênes, sapin, épicéa) ;
- indice foliaire des feuillus ;
- phénologie ;
- état (évolution) des sols en France ;
- tendances de la nutrition minérale (Mg, N, P) ;
- tendances des bilans d'éléments minéraux (en cours) ;
- inventaire des champignons et lichens.

Le groupe d'évaluation a également souligné le caractère unique et original sur bien des aspects de la plateforme RENECOFOR, par rapport aux dispositifs existants ; en ce sens, il a réellement apporté de la valeur ajoutée. Bien plus même, le réseau a su produire des **références et des méthodes**, notamment dans le domaine de la description du milieu, et de la mise en place d'expérimentation de qualité, qui ont valeur d'exemple.

Parmi les points méritant, d'après les évaluateurs, d'être améliorés figurent le pilotage du réseau, notamment dans sa dimension scientifique, le traitement de certaines des données engrangées qui attendent encore d'être interprétées et analysées, ce travail méritant d'être entrepris de façon urgente. Les conditions d'accès aux données ont été jugées comme devant encore être améliorées. Enfin, des remarques ont été faites sur la dissémination et la communication des résultats, et notamment sur un certain manque d'adéquation entre cibles et contenus diffusés.

RENECOFOR demain ?

L'approche du CS a été de s'appuyer sur les acquis en les optimisant et les valorisant, de préciser et reformuler les enjeux et les objectifs pour un nouveau système de suivi continu des écosystèmes forestiers, notamment en relation avec le changement climatique, et d'en déduire les phénomènes principaux à observer et mesurer. Ensuite, il s'est agi de proposer un dispositif revisité, capable d'acquérir avec rigueur des données de qualité, et de définir les caractéristiques du nouveau réseau et des variables à mesurer ou observer. Pour cela il fallait enfin :
- prioriser les actions devant constituer le cœur du réseau,
- ménager un espace pour des thèmes nouveaux en suggérant des activités à engager sous forme de projets à caractère temporaire, préalables à une extension au sein du réseau,
- proposer des éléments pour une meilleure gouvernance.

Dans sa réflexion, le CS a considéré le rôle particulier du nouveau RENECOFOR et de l'ONF au sein d'une communauté plus large d'organismes français et européens dont l'activité s'étend de la recherche à la gestion. Dans la perspective finalisée de la gestion durable des forêts, cette communauté doit à la fois produire de la connaissance, fournir des données, et mutualiser l'information, dans le cadre d'un système cohérent et concerté, dont la coordination devrait être assurée par le GIP ECOFOR.
Pour faciliter les décisions concernant le financement du nouveau dispositif, le CS a défini et argumenté des options plus ou moins intensives. Elles devraient aider à optimiser le choix de compromis entre le scientifiquement optimal et le financièrement possible.

Quels grands objectifs pour le nouveau RENECOFOR ?

Quatre objectifs ont été identifiés :
- suivre avec rigueur, de façon continue et à long terme, l'évolution d'écosystèmes forestiers, principalement à vocation de production, sous l'effet de facteurs externes, en particulier le changement climatique (fonction d'**observatoire**) ;
- contribuer à la détermination et à la compréhension des **relations de causes à effets** entre les facteurs externes et les évolutions constatées, et utiliser cette connaissance pour la prévision et l'établissement de scénarios grâce à la modélisation ;
- s'inscrire dans le continuum des **dispositifs de mesure et d'observation des écosystèmes forestiers** permettant les extrapolations et généralisations nécessaires, en lien avec d'autres dispositifs ou expérimentations pertinents et en développant le partenariat ;
- éclairer le gestionnaire sur ses **choix de gestion** durable dans un contexte changeant et incertain.

En pratique, le CS suggère de mettre l'accent sur trois groupes de phénomènes : i) la réaction des écosystèmes forestiers aux évolutions du climat, ii) le cycle des éléments nutritifs en forêt, notamment en relation avec les dépôts atmosphériques, iii) l'évolution de la biodiversité. Pour chacun d'entre eux, les paramètres à mesurer et/ou observer sont précisés en encadré (page suivante).

RENECOFOR demain : un dispositif revisité

Le CS a nettement conclu à la nécessité de maintenir un réseau de suivi continu (monitoring) à long terme de l'évolution des écosystèmes forestiers sous forme d'un ensemble de sites (placettes), mais il suggère aussi des modifications pour l'avenir, en particulier pour tenir compte de l'évolution des questionnements, de la nécessité de mutualiser les données, et pour s'adapter à un contexte financier en évolution. Les grandes lignes des propositions se résument comme suit :
- reprendre le concept de **réseau de sites de suivi (placettes) à long terme** constitué de **3 niveaux**

Nouveau RENECOFOR, les paramètres à mesurer/observer

Pour la réaction des écosystèmes forestiers aux évolutions du climat :
- la phénologie (stades de développement, débourrement végétatif et floral, chute des feuilles, longueur de la saison de végétation) ; il est suggéré d'aborder la phénologie de la strate herbacée en plus de celle des arbres, qui était suivie jusqu'à présent ;
- la production de biomasse : croissance (tige), feuilles, fruits ;
- la santé des peuplements (facteurs biotiques et abiotiques) ;
- l'évolution des stocks et flux de carbone et d'azote ;
- l'impact des événements extrêmes (sécheresse, canicule, etc.).

Pour le cycle des éléments nutritifs en forêt en relation avec les dépôts atmosphériques :
- les apports atmosphériques en polluants acidifiants et eutrophisants, leur évolution et leur répartition spatiale ;
- leur impact sur l'évolution des sols forestiers, leur fertilité, le cycle nutritif, la biodisponibilité des éléments nutritifs pour les arbres (carences, excès, déséquilibres), la flore, et éventuellement la phénologie (e.g. la longueur de la période de végétation) ;
- les charges critiques en polluants (niveaux que les forêts sont capables de supporter) et leurs dépassements (en fonction des dépôts atmosphériques) ; les zones sensibles ;
- l'ozone en forêt et son impact sur les arbres et la flore herbacée.

Pour l'évolution de la biodiversité…
L'appréhension de la diversité biologique est particulièrement complexe, et n'est, pour nombre de ses éléments, pertinente qu'à des niveaux d'échelle plus vaste que celui des placettes (paysage) ; à cet égard, RENECOFOR ne permet pas à lui seul de couvrir les questions relatives à la biodiversité forestière. Cependant, il est intéressant de prendre en compte certaines composantes de la biodiversité, dont le rôle fonctionnel est reconnu (cortège fongique et macrofaune du sol notamment), ou qui rendent compte des changements climatiques ou de la fertilité des sols (composition floristique). Il s'agit à la fois de développer des références méthodologiques et de fournir des références (locales) en la matière. Pour d'autres aspects de la biodiversité, RENECOFOR doit être articulé avec d'autres dispositifs d'observations plus larges. Un aspect particulier concerne la composition floristique de la strate herbacée en relation avec les antécédents historiques des placettes (sylviculture, croissance).

emboîtés d'intensité/nombre de variables mesurées (du moins intense au plus intense : 1, 2, 3) mais introduire **2 cadences d'observations et de mesures** différentes (« rapprochée », « distante ») ;

- réserver la cadence rapprochée à un nombre d'espèces réduit, par exemple à 4 : chênes, hêtre, pin sylvestre, et épicéa (avec quelques exceptions pour les placettes actuelles de niveaux 2 et 3 et quelques modulations éventuelles selon l'échelle géographique considérée, France *versus* Régions européennes) ;
- pour les autres espèces, organiser un suivi à cadence distante au moyen d'un programme « tournant » par groupe de placettes.

Ce travail sera précédé par un « toilettage » : un examen attentif des placettes actuelles en éliminant les doublons, parcelles proches, etc. Les caractéristiques de cette nouvelle architecture sont données dans le tableau 1. Rappelons que, dans sa forme actuelle, le réseau compte 102 placettes pour le niveau 1, 27 pour le niveau 2 et 17 pour le niveau 3.

Les priorités au cœur du futur système RENECOFOR

La présentation qui suit, nécessairement courte, ne peut faire état du détail des justifications scientifiques et techniques qui ont présidé aux recommandations récapitulées dans le tableau 2. Le lecteur soucieux de les comprendre pourra se reporter au rapport du comité d'évaluation.

Précisons simplement que pour le suivi météorologique (variable causale climat), le CS propose de réduire sans attendre le dispositif aux sites A3. C'est en effet dans ces seuls sites que les principaux paramètres nécessaires pour la modélisation du fonctionnement (notamment hydrique) des peuplements sont disponibles. Sur les autres sites, les stations météorologiques apportent une connaissance des variables climatiques elles-mêmes, ce qui n'est pas l'objectif de RENECOFOR.

En raison des questions non résolues sur la valeur des mesures faites (par nécessité) dans des clairières proches des placettes, le CS recommande cependant de mener à son terme l'étude du microclimat local en relation avec les données du réseau de Météo France.

Pour les variables de réponse, le CS a envisagé deux (et dans un cas trois) options ; l'option 2 (ou 3) est l'optimum, l'option 1 est le plancher en dessous duquel il ne faut pas descendre. Le lecteur doit comprendre que les niveaux sont emboîtés : A3 est inclus dans A2, lui-même inclus dans A1 (tableau 1). L'ONF traduira ensuite les options en termes de scénarios financiers.

Engager des pistes nouvelles

Le CS a identifié des thèmes d'intérêt scientifique manifeste pour le futur réseau. Il suggère que certains de ces thèmes puissent être abordés sous

Niveaux emboîtés (A3 inclus dans A2, lui-même inclus dans A1)			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Ensemble A Chênes, hêtre, pin sylvestre, épicéa (exceptions niv. 2 et 3) *Cadence rapprochée*	A1 65 sites	CATAENAT A2 27 sites mesure des dépôts totaux seulement hors couvert forestier	Noyau dur A3 14 sites mesure des dépôts totaux sous et hors couvert forestier
Ensemble B Autres espèces *Cadence distante*	37 sites Programme tournant		

Tab. 1 : caractéristiques du dispositif proposé

Variables à mesurer	Recommandations du CS
Les variables causales :	
climat (suivi météorologique)	Réduire sans attendre le dispositif aux sites A3 ; mener à son terme l'étude du microclimat local en relation avec les données du réseau de Météo France
dépôts atmosphériques (chimie)	Maintenir cette mesure sur les sites A2 (hors couvert), et sur les sites A3 sous couvert
ozone (chimie passive)	Pause de 5 ans, puis reprise pendant 5 ans consécutifs
ammoniac (chimie passive)	Arrêt des mesures
Les variables de réponse	
dendrométrie	• Option 1 : hauteur et diamètre (10 ans) sur A et B • Option 2 : hauteur (10 ans), diamètre (5ans) sur A
dendrochronologie	pas d'action dans les 10 ans
phénologie	sur A1 et B (débourrement végétatif et floral, chute des feuilles)
suivi sanitaire Option 2 : idem option 1 + tous les 5 ans sur B	• Option 1 : tous les ans sur A1 • Option 2 : idem option 1 + tous les 5 ans sur B
analyse foliaire	• Option 1 : A1 (2 ans), A3 (tous les ans pendant 5 ans, puis pause de 5 ans) • Option 2 : idem option 1, + 3 ans consécutifs tous les 15 ans sur A1 + B
impact de l'ozone sur les arbres et la flore herbacée	Poursuite sur un nombre réduit de placettes, et élargissement du spectre des espèces
litières	• Option 1 : mesure annuelle sur les sites A3 (avec analyse chimique durant cinq années consécutives) et augmentation de la fréquence des prélèvements • Option 2 : extension à A1 de l'option 1 en fonction du bilan de la période 1995-2005
suivi des sols (chimie)	• Option 1 : A3 • Option 2 : A1 • Option 3 : totalité des sites A1 + B
analyse des solutions du sol	Se limiter uniquement aux sites A3 avec une méthodologie à améliorer
inventaire flore (composition)	• Option 1 : A2 (tous les 5 ans), A1 et B (tous les 10 ans) • Option 2 : outre l'option 1, enlèvement des clôtures sur les sites B après la prochaine campagne d'inventaire floristique (2010)
inventaire mycologique/lichénologique	Poursuite sur 30 sites avec « Assurance Qualité »

Tab. 2 : les priorités de mesures du futur système RENECOFOR

forme de projets à caractère temporaire, et assortis de moyens financiers spécifiques à rechercher. Certains de ces projets peuvent concerner la faisabilité et l'opportunité d'inclure en routine les mesures et observations portant sur certaines variables. Les thèmes identifiés selon les 3 groupes de phénomènes évoqués précédemment (encadré) sont les suivants.

Pour les changements climatiques :
- mesure de l'indice foliaire sur les placettes ; la connaissance de l'indice foliaire permet de suivre l'état végétatif des arbres, et d'améliorer la modélisation du cycle de l'eau ;
- phénologie de la végétation basse pour mieux caractériser l'impact des changements climatiques ;
- au niveau du sol, mesure de la réserve utile, suivi de la teneur en eau des sols (sondes TDR) et l'estimation des racines fines (ces données sont importantes pour établir les bilans hydriques) ;
- mesure du carbone et de l'azote des solutions du sol, éléments importants des cycles biogéochimiques.

Pour les dépôts atmosphériques et la nutrition minérale :
- évolution passée avec la dendrochimie en complément de la dendrochronologie ; il s'agit de mesurer de façon rétrospective la composition chimique des cernes du bois, qui peut rendre compte du comportement écophysiologique des arbres pendant une période donnée, de calculer et de reconstruire les exportations minérales ;
- l'évolution future : restauration spontanée de la fertilité (modélisation dynamique des dépassements de charge critique) après des phases de pollution.

Pour la biodiversité :
- description des milieux et peuplements entourant les placettes du réseau et leur évolution (au moyen de la télédétection) ;
- analyse génétique des quatre espèces majeures : chênes, hêtre, pin sylvestre et épicéa ; cette connaissance permet d'estimer le caractère autochtone ou allochtone des peuplements situés sur les placettes, et de mesurer leur diversité génétique, dont on sait qu'elle détermine en partie leur capacité à s'adapter aux changements environnementaux ;
- mesure de l'ADN total du sol, qui traduit l'importance de la biomasse végétale, microbienne, fongique et animale, présente dans le sol ; c'est un indicateur global de l'activité biologique des sols ;
- indicateurs d'état et la faunistique (bio-indicateurs).

Quelques éléments de gouvernance pour le futur RENECOFOR

Le CS suggère dans d'améliorer à l'avenir l'orientation des activités du réseau grâce à la mise en place d'un « groupe de contact » composé d'un petit nombre d'experts, capable d'éclairer en continu les responsables du réseau, notamment en matière scientifique. Par ailleurs, il conviendrait de prévoir des évaluations périodiques (dont la fréquence pourrait être tous les cinq ans), non seulement du réseau lui-même, mais aussi de ses interactions et coordinations avec les autres partenaires du dispositif global de suivi continu des écosystèmes forestiers. Le CS recommande également d'intensifier les échanges d'information avec les partenaires, notamment en privilégiant la fourniture de « métadonnées » et un accès aux données de base, grâce à des bases de données accessibles par Internet. Enfin, le CS suggère de favoriser la diffusion des résultats par une information plus lisible et plus visible, que cette information soit la production du seul réseau RENECOFOR, ou qu'elle soit conjointe avec d'autres « producteurs de données ».

Conclusions

Quinze ans après son lancement, les concepteurs et responsables du réseau RENECOFOR peuvent être légitimement fiers du chemin parcouru et des résultats obtenus. Le bilan est largement à la hauteur des espérances qui avaient sous-tendu sa mise en place. L'évolution du contexte et les nouveaux questionnements ont conduit à revisiter les objectifs et le contenu du réseau. Les propositions faites pour son avenir confirment des éléments forts de continuité, mais suggèrent aussi des évolutions et des ruptures.

Il s'avère hautement souhaitable de mieux articuler les différents maillons du dispositif français – dont RENECOFOR – impliqués dans le suivi continu des écosystèmes forestiers, de manière à améliorer son « rendement global » et ses performances. Le GIP ECOFOR devrait constituer le pivot naturel de cette articulation. Le nouveau réseau RENECOFOR devrait aider la France à consolider sa position en Europe en faisant mieux connaître son activité, mais aussi en tant que force de propositions ou encore comme porteur de projets.

Enfin les suggestions faites pour l'avenir du réseau, et leur déclinaison en options, offrent des bases pour les choix à opérer en fonction d'un environnement budgétaire en évolution. À cet égard et compte tenu de l'importance du réseau RENECOFOR dans l'avenir pour la communauté forestière dans son ensemble et l'ONF en particulier, le CS souligne fortement la nécessité pour l'ONF de pouvoir mobiliser dans la durée des moyens financiers à la hauteur des enjeux. Ceci passe par un partenariat financier à la fois suffisamment étoffé (niveau des contributions des co-financeurs actuels), et plus diversifié (recherche de nouveaux co-financeurs).

Yves BIROT
Président du Comité Scientifique de l'ONF
yves.birot@wanadoo.fr

Guy LANDMANN
Groupement d'Intérêt Public ECOFOR
landmann@gip-ecofor.org

Table ronde : « Quels enjeux et dispositifs d'observation forestière à long terme et quels partenariats ? »

Les participants de la table ronde :

Sylvie ALEXANDRE, adjointe au directeur général de la forêt et des affaires rurales au ministère de l'Agriculture et de la Forêt ;
Jean-Marie BARBIER, directeur de la fédération nationale « Forestiers privés de France » ;
Michel BARITEAU, chef de département adjoint, Département Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques à l'Institut national de la recherche agronomique.
Benoît DAVID, chef de la mission de la connaissance et du système d'information sur la nature et les paysages au ministère de l'Écologie et du Développement durable ;
Pierre-Olivier DRÈGE, directeur général de l'Office national des forêts ;
Ernst SCHULTE, chef du secteur Forêt à la Direction générale Environnement de la Commission européenne ;
Pierre TERRIER, représentant de la région Bourgogne ;
Claude VIDAL, directeur de l'Inventaire forestier national ;
La table ronde était présidée par Yves BIROT, président du Conseil scientifique de la plate-forme technologique européenne Forêt-Bois-Papier, et du Comité Scientifique de l'ONF.

Allocution préalable du directeur général de l'Office national des forêts

Je suis très heureux de vous rejoindre pour cette matinée de synthèse de ce colloque qui salue les 15 ans de RENECOFOR. Manifestement, ce colloque est une réussite – par le nombre de participants, par la richesse des contributions et par les propositions qui en sont d'ores et déjà issues et dont nous tiendrons le plus grand compte. L'initiative de ce colloque me semble très importante ne serait-ce que par la mise en perspective historique qu'il permet. RENECOFOR illustre parfaitement ce que peut être une action publique concertée, volontaire, continue et tenace pour construire une véritable base scientifique de référence pour l'action.

RENECOFOR, ONF

À cet égard, je tiens à saluer les pionniers qui ont porté ce projet à son origine, qu'il s'agisse de Georges Touzet, alors directeur général de l'ONF, de Christian Barthod ou encore de Maurice Bonneau et de Guy Landmann. Confrontés à une polémique sur les dégâts observés en forêt, imputés peut-être un peu hâtivement à l'époque aux pluies acides, ils ont jeté les bases d'une méthodologie objective de collecte de données scientifiques, l'ont structurée au niveau européen et lui ont fourni une assise institutionnelle qui lui a permis de perdurer sur cette longue période de 15 années.

Vous le savez, ce type de réseau comporte 800 placettes au niveau européen, dont 100 pour la France. La résolution S1 de la conférence de Strasbourg de 1990, qui l'a fondé, reste la première d'un processus qui est devenu la référence européenne en matière de gouvernance forestière durable et qui a donné naissance aux conférences ministérielles pour la protection des forêts en Europe. C'est au cours de ces conférences que se

prennent des orientations majeures même s'il n'existe pas de politique européenne en tant que telle en matière forestière. La prochaine se tiendra à Varsovie au mois de novembre prochain.

C'est bien la France qui a constitué ce pilier d'une démarche qui connaît aujourd'hui ces prolongements. Je remercie tous ceux qui ont participé à la conception, la mise en place, le fonctionnement, l'évaluation et l'évolution de ce dispositif qui peut être qualifié d'exemplaire. Outre sa rigueur scientifique, RENECOFOR tire sa force de l'étendue de l'ensemble de ces implantations, en France et en Europe, mais aussi de leur représentativité et de la pérennité des écosystèmes étudiés. Une grande partie des placettes se trouve d'ailleurs en forêts publiques et domaniales, où cette pérennité est plus aisément assurée.

Ce sont précisément ses valeurs, qui sont aussi celles de l'ONF, qui font de RENECOFOR un outil d'avenir, alors même que les hypothèses d'explication directe par la pollution atmosphérique qui ont été à l'origine de sa création ont été sinon écartées, du moins relativisées. RENECOFOR a développé des bases de données qui constituent aujourd'hui une véritable mine d'informations sur le comportement des écosystèmes forestiers confrontés à des évolutions biotiques ou hydriques. Face au changement climatique mondial, de nouvelles interrogations se font jour. Le quatrième rapport du GIEC confirme la réalité et l'ampleur de cet enjeu. De ce point de vue, le suivi de bio-indicateurs par RENECOFOR peut constituer une base de données incomparable pour mesurer les effets effectifs du réchauffement climatique. Pour le forestier, l'incertitude reste grande compte tenu de la multiplicité des facteurs qui interviennent, et des limites de la modélisation qui peine à bâtir des scénarios valables aux situations extrêmes.

Plusieurs attitudes sont possibles, pour le gestionnaire forestier, le chercheur ou l'administrateur. L'éventail est large depuis ne rien faire ou attendre jusqu'à se précipiter pour anticiper, en passant par étudier longuement pour voir. Une stratégie prudente, sorte de retour aux sources pour les forestiers, consiste à recentrer les peuplements sur le cœur de leurs aires stationnelles. Une autre consiste, elle, à affiner la cartographie des risques, à engager des évolutions expérimentales pour disposer d'éléments d'aide à la décision et développer l'action. RENECOFOR constitue l'un des éléments clés de ce processus. C'est la raison pour laquelle il importe qu'il ne reste pas l'apanage des seules équipes qui en assurent brillamment le pilotage. Ses enseignements doivent être largement mis à disposition des gestionnaires et des décideurs dans le cadre de partenariats actifs. J'inclus, dans ces partenariats, les mécanismes de financement du Réseau. En effet, la pérennité financière de RENECOFOR n'est pas encore totalement assurée, en dépit de l'importante participation de l'ONF qui prend en charge 40 % de ses coûts et en assure le fonds de roulement.

Je profite de la présence de nombreux partenaires, en particulier Sylvie Alexandre qui représente le ministre de l'Agriculture et de la Forêt, pour souligner ce point et la remercier de l'action décisive qu'elle a eue pour conforter dans cette période un peu incertaine le financement pour l'année 2007.

Par ce colloque, RENECOFOR voit sa pertinence renouvelée. Si l'intérêt des décideurs est à la hauteur de la qualité et de la portée de ce travail, les conditions d'un nouvel engagement doivent, j'en suis certain, pouvoir être trouvées. Soyez en tout cas assurés que l'Office National des Forêts s'y emploiera. Je m'y engage parce que j'ai la conviction que les enseignements de RENECOFOR peuvent éclairer les décideurs sur la contribution positive que les forêts peuvent apporter dans la lutte contre le changement climatique et valoriser sous forme de capacité de séquestration de carbone ou de production de matériaux et d'énergies renouvelables.

C'est l'un des grands enjeux des prochaines années. La forêt tempérée, cela est peu connu, apporte une séquestration nette de carbone, contribuant ainsi de façon décisive à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont largement participé au succès de ce colloque. Je remercie également tous les techniciens et ingénieurs de l'Office National des Forêts qui font vivre le réseau au quotidien en plus de leurs missions normales. Nous pouvons être fiers de la contribution qu'apporte RENECOFOR, au sein de l'ONF, depuis 1990. Il a su allier la curiosité intellectuelle et une certaine indépendance face aux modes, mais aussi se montrer visionnaire en s'attachant aux interactions forêts/carbone alors même que l'effet de serre suscitait encore une ironie entendue. C'est sans doute parce qu'avant de les étudier et de les interpréter, les forestiers ressentent les changements des écosystèmes qui leur sont confiés. Sachons développer ce sens du recul et du questionnement au travers de la poursuite de cet ambitieux programme de maintien et de développement de RENECOFOR, en le conjuguant à l'action avec discernement et détermination.

Pierre-Olivier DRÈGE
Directeur général
de l'Office national des forêts

Table ronde

RENECOFOR, ONF

Yves BIROT
En ouvrant cette table ronde, je voudrais adresser un remerciement très chaleureux à Jean-Luc Peyron, directeur du groupement d'intérêt public ECOFOR, qui a en fait été l'artisan et la cheville ouvrière de son organisation. Ces deux derniers jours consacrés au réseau RENECOFOR ont été très riches d'enseignements. À l'issue de cette conférence, cette table ronde a l'ambition de se placer dans le cadre plus global des dispositifs d'observation -au sens large- sur la forêt. Ces dispositifs font partie d'un ensemble très vaste, qu'on décrit parfois de manière linéaire comme un continuum allant de systèmes d'observation très intensifs, sur des sites fortement équipés, à des systèmes plus extensifs. Comme il a été dit hier, c'est ce continuum qui permet les extrapolations et la spatialisation. Dans la réalité, il faut plutôt voir les systèmes d'observation comme une nébuleuse où, à côté de ce continuum, d'autres dispositifs (dispositifs expérimentaux de nature variée) aussi peuvent contribuer au suivi à long terme des écosystèmes forestiers et à la prise en compte d'enjeux élargis (biodiversité, changement climatique). Il faut donc appréhender cela de manière globale, et organiser les complémentarités de ces différents systèmes, notamment au niveau thématique, mais aussi à celui des diverses échelles, afin d'optimiser les enseignements à en tirer.

Cette table ronde va permettre de revenir sur les enjeux, déjà largement évoqués : les changements climatiques, l'évolution des sols, l'évolution des écosystèmes sous l'effet des apports externes, la biodiversité, etc. Elle va aussi s'intéresser à la pertinence et à la complémentarité des systèmes d'observation. Une complémentarité, il faut l'organiser, l'articuler, et l'orchestrer en fonction des différents enjeux, à travers un partenariat co-construit entre les différents acteurs : de la recherche, du développement, de la gestion et des décideurs. Les membres de la table ronde vont nous aider dans cette réflexion sur le suivi à long terme des écosystèmes forestiers, en apportant par leur intervention un éclairage sur les enjeux ou le partenariat, en fonction de leur expérience et de leur vision propre. Ces interventions seront suivies par une discussion générale.

Pierre TERRIER
Nous sommes très heureux de vous accueillir en Bourgogne, dans cette grande capitale des vins qu'est Beaune. Il n'y a pas longtemps, d'ailleurs, se tenait dans cette même salle un colloque intitulé « changement climatique et vigne ». J'ajoute que notre région compte 100 000 hectares de forêts.

En partant des grandes conclusions du GIEC, une double question se pose : la question énergétique et la question climatique. Toutefois, si l'hypothèse centrale de modification du climat est à peu près acceptée par la communauté scientifique, cette dernière ne décrit pas les modalités précises de ce changement et de ses conséquences annexes. L'ensemble du monde vivant est touché. Au regard de l'imprécision sur le long terme des effets du changement annoncé, que faire pour anticiper des résultats que nous ne connaissons pas vraiment ? Il est heureux que les forestiers et la puissance publique s'interrogent sérieusement sur ces points. Mais que faire, sur le terrain, pour anticiper la modification du système considérée comme quasi certaine, alors même que nous ne comprenons pas encore bien quels sont les éléments constitutifs de ce système qui seront modifiés ? Il est très positif que le réseau que vous représentez s'inscrive dans cette opération.

Cependant, je suis surpris de constater l'absence du fait local dans les différents documents que vous nous avez remis. Il ne peut y avoir un travail sérieux d'anticipation des conséquences des modifications climatiques que si les acteurs économiques, sociaux et environnementaux sont associés

dès le départ, là où ils sont, à la réflexion sur les outils, les méthodes ou les nouvelles valorisations à mettre en œuvre. Il ne peut pas y avoir une tête qui pense et des acteurs locaux déconnectés. Une véritable association est indispensable. Les régions doivent constituer l'interface entre ceux qui pensent et ceux qui agissent au quotidien. Voilà deux mois, la région Bourgogne a voté un plan climat visant notamment deux objectifs : économiser l'énergie et mobiliser de nouvelles sources.

En résumé, je dirais oui au réseau à condition qu'il soit interactif. Ouvrez-vous sur la société des acteurs. C'est la condition pour que ceux qui agissent comprennent qu'il faut changer et ce, dans le sens que nous espérons que vous décrirez avec pertinence, intelligence et perspicacité.

Jean-Marie BARBIER
La forêt privée n'est que très peu représentée dans la salle. Elle est pourtant avant tout un réseau d'hommes qui contribuent à la gestion des trois-quarts du territoire forestier français. Nos besoins sont donc nombreux et importants. J'ajoute que le réseau d'hommes que nous représentons peut être mis à disposition d'un dispositif commun avec la forêt publique et la forêt européenne, afin que chacun profite de l'expérience des autres. Les besoins de la forêt privée ne sont pas très différents de ceux des autres gestionnaires forestiers. Il nous faut des données, des projections et des conclusions permettant d'éclairer les décisions de gestion, mais aussi de faire évoluer les types de gestion ou encore les essences utilisées. Par ailleurs, tout n'a pas été dit sur la capacité de nos forêts à fixer le gaz carbonique. Des réflexions entre nous seront nécessaires sur ce thème. Nous avons également besoin de données sur la nature des risques que nous avons identifiés, notamment en matière d'incendies de forêts et de tempêtes.

Dans le contexte actuel, il serait vraiment irresponsable de ne pas se donner les moyens de faire ces observations. Nous souffrons d'une carence que nous devons combler au plus vite pour faire avancer nos connaissances et en tirer les premières conséquences. Je tiens d'ailleurs à noter que ces dernières sont d'ores et déjà existantes. Le réchauffement climatique ne concernera pas uniquement nos enfants ou nos arrière-petits-enfants. Il nous concerne déjà. L'arbre que nous mettons en terre aujourd'hui est celui qui subira l'évolution climatique. C'est bien aujourd'hui qu'il faut penser aux incidences de la modification du climat sur nos peuplements, sur nos modes de gestion et sur les essences que nous utilisons. Nous parlons bien d'un problème éminemment actuel.

Permettez-moi maintenant de dire un mot de la contribution de la forêt privée au RENECOFOR et de l'interface indispensable qui doit exister entre la recherche et le terrain. Le réseau d'hommes de la forêt privée doit être un acteur du Réseau, qu'il s'agisse des gestionnaires ou des propriétaires forestiers. Les forestiers privés, lorsqu'ils vivent près de leur forêt et qu'ils y sont actifs, observent de nombreuses évolutions. Il est utile qu'ils puissent les faire remonter. Par ailleurs, si l'on veut animer le Réseau, il est essentiel de diffuser les résultats et d'assurer une interface entre la recherche et le terrain. Il serait vraiment dommageable que les données de la recherche restent confidentielles. L'enjeu est de taille : c'est l'avenir de nos forêts, et pas seulement du quart d'entre elles, qui est en cause. Les chercheurs ne doivent pas se limiter à faire des publications internationales. Ils ont la responsabilité de veiller à l'utilisation de leurs résultats et de faire vivre le réseau d'observation. À cet égard, des organismes se situent à l'interface entre la gestion et la recherche. C'est notamment le cas de l'Institut de développement forestier (IDF) en forêt privée et des services correspondants de l'Office national des forêts.

L'IDF peut fonctionner dans les deux sens, du terrain à la recherche en aidant à collecter les données et en formant les acteurs, mais aussi de la recherche vers le terrain en diffusant les résultats. Cela suppose que des hommes effectuent des tâches d'interface. Il existe, à ce titre, des postes transferts créés au sein des organismes de recherche et travaillant sur des sujets intéressant les gestionnaires. Ils peuvent jouer un rôle essentiel. Ce type de dispositifs doit être développé, de même que les financements qui leur permettent de fonctionner. Le produit de l'activité de recherche n'est pas directement assimilable par l'homme de terrain. Des personnes sont nécessaires pour assurer un lien entre chercheurs et gestionnaires. Enfin, dans cette affaire, trois éléments sont indispensables : la transparence dans la diffusion des résultats, la complémentarité et l'échange, et des moyens. C'est à ces trois conditions que nous pourrons évoluer ensemble sur des bases fiables face aux changements quasi inéluctables qui nous attendent.

Ernst SCHULTE
À la demande des États-membres, la Communauté européenne a établi des règlements en matière de surveillance des forêts. Parallèlement à cela, les Nations unies ont lancé le Programme international de coopération en matière de surveillance des forêts. Nous travaillons de concert. L'Union européenne a d'ailleurs financé ce programme à hauteur de 750 000 euros par an pour la période 2003-2006. Le règlement 3528/86 sur la pollution atmosphérique a subi divers changements avant de donner lieu au règlement « Forest Focus ». Certaines actions

lancées dans le cadre de ce règlement ont été financées à 50 %, voire 75 %, par l'Union. Au total, 200 à 300 millions d'euros ont été dépensés par les États-membres.

J'ai entendu, au cours de ces deux jours, des rumeurs selon lesquelles l'Union européenne se retirerait du cofinancement. Ces rumeurs sont infondées. De fait, un nouveau règlement (« Life Plus ») sera adopté au mois de juin prochain et qui prendra effet au début de l'année 2008. Il s'articulera autour de trois composantes : nature et biodiversité (à laquelle seront dédiés 50 % des moyens financiers), environnement et gouvernance, information et communication. Un appel à propositions a été lancé, afin d'assurer une continuité à « Forest Focus ». Certes, le budget communautaire dédié à la surveillance des forêts sera réduit. Mais il convient de rappeler que les États-membres n'ont pas fait suffisamment de *lobbying*. Quoi qu'il en soit, je suis certain que nous trouverons des voies d'amélioration. Nous sommes dans une situation délicate, mais nous ferons de notre mieux pour en sortir.

Benoît DAVID
Pour la direction de la Nature et des Paysages (DNP), le principal enjeu du suivi des forêts est celui de la biodiversité. La stratégie nationale pour la biodiversité constitue le cadre national de mise en œuvre des recommandations de la convention sur la diversité biologique. L'objectif phare est de stopper la perte de biodiversité d'ici 2010. La stratégie a été adoptée en 2004 en conseil des ministres et a été intégrée à la stratégie nationale du développement durable. Elle est mise en œuvre de manière pratique au travers de plans d'actions pilotés par les différents départements ministériels concernés. Parmi eux, le plan d'action Forêt a été adopté en septembre 2006 en conseil des ministres. Il constitue le volet biodiversité du programme forestier national.
Ses six objectifs transversaux sont les suivants :
- mieux cibler les actions de protection et mesurer leur effet sur la biodiversité,
- mieux prendre en compte la biodiversité dans la gestion forestière aux différentes échelles,
- compléter les réseaux d'espace protégés et les plantes de restauration d'espèces protégées,
- renforcer la coordination et la concertation au plus près du terrain,
- informer et former les propriétaires forestiers et les autres acteurs,
- sensibiliser et informer le grand public.

Pour atteindre ces objectifs, la DNP a mis en œuvre un partenariat intitulé « système d'information nature et paysages ». Ce faisant, il s'agit de structurer les connaissances sur la biodiversité et les paysages, mais aussi de faciliter la mobilisation de ces connaissances pour élaborer et évaluer les politiques publiques, évaluer l'impact des plans, des programmes et des projets, mettre à disposition des citoyens une information suffisante pour permettre le débat et respecter les engagements européens et internationaux. Nous avons choisi d'élaborer et de mettre en œuvre ce système d'information en lien avec les collectivités territoriales et les ONG, avec une gouvernance transparente, partagée et fondée sur des principes scientifiques et de qualité. Plusieurs lieux d'échange principaux ont été créés, au titre desquels un comité national, une coordination scientifique et des comités de suivis régionaux.

Par ailleurs, l'inventaire des dispositifs de collecte des données et des bases de données des acteurs est en cours, en lien avec l'Ifen et en coordination avec le Ca-SIF (Catalogue des sources de l'information en forêt). Cet inventaire sera animé par les DIREN, au niveau régional.

Claude VIDAL
Depuis 1995, l'Inventaire forestier national a la mission de préparer le rapport sur la gestion durable. Ce travail d'ensemblier met en évidence la capacité de réponse des réseaux existants aux préoccupations de suivi continu des forêts, mais également leurs limites. De nouveaux besoins émergent, comme la nécessité de quantifier les prélèvements, ou la caractérisation des effets du changement climatique mondial. Il est du ressort de chaque maillon du réseau d'observation des forêts de proposer des éléments de base pour une meilleure compréhension des phénomènes et une anticipation de leurs conséquences. Mais il devient de plus en plus urgent et indispensable pour chacun d'être à l'écoute des autres, en particulier en matière de nouvelles prises de données.

Depuis quelques années, intégrant le caractère évolutif de la demande d'informations, l'Inventaire forestier a développé un dispositif réactif de collecte et de démarche. Ce dispositif doit être valorisé en multipliant les partenariats. J'en citerai trois exemples. Tout d'abord, depuis le changement de méthode de sondage, en 2003, la collecte d'informations s'effectue annuellement sur l'ensemble du territoire. Dorénavant, lors de la mise à jour des indicateurs de gestion durable, les données correspondront bien à un état des lieux pour une année donnée sur l'ensemble du territoire, ce qui n'était pas le cas précédemment. Ensuite, le dispositif d'observation que nous avons adopté couvre l'ensemble du territoire *via* 7 000 points forêts. Ce réseau, qui est le plus dense des réseaux d'observation forestiers, peut servir de support à la collecte d'informations ponctuelles et à la veille générale sur les forêts. Nous observons par exemple, avec le

département de la santé des forêts, la présence de branches mortes afin de caractériser l'état des peuplements et d'alerter des experts pour caractériser les raisons d'un dépérissement particulier. Ce véhicule général devrait pouvoir servir d'indicateur d'alerte pour d'autres types de problématiques. Enfin, la souplesse du dispositif standard permet de le modifier pour intégrer d'autres objectifs. C'est un atout pour accroître les synergies avec d'autres réseaux et améliorer la réponse à des demandes précises et pérennes.

Je souhaite maintenant revenir à la dimension européenne de la problématique forestière dans la problématique des changements climatiques. Un échange et une comparabilité transfrontalière sont indispensables. Certains réseaux comme RENECOFOR ont été établis dès l'origine avec une concertation européenne. Pour d'autres, la demande initiale était nationale. C'est le cas de l'Inventaire forestier national qui s'est structuré pour participer à la réflexion sur l'harmonisation des inventaires ou à des projets transfrontaliers. Cette politique d'ouverture et de coopération est le premier maillon indispensable à la construction d'un dispositif de suivi européen des forêts. Ce dispositif devrait pouvoir s'appuyer sur une première étape nationale structurante forte, pour montrer que la France peut être force de proposition. Je crois qu'il nous faut construire cette étape ensemble et très rapidement.

Michel BARITEAU
Pour comparer l'action du chercheur et celle du gestionnaire, je dirais que le chercheur est plus centré sur des sites ateliers afin de comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers, d'identifier les points de rupture, les seuils ou les charges limites. Il s'attaque à des processus complexes qu'il modélise. Son outil est principalement les ORE, Observatoires de recherche en environnement, mais pas seulement. La recherche produit des connaissances dans des conditions d'observation et d'expérimentation très variées. Le gestionnaire, lui, doit connaître l'état de santé de ses forêts et observer leur évolution lente sous l'effet de différents facteurs, y compris ses propres pratiques sylvicoles. Il pratique un suivi descriptif, et plus extensif que celui du chercheur. Son outil est principalement le RENECOFOR, mais ce n'est pas le seul.

La mise en réseau des différents outils vise à renforcer une démarche scientifique commune dans le domaine des cycles du carbone et des éléments minéraux, mais aussi à étudier le fonctionnement de l'écosystème forestier en évolution lente et ses réactions face à des événements extrêmes. L'un des objectifs majeurs des ORE est de disposer de données acquises sur le long terme. Cela suppose que soient créés des systèmes d'information, ce qui est le cas actuellement. Les ORE favorisent les partenariats et les échanges. Il est à noter que les croisements de données apportent parfois des résultats qui ne seraient pas accessibles autrement. Les apports de la recherche permettent de mieux comprendre le fonctionnement limite de l'écosystème, voire ses dysfonctionnements. À un niveau plus global, les travaux permettent d'appréhender aux niveaux national et continental les grandes questions sur l'évolution de l'atmosphère et la séquestration du carbone. En conclusion, je souhaite mettre l'accent sur trois mots : continuer, évoluer et partager.

Sylvie ALEXANDRE
Tous les efforts qui sont consentis et toutes les réflexions qui sont conduites le sont sous un regard attentif et très préoccupé de maintenir les compétences qui se sont développées, afin de les perpétuer au service des différents enjeux. Nous avons tous en tête la problématique très prégnante du changement climatique et de ses conséquences sur la forêt. Ces derniers sont multiples. Aussi avons-nous besoin de données d'observation fiables et incontestables sur lesquelles construire des expertises. Les politiques publiques sont désormais assorties d'un volet évaluation, qui impose un suivi adapté. Souvent, malheureusement, les informations disponibles sont insuffisantes. Ces lacunes doivent être comblées avec des données fiables et claires.

La demande politique et économique a largement évolué depuis la création du Réseau. Elle rend elle aussi indispensable une observation très élaborée pour optimiser un pilotage, nourrir un dialogue et tenter d'anticiper, dans la mesure du possible. Depuis l'origine, nous avons beaucoup travaillé sur l'évaluation des volumes sur pied et des accroissements ou sur la question de la ressource. Cette dernière reste au cœur des enjeux, notamment en ce qui concerne le bois énergie.
Je souhaite saluer le travail formidable qui a été entrepris. Ces quelques heures passées en votre compagnie m'ont permis de mesurer à quel point vous avez pris à cœur votre tâche.

Les attentes du ministère vous ont été présentées. Elles sont matérialisées dans le programme forestier national pour 2006-2015 et dans le plan d'action de la stratégie nationale pour la biodiversité. D'autres attentes existent, liées aux politiques mises en œuvre par d'autres ministères. Des synergies sont nécessaires, ainsi qu'une grande lisibilité de nos systèmes. Pour citer cet exemple, le besoin d'information, d'analyse de risques et d'études rétrospectives est très fort concernant notamment les incendies de forêt. Les interlocuteurs sont, qui plus est, très nombreux et divers. Il en est de même

concernant la biomasse forestière. Pour optimiser, il faut mutualiser. Nous comptons sur l'ensemble des acteurs et sur l'implication du GIP ECOFOR. Une nouvelle gouvernance est à trouver. La recherche doit s'impliquer, également. Enfin, il convient que les collaborations s'inscrivent dans un cadre au moins européen. Le colloque a montré qu'il existait une grande convergence de vues sur le deuxième souffle à trouver, éventuellement en revisitant certains des paramètres du Réseau actuel.

Par ailleurs, du point de vue des partenariats financiers, les enjeux de l'observation et du suivi continu des forêts n'ont jamais été aussi importants qu'aujourd'hui. En 2007, nous avons consenti un effort important pour soutenir le RENECOFOR et l'ensemble du dispositif de surveillance. Nous avons également veillé à ce que cette mission soit dans les contrats d'objectifs des différents établissements publics qui sont les opérateurs et les instruments de la politique forestière. Il est très important que la forêt privée soit associée et s'implique. De fait, elle a beaucoup à apporter. Je formule le vœu qu'après l'adoption du règlement « Life Plus » le thème du suivi des forêts soit bien inscrit parmi les thèmes du futur appel d'offres. De notre côté, nous ferons nos meilleurs efforts pour sensibiliser nos partenaires des autres États-membres afin qu'une offre coordonnée puisse être préparée.

Permettez-moi, pour finir, de dire un mot du partenariat avec les collectivités territoriales. La préoccupation est très forte, à tous les échelons. Nous ne pouvons que nous en féliciter et souhaiter que tout le monde comprenne bien l'intérêt qu'il y a à mutualiser les moyens disponibles et à harmoniser les méthodologies et les dispositifs pour que, sur le long terme, la valorisation des observations et leur pérennité puissent être assurées.

Yves BIROT
Je vous remercie. La parole est à la salle.

Maurice BONNEAU
Je reviens sur l'évaluation et les propositions d'ajustement du réseau. Vous suggérez trois ans continus tous les 15 ans, pour les analyses foliaires. Je pense qu'il serait plus utile de prévoir cinq ans. Par ailleurs, j'observe que les résultats de RENECOFOR ont été traduits en étude globale concernant l'ensemble des placettes du Réseau. Je regrette qu'aucun document de synthèse n'ait été établi placette par placette. Une telle démarche rejoindrait tout à fait la suggestion de Sylvie Alexandre sur un meilleur renseignement des instances locales.

Jean-Paul PARTY, Sol Conseil
Concernant aussi l'évaluation, vous avez proposé une réduction du nombre de placettes tout en insistant, par ailleurs, sur l'augmentation des besoins. Tout cela n'est pas très cohérent. J'espère, à ce titre, que la proposition qui nous a été faite est encore discutable. Ne serait-ce que parce qu'elle conduit à exclure les essences qui couvrent la majorité des forêts françaises en milieu montagnard. C'est négliger le caractère refuge des zones de montagne, en particulier vis-à-vis de la biodiversité. Ne pourrait-on pas faire du programme « Natura 2000 » une tête de pont ? Par ailleurs, je regrette qu'aucune proposition de cofinancement n'ait été formulée au cours de ces trois jours.

Max PENNEROUX
Je tiens à rassurer Jean-Marie Barbier : il n'est pas le seul représentant de la forêt privée française. La société forestière de la Caisse des Dépôts est également présente. Je suis très heureux d'avoir assisté à ce colloque très riche d'enseignements sur des travaux de 15 ans.
Par ailleurs, je pense moi aussi qu'il est important que le gestionnaire puisse avoir des interlocuteurs de la recherche ciblés, et que les forestiers aient une vue claire sur les organismes de rattachement qui peuvent leur apporter des précisions sur les sujets qui les préoccupent. Nous attendons des recettes et des outils d'aide à la décision dans un environnement complexe. Pour autant, nous n'attendons pas de recettes toutes

faites. Il importe de définir, me semble-t-il, des niveaux de risque. Les chercheurs hésitent à transmettre certaines informations non abouties, donc à risque. Pour notre part, nous sommes prêts à accepter à prendre des risques à partir du moment où ils sont suffisamment mesurés. Enfin, nous sommes prêts à soutenir les efforts de la recherche tant au niveau de la réflexion qu'à celui de l'expérimentation.

Patrice MENGIN-LECREULX
Je souhaite apporter un témoignage sur des partenariats qui fonctionnent, qui sont nombreux. Je pense notamment au partenariat INRA-ONF ou encore au partenariat France-Forêt avec la forêt privée. Une réflexion est également engagée au sein du GIP ECOFOR sur l'articulation des réseaux pour observer de manière intelligente les effets du changement climatique. Par ailleurs, il me semble que pour nous projeter dans un avenir incertain, nous aurons à développer la modélisation, qui deviendra un outil d'investigation et de dialogue.

Yves BIROT
Je vous remercie, ainsi que tous les participants à cette table ronde.

Clôture du colloque

Liste des participants

ALBANELL Sylvestre
Office National des Forêts Chalet forestier de Lembach Route de Biche F –67110 Lembach albanell.sylvestre@onf.fr
ALEXANDRE Sylvie
Ministère de l'Agriculture (MAPAR) Sous direction de la forêt et du bois 19 avenue du Maine 75732 Paris Cédex 15
ANDRIEU Jacques
Ministère de l'Agriculture (MAPAR) Sous direction de la forêt et du bois 19 avenue du Maine 75732 Paris Cédex 15
ARCHAUX Frédéric
CEMAGREF Unité de recherche "Ecosystèmes forestiers et paysage" Domaine des Barres 45290 NOGENT SUR VERNISSON frederic.archaux@cemagref.fr
ARCIS Jacky
Office National des Forêts Champaillasses Route de Chalvet 05200 EMBRUN jacky.arcis@onf.fr
AREND Jean-Pierre
Administration des Eaux et Forêts Cantonnement forestier de Luxembourg-Est 3 rue Neihaisgen
L - 2633 SENNINGERBERG jean-pierre.arend@ef.etat.lu
BADEAU Vincent
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité de Recherche Ecophysiologie Forestière
Equipe Phytoécologie Forestière F - 54280 CHAMPENOUX badeau@nancy.inra.fr
BAFFALIO Jean-Louis
Office National des Forêts 1 rue Maréchal Harispe BP 5 64130 MAULEON-LICHARRE jean-louis.baffalio @onf.fr
BAILLY Serge
Office National des Forêts 1 rue du tambois 88520 GEMAINGOUTTE serge.bailly@onf.fr
BARBE Bernard
Office National des Forêts MF le Plan 04320 ENTREVAUX bernard.barbe@onf.fr
BARBU Ion
ICAS Forest Research Station Compulung-Moldovensc 73 b Calea Bucovinei RO - 725100 CAMPULUNG
MOLDOVENESC Roumanie barbu.ion@icassv.ro
BARITEAU Michel
INRA Domaine St Paul Site Agroparc 84914 Avignon Cedex 9 michel.bariteau@avignon.inra.fr
BAROCHE Christiane
Office National des Forêts 2 avenue de Saint mandé 75570 PARIS CEDEX 12
BARRAY Nicolas
Office National des Forêts M.F. de Wuy 76940 LA MAILLERAYE SUR SEINE nicolas.barray@onf.fr
BARSOUM Nadia
Forest Research Alice Holt Lodge Farnham Surrey GB - GU10 4 LH Royaume-uni nadia.barsoum@forestry.gsi.gov.uk
BASTIEN David
Office National des Forêts BP 22 10 rue Pasteur 51470 SAINT MEMMIE david.bastien@onf.fr
BATIFOULIER Sébastien
Office National des Forêts 11 rue des essarts 39400 MOREZ sebastien.batifoulier@onf.fr
BAUBET Olivier
Département de la Santé des Forêts Echelon technique Massif Central - Bourgogne BP 45 Marmilhat
F - 63370 LEMPDES beaubet.dsf@wanadoo.fr
BAUBION Jacques
Office National des Forêts UT de L'ARGENTIERE LA BESSEE 404 avenue Charles de Gaulle
05120 L'ARGENTIERE LA BESSEE jacques.baubion@onf.fr
BAUDET Dominique
Office National des Forêts M.F. du Grandmont 18330 VOUZERON dominique.baudet@onf.fr
BAULNY Hervé
Office National des Forêts MF de Laveline 5 route de la chapelle 88600 LAVELINE DEVANT BRUYERES
herve.baulny@onf.fr
BEGIN Jean-Etienne
Office National des Forêts MF de Wuisse 57170 WUISSE jean-etienne.begin@onf.fr
BELLOIR Joël
Office National des Forêts MF Néricou 44130 LE GAVRE Tél : 02 40 51 22 51
BERNARD Jean-Albert
Office National des Forêts U.T de Savines le Lac rue de Serre-Verger 05160 SAVINES LE LAC jean-albert.bernard@onf.fr
BERNARD Jérôme
Office National des Forêts MF des Courlis 52160 AUBERIVE
BEZET Frédéric
Office National des Forêts 2, rue des Engreseules 39300 SIROD Tél : 03 84 51 84 92

BIBIANO Régis
Office National des Forêts 1175 Chemin du Lavarin 84000 AVIGNON regis.bibianon@onf.fr
E. BIDEAU
INRA – TOULOUSE Auzeville BP 5267 31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX Tél 05 61 28 50 28
BIDEAULT Jean François
22 rue des roches 29310 LOCUNOLE
BIENAIME Séverinne
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestie
Equipe Cycles Biogéochimiques F - 54280 CHAMPENOUX
BIROT Yves
5 allée Canto Cigalo 30400 VILLENEUVE LES AVIGNON yves.birot@wanadoo.fr
BOITTE Jean Yves
Office National des Forêts Agence St Dié des Vosges Cité administrative 13 rue Pasteur 88110 Raon l'Etape
jean-yves.boitte@onf.fr
BONNEAU Maurice
7 rue Albert Camus 66600 RIVESALTES
BORTHELLE Vincent
Office National des Forêts MF. d'Arbouty 64570 LANNE-EN-BARETOUS vincent.borthelle@onf.fr
BOUCHAUD Jean-Michel
Office National des Forêts 3 rue du Stade 55120 CLERMONT EN ARGONNE jean-michel.bouchaud@onf.fr
BOUCHOUX Bernard
Office National des Forêts MF des allées Route de Chateaurenault 41000 BLOIS bernard.bouchoux@onf.fr
BOURJOT Laurence
Consultant en environnement BP 300 Savoie Technolac F - 73375 LE BOURGET DU LAC CEDEX
laurence.bourgot@free.fr
BREDA Nathalie
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equipe Phytoécologie F - 54280 CHAMPENOUX
breda@nancy.inra.fr
BREMER Christian
Direction des Eaux et Forêts L - 2712 WALDHAFF Luxembourg christian.bremer@ef.etat.lu
BRESSON Yves
Office National des Forêts STT Bourgogne Champagne Ardennes MF du Tremblois 21910 CORCELLES
LES CITEAUX yves.bresson@onf.fr
BRETHES Alain
Office National des Forêts Parc Technologique Orléans-Charbonnière 100 bd de La Salle BP 23
45760 BOIGNY-SUR-BIONNE alain.brethes@onf.fr
BRETON Vincent
CEMAGREF - Grenoble Unité de recherche des écosystèmes montagnards 2 rue de la papeterie BP 76
38402 SAINT MARTIN D4HERES CEDEX vincent.breton@cemagref.fr
BREZARD Jean-Marc
Office National des Forêts – Direction technique – 2 avenue de Saint Mandé – 75570 PARIS cedex 12
BRITO RODRIGUEZ Reinel
Universidad de Valladolid Santiago n° 9 1 B E - 34004 PALENCIA Espagne
CAMARET Sylvaine
Université de Savoie Laboratoire des Ecosystèmes d'Altitude BP 300 Savoie Technolac
F - 73375 LE BOURGET DU LAC sylvaine.camaret @univ-savoie.fr
CANS Roger
6 rue de l'église 72510 ST JEAN DE LA MOTTE cans@wanadoo.fr
CARNAISSE Claude
Office National des Forêts 6, rue Principale F –55160 LATOUR EN WOEVRE claude.carnaisse@onf.fr
CAROULLE Fabien
Département de la Santé des Forêts Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation de la Pêche 19 avenue du Maine
75732 PARIS CEDEX 15 fabien.caroulle@agriculture.gouv.fr
CARRE Francis
Office National des Forêts 31 Grande Rue 10500 RADONVILLIERS francis.carre@onf.fr
CASSONNET Christian
Office National des Forêts MF des Haies 78113 BOURDONNE christian.cassonnet@onf.fr
CECCHINI Sébastien
Office National des Forêts Direction Technique RENECOFOR Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
sebastien.cecchini@onf.fr
CHAGNOLEAU Patrice
Office National des Forêts MF des renardières 72220 MARIGNE LAILLE

CHAMBON Véronique
Office National des Forêts M.F Piet 56560 ABRESCHVILLER
CHAPPA Rémi
Office National des Forêts Domaine de la Palud les Rochets 05000 GAP waytpye@aol.com
CHARLIER Gérald
Office National des Forêts 12 rue du 12ème Chasseur 55300 SAINT MIHIEL gerard.charlier@onf.fr
CHAVALARIAS Ludovic
Office National des Forêts MF de Cherbailloux Rue Alexandre Guillon 23000 GUERET ludovic.chavalarias@onf.fr
CHOPARD Bruno
Office National des Forêts BP 22 10 rue Pasteur 51470 SAINT MEMMIE bruno.chopard@onf.fr
CHUINE Isabelle
CEFE-CNRS 1919 route de Mende 34293 Montpellier cedex 05 isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr
CLEMENT Jean-François
Office National des Forêts Pôle Recherche et Progrès Technique Site de Marmilhat Sud BP 106 63370 LEMPDES
jean-francois.clement@onf.fr
CODDEVILLE Patrice
Ecole des Mines 941 rue Charles Bourseul F - 59508 DOUAI coddeville@ensm-douai.fr
COMTE Bernard
Office National des Forêts 178 route des Deudes 74200 ARMOY bernard.comte@onf.fr
CONRARD François
Office National des Forêts Service Technique 21 rue du Muguet 39100 DOLE sart.dt-besancon-fc@onf.fr
CORNE Samuel
Office National des Forêts 2 rue du Clos Sirod 39600 ARBOIS samuel.corne@onf.fr
CORTEY Jean Yves
D.D.A.F Saône et Loire Cité administrative 71000 MACON jean-yves.cortey@agriculture
CORVOL-DESSERT Andrée
CNRS Institut d'histoire moderne 4 rue d'Ulm 75005 PARIS ghff@ens.fr
COURTECUISSE Régis
Université de Lille II Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques Département de botanique BP 83
F - 59006 LILLE CEDEX regis.courtecuisse@phare.univ-lille2.fr
CROISE Luc
Office National des Forêts Direction Technique RENECOFOR Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
luc.croise@onf.fr
CUGNY-SEGUIN Marie
IFEN 5 route d'Olivet BP 16105 45061 ORLEANS CEDEX 2
DAILLANT Olivier
Observatoire mycologique 71250 MAZILLE
DALSTEIN Laurence
69 avenue des Hespérides F - 06300 NICE L.DALSTEIN@aol.com
DAMBRINE Etienne
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestie
Equipe Cycles Biogéochimiques BP 35 F - 54280 CHAMPENOUX dambrine@nancy.inra.fr
DAUBRE Jean Baptiste
SERFOB Rhône Alpes 165 rue Garibaldi BP 32002 63401 LYON CEDEX 03 jean-baptiste.daubre@agriculture.gouv.fr
DAUFRESNE Tanguy
INRA - TOULOUSE Auzeville BP 5267 31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX
DAUGERON Marc
Office National des Forêts U.T Allevard-Gregivaudan M.F. d'Allevard 38580 ALLEVARD marc.daugeron@onf.fr
DE FALVARD Jean-François
Office National des Forêts M.F. du Guéry 63210 ROCHEFORT- MONTAGNE jean-françois.de-falvard@onf.fr
DELAHAYE PLANCHOUT Marc
Office National des Forêts Cellule Régionale d'Appui Technique ACTIPLUS ZI Saint Joseph BP 612
F - 04106 MANOSQUE marc.delahaye-planchout@onf.fr
DELEUZE Christine
AFOCEL Route de Bonnencontre 21170 CHARREY SUR SAONE
DELON Pascal
Office National des Forêts Unité territoriale Saulnot Malval 1bis, route de Ganges 70400 SAULNOT
pascal.delon@onf.fr
DEROME Hervé
Office National des Forêts UT DOLE 21 rue du Muguet 39100 DOLE herve.derome@onf.fr
DERONZIER Patrick
Ministère de l'Agriculture (MAPAR) Sous direction de la forêt et du bois 19 avenue du Maine 75732 Paris Cédex 15

DERYCKE Anne
Département de la Santé des Forêts Echelon Nord-Est Nancy Domaine de Pixérécourt 54220 MALZEVILLE
anne.derycke@agriculture.gouv.fr
DESAULES André
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tanilon ART Reckenholzstr.191 CH - 8046 Zurich Suisse
andre.desaules@art.admin.ch
DESPLANCHES Philippe
Office National des Forêts 23 bis boulevard Bonrepos 31000 TOULOUSE philippe.desplanches@onf.fr
DESSEAUX Didier
Office National des Forêts MF des Garancières 91410 DOURDAN didier.desseaux@onf.fr
DEVAUX Frédéric
Office National des Forêts U.T Bugey-Bresse-Dombes 12 rue de la Grenouillère 01000 BOURG EN BRESSE
frederic.devaux@onf.fr
DEVILLE Christian
Office National des Forêts 4 rue du lavoir 55200 CORNIEVILLE christian.deville@onf.fr
DHOTE Jean-François
Office National des Forêts Département Recherche Boulevard de Constance 77300 Fontainebleau
DIDIER Serge
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestie
Equipe Cycles Biogéochimiques F - 54280 CHAMPENOUX
DOBBERTIN Matthias
Institut Fédéral de Recherches sur la Forêt la Neige et le Zürcherstrasse 111 CH - 8903 BIRMENSDORF Suisse
dobbertin@wsl.ch
DOBREMEZ Jean-François
Université de Savoie Laboratoire d'écologie alpine F - 73376 LE BOURGET DU LAC CEDEX dobremez@univ-savoie.fr
DREGE Pierre Olivier
Office National des Forêts 2 avenue de Saint Mandé 75570 PARIS CEDEX 12
DUBOIS COLI Cécile
Office National des Forêts Direction territoriale Service d'appui technique Cité administrative
10, rue du Maréchal Juin 67084 STRASBOURG CEDEX cecile.coli@onf.fr
DUC-MAUGE Claude
Office National des Forêts St Aubin du Cormier MF. de la Martois 35340 LIFFRE claude.duc-mauge@onf.fr
DULOU Philippe
Office National des Forêts M.F de Bellevue 42 Grande rue 10140 AMANCE
DUMAS Jean Michel
Office National des Forêts Service forêt 23bis boulevard Bonrepos 31000 TOULOUSE
DUMAS Stéphane
Office National des Forêts Résinand 01110 ARANC stephane.dumas@onf.fr
DUMAZEL Serge
Office National des Forêts M.F. de Sansard 15110 CHAUDES-AIGUES serge.dumazel@onf.fr
DUNOYER Jean Luc
Office National des Forêts Direction Technique 2, avenue de St Mandé – 75570 PARIS Cédex 12
jean-luc.dunoyer@onf.fr
DUPOUEY Jean-Luc
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité de Recherche Ecophysiologie Forestière
Equipe Phytoécologie Forestière F - 54280 CHAMPENOUX dupouey@nancy.inra.fr
EBNER Pascale
CNRS INSU 3 rue Michel Ange BP 287 75766 Paris cédex 16 pascale.ebner@cnrs-dir.fr
ELICHEGARAY Christian
ADEME 27 rue Louis Vicat F - 75732 PARIS CEDEX 15 christian.elichegaray@ademe.fr
EPP Didier
Office National des Forêts M.F du Bertramont 88240 Bains les Bains didier.epp@onf.fr
ERASMY Jean-Jacques
Administration des Eaux et Forêts Service de l'Aménag. des Bois et de l'Economie Forestière 16 rue Eugène Ruppert
L - 2453 LUXEMBOURG Luxembourg jean-jacques.erasmy@ef.etat.lu
FAILLIET Sébastien
Office National des Forêts MF du Val de la Coudre 56160 AUBERIVE sebastien.failliet@onf.fr
FAVET Philippe
Office National des Forêts Agence Isère 9 quai Créqui 38026 GRENOBLE CEDEX philippe.favet@onf.fr
FAY Jacques
Office National des Forêts Mission Gestion Durable 42 quai Charles Roissard 73026 CHAMBERY CEDEX
jacques.fay@onf.fr

FERRU Jean-Loup
Office National des Forêts CAVANELLO 20124 ZONZA jean-loup.ferru@onf.fr
FIOL Jean-Luc
Office National des Forêts 6 ter route de Quillan 11500 GINOLES jean-luc.fiol@onf.fr
FLOT Jean-Luc
Département de la Santé des Forêts Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation de la Pêche 19 avenue du Maine 75732 PARIS CEDEX 15 jean-luc.flot@agriculture.gouv.fr
FONTA Gérard
Office National des Forêts LASCHAMP 15110 ANTERRIEUX
FOSSE Christian
Office National des Forêts Les Hermes 43490 VIELPRAT christian.fosse@onf.fr
FOURNEL Gilles
Office National des Forêts Mizerat 87470 PEYRAT LE CHATEAU gilles.fournel@onf.fr
FOUYER Thierry
Office National des Forêts Campus ONF Parc de Haye 54840 VELAINE EN HAYE
FRAIN Georges-Michel
Office National des Forêts MF du Petit Grunewald 67430 DIEMERINGEN georges.frain@onf.fr
FRANCOIS Didier
Office National des Forêts Service Technique 21 rue du Muguet 39100 DOLE sart.dt-besancon-fc@onf.fr
FREMONT Jean-Marc
Inventaire forestier national Château des Barres 45290 NOGENT SUR VERNISSON jean.marc-fremont@ifn.fr
FUHR Marc
CEMAGREF Ecosystèmes montagnards 2 rue de la papeterie BP 76 38402 ST MARTIN D'HERES CEDEX
GAGNIER Samuel
Office National des Forêts M.F de Condat 15190 CONDAT EN FENIERS samuel.gagnier@onf.fr
GALSOMIES Laurence
ADEME Département de l'Air 27 rue Louis Vicat F - 75732 PARIS CEDEX 15 laurence.galsomies@ademe.fr
GANDOIS Laure
UMR – CNRS UPS INPT 5245 Ecolab Laboratoire d'écologie fonctionnelle BP 32607
31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX laure.gandois@ensat.fr
GARNIER François
Office National des Forêts M.F. de Morat Isle et Bardais 03360 ST BONNET TRONCAIS françois.garnier@onf.fr
GAUTIER Grégoire
Office National des Forêts Direction de l'écologie et du développement durable 2 avenue de Saint Mandé 75570 PARIS CEDEX 12 gregoire.gautier@onf.fr
GAUVRIT Francis
Office National des Forêts M.F. de Chêne l'Abbé 86210 LA CHAPELLE MOULIERE francis.gauvrit@onf.fr
GEGOUT Jean-Claude
ENGREF 14 rue Girardet F - 54042 NANCY
GELHAHE Louisette
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestie Equipe Cycles Biogéochimiques F - 54280 CHAMPENOUX
GENET Annick
Office National des Forêts 27 rue Suchetet 10140 VENDEUVRE SUR BARSE
GERS Charles
UMR – CNRS UPS INPT 5245 Ecolab Laboratoire d'écologie fonctionnelle Bât IVR 3 118, route de Narbonne 31062 Toulouse Cédex 4
GIOT-WIRGOT Pierre
Université Catholique de Louvain Faculté de Sciences Agronomiques Labo de Lauzelle Route de Blocry 2 B - 1348 LOUVAIN LA NEUVE Belgique giot@efor.ucl.ac.be
GIRARD (DSF) Pierre
Département de la Santé des Forêts BP 95 84143 MONTFAVET Cédex pierre.girard@agriculture.gouv.fr
GIRARD Pierre
Office National des Forêts 52 rue de Pontarlier PISSENAVACHE 25520 BIANS LES USIERS pierre.girard-02@onf.fr
GIRARD Sabine
CNPPF-IDF 175 cours Lafayette 69006 LYON sabine.girard@cnppf.fr
GOBERT Bernard
Office National des Forêts MF du Val des Grès 76680 POMMEREVAL bernard.gobert@onf.fr
GODEFROID Sandrine
Free University of Brussels (VUB) Departement of plant (APNA) 2 Pleinlaan B-1050 BRUSSELS Belgique sagodefr@vub.ac.be
GODINAT Gilles
Office National des Forêts Agence de Colmar 22 rue de Herrlisheim BP 486 68020 COLMAR CEDEX gilles.godinat@onf.fr

GONNET Jean François
TOTAL SA 2 place de la coupole La Défense 6 92078 Paris la Défense Cédex
GONNET Robert
Office National des Forêts L'Estouble 04200 VALBELLE robert.gonnet@onf.fr
GOUTAL Noemie
ENGREF 12 rue des 4 églises 54000 NANCY goutal@engref.fr
GRAND Guy
Office National des Forêts Faubourg Saint-Jean-Baptiste 73700 SEEZ
GRANDJEAN Paul
Office National des Forêts 1 chemin du Faulot 70800 AINVELLE paul.grandjean@onf.fr
GREGOIRE René
Office National des Forêts Route de la Taoulère 64400 EYSUS rene.gregoire@onf.fr
GRIEBEL Pierre
Office National des Forêts M.F. de Hasselfurth 57230 BITCHE pierre.griebel@onf.fr
GRIMLER Jean-Marie
Office National des Forêts M.F. de Bois le Roi 77590 BOIS LE ROI jmgrimler@aol.com
GRUDE Thierry
Office National des Forêts MF du Ravalier 61360 LA PERRIERE thierry.grude@onf.fr
GUENTHARDT-GOERG Madeleine
Eidg.foschchungsanstalt WSL Zürcherstrasse 111 CH - 8903 BIRMENSDORF Suisse madeleine.goerg@wsl.ch
GUIBAL Frédéric
Faculté Saint Jérôme Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie Boîte 451
Avenue Escadrille Normandie Niemen F - 13397 MARSEILLE CEDEX 20 frederic.guival@univ-cezanne.fr
GUILLON Patrick
Office National des Forêts La Chique 09320 LE PORT patrick.guillon@onf.fr
HALLEY DES FONTAINES Ségolène
Ministère de l'Agriculture (MAP) Sous direction de la forêt et du bois 19 avenue du Maine 75732 Paris Cédex 15
HAMELIN Jean-Philippe
Office National des Forêts 55 boulevard Clémenceau 66820 VERNET LES BAINS jean-philippe.hamelin@onf.fr
HARDY Thierry
Office National des Forêts M.F de Largilly F - 71360 EPINAC thierry.hardy@onf.fr
HARROUARD Nicolas
Office National des Forêts MF du Combat 54540 PIERRE PERCEE nicolas.harrouard@onf.fr
HENRY Jean-Pierre
Office National des Forêts Le Moulin de la Girard 73660 ST REMY DE MAURIENNE jean-pierre.henry@onf.fr
HEUZE Patricia
Université de Metz Campus Bridoux UFR SCI FA - LBFE Rue du Général Delestraint 57070 METZ BORNY heuze@hotmail.com
HUTTINGER Bertrand
Office National des Forêts Buisson cidex 20 bis 21550 LADOIX SERRIGNY bertrand.huttinger@onf.fr
IACOBAN Carmen
ICAS Statiunea Experimentala de Cultura Molidului Caléa Bucovinei 73 bis RO - 725100 CAMPULUNG MOLDOVENESC Roumanie iacoban.carmen@icassv.ro
JABIOL Bernard
ENGREF Laboratoire de Sciences Forestières Equipe Ecosystèmes forestiers et dynamique du paysage
14 rue Girardet CS 14216 F - 54042 NANCY CEDEX jabiol@engref.fr
JACOBEE Franck
Office National des Forêts Direction Technique 2 avenue de Saint Mandé 75570 PARIS CEDEX 12
JACQUEMARD Alain
Office National des Forêts MF des Prés 3 chemin de la Devèse 11340 ESPEZEL
JALLUD Daniel
Office National des Forêts Maison Forestière 74420 HABERE-LULLIN
JANNAIRE Sylvain
Office National des Forêts MF de Mauperchette 77720 LA CHAPELLE GAUTHIER sylvain.jannaire.onf.fr
JAUMOUILLE Yohann
Office National des Forêts Service Patrimonial 8 rue du paon 54840 VELAINE EN HAYE
JAUPART-CHOURROUT Nathalie
La forêt privée 61 avenue de la grande armée 75782 PARIS CEDEX 16 njc@laforetprivee.com
JEANNEAU Anthony
Office National des Forêts MF des Boussions 72500 THOIRE SUR DINAN anthony.jeanneau@onf.fr
JEANNEY Stéphane
Office National des Forêts M. F des tilleuls 39800 BESAIN stephane.jeanney@onf.fr

JOBARD Cyrille
Office National des Forêts 6 rue Louis Guepey 71350 ALLEREY SUR SAONE cyrille.jobard@onf.fr
JOUIN Claude
2 la bouteille 03350 LE BRETHON clajouin@club-internet.fr
JOUIN Gerda
2 la bouteille 03350 LE BRETHON clajouin@club-internet.fr
JUBERA Bruno
Office National des Forêts M.F. de la Corne de Rollay 03320 COULEUVRE bruno.jubera@onf.fr
JUIF Henri
Office National des Forêts 10 rue Bellevue 25580 ETALANS henri.juif@onf.fr
LACARCE Eva
INRA Unité infosol 163 avenue de la pomme de pin BP 20619 - ARDON 45166 OLIVET CEDEX
eva.lacarce@orleans.inra.fr
LACROIX Guy
Office National des Forêts 1489 rue du Vivier 39220 BOIS D'AMONT guy.lacroix@onf.fr
LACROIX René Jean
Office National des Forêts LIRBAT 09320 MASSAT rene-jean.lacroix@onf.fr
LANDMANN Guy
GIP "Ecosystèmes Forestiers" 42 rue Scheffer 75116 PARIS landmann@gip-ecofor.org
LANDRIEU Gilles
Parcs Nationaux de France Château de la Valette 1037 rue Jean françois Breton 34090 MONTPELLIER gilles.landrieu@espaces-naturesl.fr
LANIER Marc
Office National des Forêts Direction Technique RENECOFOR Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
marc.lanier@onf.fr
LANNOY Régis
Office National des Forêts M.F. de Maroilles 13 rue Triolin 59530 LOCQUIGNOL regis.lannoy@onf.fr
LARRIEU Mylène
Office National des Forêts Allée René Desjardins 33160 Saint Médard en Jalles
LAURENS Paul
Office National des Forêts Maison forestière 34390 Mons la Trivalle paul.laurens@onf.fr
LAURENT Christian
Ministère de la région Wallonne Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environ
Service Aménagement et Génie Forestier Avenue Prince de Liège 15 B - 5100 JAMBES Belgique c.laurent@mrw.wallonie.be
LE BOUCHER Alain
Office National des Forêts M.F de Plessé 3 rue des magnolias 44630 PLESSE alain.leboucher@onf.fr
LE GALL Anne Christine
INERIS Direction des Risques Chroniques Parc technologique ALATA BP n° 2 60550 VERNEUIL EN HALATTE
anne-christine.le-gall@ineris.fr
LE GUEVEL Yvon
Office National des Forêts 36 rue Saint Blaise 61000 ALENCON yvon.leguevel@onf.fr
LEBLANC Bernard
Office National des Forêts BP 1053 52102 SAINT DIZIER Cédex Bernard.leblanc@onf.fr
LEBLANC Claire
Office National des Forêts Service de la communication 2 avenue de Saint Mandé 75570 PARIS CEDEX 12
claire.leblanc@onf.fr
LEBLOND Sébastien
Muséum National d'Histoire Naturelle Laboratoire de Cryptogamie Case 39 57 rue Cuvier 75005 Paris
sleblond@mnhn.fr
LEBOURGEOIS François
ENGREF Unité Ecosystèmes Forestiers 14 rue Girardet F - 54042 NANCY CEDEX lebourgeois@engref.fr
LEFEVRE Yves
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equpe phytoécologie F - 54280 CHAMPENOUX
lefevre@nancy.inra.fr
LEGAY Myriam
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equipe phytoécologie forestière F - 54280 CHAMPENOUX
legay@nancy.inra.fr
LEMAIRE Jean Jacques
Office National des Forêts MF du Centre 81140 CASTELNAU DE MONTMIRAL
LERAT Jean François
Ministère de l'Agriculture (MAP) CGAAER 251 rue de Vaugirard 75732 PARIS CEDEX 15

LETZ Jean-Michel
Office National des Forêts Cité administrative 13 rue Pasteur F - 88110 RAON L'ETAPE jean-michel.letz@onf.fr
LEVANNIER Patrick
Office National des Forêts M.F. de la Mare aux Grés 76380 CANTELEU patrick.levannier@onf.fr
LEYSEN Rogier
Office National des Forêts Unité spécialisée Aménagement-Etudes 39 rue de la Mésange 57400 SARREBOURG rogier.leysen@onf.fr
LOYER Jean
Office National des Forêts 13, avenue du Général de Gaulle BP 521 72017 LE MANS CEDEX jean.loyer@onf.fr
MAHAULT Jean-Noël
Office National des Forêts Maison Forestière 63630 SAINT GERMAIN L'HERM jean-noel.mahault@onf.fr
MALLOIRE Patrick
Office National des Forêts MF Chavaudon 1 10270 Lusigny sur Barse patrick.malloire@onf.fr
MALOT Alain
Office National des Forêts 22 rue Savinien-Lapointe 89100 SENS alain.malot@onf.fr
MARIOTON Benjamin
Office National des Forêts C/o Bruno Vigoureux M.F. de Molaise 16 route de la Forêt 71350 ECUELLES
MARVIN Pascal
Office National des Forêts M.F. de Joux 71550 ANOST pascal.marvin@onf.fr
MAUCHAMP Luc
Ministère de l'Ecologie et du développement durable 20 avenue Ségur F - 75302 PARIS 07 SP
MENGIN LECREULX Patrice
Office National des Forêts – Direction technique – Boulevard de Constance – 77300 FONTAINEBLEAU patrice.mengin-lecreulx@onf.fr
MENIGOZ Bernard
16 rue Emile Cardot 25300 PONTARLIER b.menigoz@wanadoo.fr
MERILA Päivi
Finnish Forest Research Institute Kaironiementie 54 FIN - 39700 Parkano Finlande Paivi.merila@metla.fi
MERLET J.
INRA - TOULOUSE Auzeville BP 5267 31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX
MESNIER Bernard
25 avenue du Général Leclerc 25650 GILLEY mesnier.bernard@laposte.net
MICAS Lilian
Office National des Forêts Chemin des vertus 04170 St André les Alpes lilian.micas@onf.fr
MICHENEAU Christine
Office National des Forêts Direction Technique Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU christine.micheneau@onf.fr
MILHAU Francis
Office National des Forêts M.F. La Claparède 30750 DOURBIES francis.milhau@onf.fr
MILLAT-CARUS Frank
Office National des Forêts M.F. du Brudour 26190 SAINT JEAN EN ROYANS franck.millat-carus@onf.fr
MINAYA Mayte
INIA-CIFOR Carretera Coruna Km 7 500 E - 28040 MADRID Espagne minaya@inia.es
MONNERET Béatrice
Office National des Forêts UT Lons 2 rue Neuve 39120 GATEY
MONTUS Rodolphe
Office National des Forêts M.F. d'Aitone 20126 EVISA rodolphe.montus@onf.fr
MONZO Guy
Office National des Forêts Bureau Tabarde 30750 CAMPRIEU guy.monzo@onf.fr
MORIN Nathalie
Office National des Forêts Département Informatique 5 rue Girardet 54000 NANCY nathalie.morin@onf.fr
MORLAT Franck
Office National des Forêts U.T DAHON Maison forestière 3 rue des violettes 25800 VALDAHON ut.valdahon-fc@onf.fr
MOUCHOT François
Office National des Forêts 2 chemin de Belle-herbe 57560 ABRESCHVILLER francois.mouchot@onf.fr
MOUREY Jean-Louis
Office National des Forêts 18 rue Louis Marin 88600 BRUYERES gt.bruyeres@onf.fr
NAGELEISEN Louis Michel
Département de la Santé des Forêts Antenne spécialisée - c/o INRA Nancy F - 54280 CHAMPENOUX nageleisen.dsf@wanadoo.fr
NAVARRO Philippe
Office National des Forêts 1513 Route de Lent MF des Carronnières 01960 Peronnas

NEHLIG Edgar
Office National des Forêts 19 rue de la Gare 68440 SCHLIERBACH edgar.nehlig@onf.fr
NICOLAS Damien
Office National des Forêts Maison forestière communale Lotissement Les meix 21400 VANVEY damien.nicolas@onf.fr
NICOLAS Manuel
INRA - Centre de Nancy Equipe biogéochimie des écosystèmes forestiers 54280 CHAMPENOUX
NIEMINEN Tiina Maileena
METLA PL 18 FI - 01301 VANTAA Finlande tiina.nieminen@metla.fi
NYS Claude
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestie
Equipe Cycles Biogéochimiques F - 54280 CHAMPENOUX
OGER Stéphane
Office National des Forêts Agence de Mulhouse 21 rue de l'Est BP 1497 68072 Mulhouse cedex
stephane.oger@onf.fr
PAGNIER Eric
Office National des Forêts M.F. des Fauvettes 2 rue des Fauvettes 25270 LEVIER eric.pagnier@onf.fr
PAILLET Yoan
CEMAGREF- GRENOBLE UR Ecosystèmes montagnards Domaine universitaire BP 76
38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX yoan.paillet@cemagref.fr
PANARD Michel
Office National des Forêts M.F de Beaulieu 41200 CELLETTES michel.panard@onf.fr
PAQUIEN Hervé
Office National des Forêts Maison forestière du bourg 168 route du Chaisier 40400 BEGAAR herve.paquien@onf.fr
PARINI Claude
Direction des Eaux et Forêts Service de l'Aménag. des Bois et de l'Economie Forestière 16 rue Eugène Ruppert
L - 2453 LUXEMBOURG Luxembourg claude.parini@ef.etat.lu
PARTY Jean-Paul
Sol Conseils 251 route de la Wantzenau F - 67000 STRASBOURG
PAULY Hubert
Département de la Santé des Forêts 1 Impasse R. Lavigne 33150 CENON dsf.pauly@laposte.net
PEIFFER Marianne
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equipe Phytoécologie F - 54280 CHAMPENOUX
PENNEROUX Max
Société forestière de la C.D.C 102 rue Réaumur 75002 PARIS max.penneroux@forestiere-cdc.fr
PERRARD Claude
Office National des Forêts MF de St Hugon 38580 LA CHAPELLLE DU BARD claude.perrard@onf.fr
PERTILE Florence
Office National des Forêts M.F de Roche Sanadore 63210 ROCHEFORT MONTAGNE
PEYRON Jean Luc
GIP "Ecosystèmes Forestiers" 42 rue Scheffer 75116 PARIS peyron@gip-ecofor.org
PIAT Jérôme
Office National des Forêts Service Technique Forêts 3 rue du Petit Château 60200 COMPIEGNE stf.dt8500@onf.fr
PICOT Denis
INRA - TOULOUSE Auzeville BP 5267 31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX
PILARD -LANDAU Brigitte
Office National des Forêts 3 rue du Petit Château 60200 COMPIEGNE brigitte.pilard-landeau@onf.fr
PLANCHERON Françoise
Office National des Forêts – Mission gestion durable 42, quai Charles Roissard 73026 Chambéry Cédex
POIROT Jean
Département de la Santé des Forêts Echelon Nord-Est Nancy Domaine de Pixérécourt 54220 MALZEVILLE
poirot.dsf@wanadoo.fr
POISSON Nathalie
ADEME 27 rue Louis Vicat 75737 Paris Cédex 15
POLA Pierre
Office National des Forêts Les Burdins 38580 La Ferrière d'Allevard pierre.pola@onf.fr
PONTOIS Vincent
Office National des Forêts 3 impasse des Cassoulets 65490 OURSBELILLE vincent.pontois@onf.fr
POSS Yves
Agro Paris Tech Engref 24 avenue des Landais 63170 AUBIERE
POUREAU Benoît
Office National des Forêts M.F Ste Catherine 31110 MONTAUBAN DE LUCHON benoit.poureau@onf.fr

PROBST Anne
UMR 5245 CNRS/INPR/Université Paul Sabatier Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle (ECOLAB) Avenue de l'agrobio-pole BP 32607 31326 CASTANET TOLOSAN CEDEX aprobst@ensat.fr

PROCHASSON André
Office National des Forêts service technique Mission gestion durable 42 quai Charles Roissard BP 657 73006 CHAM-BERY CEDEX andre.prochasson@onf.fr

QUESNEY Thierry
Office National des Forêts Section techniques territoriales 1175 chemin du Lavarin 84000 AVIGNON thierry.ques-ney@onf.fr

RABEN Gerhard
Staatsbetrieb Sachsenforst Bonnewitzer Str. 34 D - 01796 PIRNA Allemagne gerhard.raben@smul.sachsen.de

RATHGEBER Cyrille
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equipe de Recherche sur la qualité des bois LERFoB UMR INRA-ENGREF 1092 Route de l'arboretum 54280 Champenoux cyrille.rathgeber@nancy.inra.fr

RAYNAUD Jean Charles
Office National des Forêts M.F de la bergère 2 route de la rive 85550 LA BARRE DE MONTS jean-charles.raynaud@onf.fr

RECHER Hubert
Office National des Forêts 10a rue principale 67160 CLEEBOURG hubert.recher@onf.fr

REVERSAT Georges
IRD d'Ile de France 32 avenue Henri VARAGNAT 93143 Bondy Cédex georges.reversat@bondy.ird.fr

RICHARD Didier
Lieu dit "Pouton" 367 chemin du Gouarry 40320 SAINT LOUBOUER didier.richard@onf.fr

RICHARD Yves
Université de Bourgogne Centre de recherche de climatologie 6 boulevard Gabriel 21000 DIJON

RICORDEL Mickaël
Office National des Forêts M.F. de Néricou 44130 LE GAVRE michael.ricordel@onf.fr

RIEDINGER Paul
Office National des Forêts M.F. Vorderlauchen 68610 LINTHAL paul.riedinger@onf.fr

RIQUIER Christophe
Office National des Forêts M.F. de Sainte Croix 76940 VATTEVILLE LA RUE christophe.riquier@onf.fr

ROBIN Jean Dominique
D.D.A.F Saône et Loire Cité administrative 71000 MACON jean-dominique.robin@agriculture

ROCHAS David
Office National des Forêts Maison forestière 68610 LINTHAL

ROCHET Bénédicte
Office National des Forêts Service Technique Parc de haye Les merises - Bât 802 54840 VELAYNE EN HAYE benedicte.rochet@onf.fr

ROSE Christophe
INRA - Centre de Recherches Forestières de Nancy Equpe phytoécologie F - 54280 CHAMPENOUX rose@nancy.inra.fr

ROSSLER Olivier
Office National des Forêts 6, rue de la touche 41700 COUR CHEVERNy

ROUMANE Adil
C3ED 47 boulevard Vauban 78047 GUYANCOURT CEDEX roumane.adil@voila.fr

RUIZ CAMACHO Nuria
IRD/Universités Paris VI VII et XII Laboratoire d'écologie des sols tropicaux 32 avenue henri Varagnat UMR 137 Biosol 93143 Bondy Cédex

RUIZ POTOSME Norlan
Universidad de Valladolid Santiago n° 9 1 B E - 34004 PALENCIA Espagne

SAGE Dominique
Département de la Santé des Forêts Echelon Technique Nord Ouest 93 rue de Curembourg BP 210 F - 45403 FLEURY LES AUBRAIS CEDEX sage.dsf@wanadoo.fr

SALAS Christophe
Office National des Forêts MF d'Aïtone 20126 EVISA

SAUTER Wilhelm
UBA-Dienstgebäude Langen Paul Ehrlich Str 29 D - 63225 Langen Allemagne wilhelm.sauter@uba.de

SCHLEPPI Patrick
WSL/FNP Birmensdorf Zürcherstrasse 111 CH - 8903 BIRMENSDORF Suisse patrick.schleppi@wsl.ch

SCHMIDT Stéphan
Office National des Forêts MF de Sainte marguerite 154 rue Ernest Charlier 88100 Sainte Marguerite stephan.schmidt@onf.fr

SCHMUCK Hubert
Office National des Forêts 21 rue de Sarreguemines 57232 BITCHE CEDEX hubert.schmuck@onf.fr
SCHULTE Ernst
Commission européenne Direction générale environnement ENV.B1 BU-9 - 4/50 B-1049 BRUSSELS Belgique
SEDILOT GASMI
Société forestière de la C.D.C 102 rue Réaumur 75002 PARIS ceydric.sediloTgasmi@forestiere-cdc.fr
SERAIN Bernard
Office National des Forêts M.F. de la Doucinière 72150 PRUILLE L'EGUILLE bernard.serain@onf.fr
SERVANT Hugues
CRPF de Bourgogne 18 boulevard Eugène Spuller 21000 DIJON hugues.servant@crpf.fr
SEVREE Yvan
Office National des Forêts 6 chemin de Sudon 41330 LA CHAPELLE VENDOMOISE
SEYNAVE SAINT ANDRE Ingrid
ENGREF - INRA Equipe Ecologie Forestière 14 rue Girardet F - 54052 NANCY cedex
SIEBENALLER Michèle
Direction des Eaux et Forêts BP 1 L-9801 HOSINGEN Luxembourg michele.siebenaller@ef.etat.lu
SINICCO Gilles
Office National des Forêts Maison Forestière 1 rue Principale 57590 ORON gilles.sinicco@onf.fr
SIOEN Geert
Research Institute for Nature and Forest Gaverstraat 4 B - 9500 GERAARDSBERGEN Belgique geert.sioen@inbo.be
SOULE Patrice
INRA - Bordeaux 71 avenue E. Bourleaux BP 81 33883 VILLENAVE D'ORNON CEDEX soule@bordeaux-inra.fr
SOUTRENON Alain
CEMAGREF - Grenoble Unité de recherche des écosystèmes montagnards 2 rue de la papeterie BP 76
38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX alain.soutrenon@cemagref.fr
STAVRAKAS Georges
Office National des Forêts Chemin de Luzertet 81260 BRASSAC georges.stavrakas@onf.fr
TAILLARDAT Jean
Office National des Forêts M.F. de Saint Hilaire 03440 BUXIERES-LES-MINES jean.taillardat@onf.fr
TASTET Jean Louis
Office National des Forêts Au Luc 40250 SOUPROSSE
TEISSIER DU CROS Bruno
Office National des Forêts DT Lorraine 5 rue Girardet CS 65219 54052 NANCY CEDEX bruno.teissier-du-cros@onf.fr
THIMONIER Anne
WSL/FNP Birmensdorf Zürcherstrasse 111 CH - 8903 BIRMENSDORF Suisse anne.thimonier@wsl.ch
THOUVENIN Joël
Office National des Forêts M.F. de Chavigny 54230 CHAVIGNY joel.thouvenin@onf.fr
TISON Nicolas
Office National des Forêts Maison forestière 52210 SAINT LOUP SUR AUJON nicolas.tison@onf.fr
TORRE Fabrice
Centre régional de la propriété forestière 71 cours Napoléon 20000 AJACCIO
TOURETTE Daniel
Office National des Forêts Route de Bussang 88214 REMIREMONT cedex daniel.tourette@onf.fr
TOUZET Georges
30 rue de la Roche 37130 CINQ MARS LA PILE georgestouzet@tele2.fr
TREVEDY BENARD Valérie
Office National des Forêts Direction Technique RENECOFOR Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
valerie.trevedy@onf.fr
TROCHON Bernard
Office National des Forêts 18 rue Jacques de Soulx 21650 GILLY LES CITEAUX bernard.trochon@onf.fr
TROTTET François
Office National des Forêts M.F. de la Croix Gaillarde 23 rue de la Braie 85690 NOTRE DAME DE MONTS
francois.trottet@onf.fr
TROUPLIN Alain
Office National des Forêts M.F. du Four des Vaux 76680 VENTES ST REMY alain.trouplin@onf.fr
ULRICH Erwin
Office National des Forêts Direction Technique RENECOFOR Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
erwin.ulrich@onf.fr
VALEIX Jacques
Office National des Forêts Chef de l'inspection générale 2 avenue de Saint Mandé 75570 PARIS CEDEX 12
jacques.valeix@onf.fr

VAN DORPE Thierry
Office National des Forêts M.F. de Pommereuil 59360 POMMEREUIL thierry.vandorpe@onf.fr
VANNIERE Bernard
28 rue Raymond Frot 77690 MONTIGNY SUR LOING bj.vanniere@free.fr
VAS Nicolas
Groupe International d'Etudes des Forêts Sud-Européennes (GI 69 avenue des Hespérides F - 06300 NICE vasnicolas@aol.com
VAUTIER Frédérique
Office National des Forêts DT Bourgogne Champagne Ardennes Pôle recherche et développement technique 11 C rue René Char 21000 DIJON frederique.vautier@onf.fr
VERNEVAUT François
Office National des Forêts 49 rue Bernard Capelle 21290 VOULAINES LES TEMPLIERS francois.vernevaut@onf.fr
VERNIER Jean-Marie
Office National des Forêts 3b rue Himmelsleiter 67730 LA VANCELLE jean-marie.vernier@onf fr
VIDAL Claude
Inventaire forestier national Château des Barres 45290 NOGENT SUR VERNISSON cvidal@ifn.fr
VIGOUREUX Bruno
Office National des Forêts M.F. de Molaise 16 route de la Forêt 71350 ECUELLES bruno.vigoureux@onf.fr
VINCENT Jean-Pierre
Office National des Forêts 52 rue Centrale 73420 VOGLANS jean-pierre.vincent@onf.fr
VINGERT Xavier
INRA - Centre de Nancy Equipe biogéochimie des écosystèmes forestiers 54280 CHAMPENOUX xav.vingert@hotmail.fr
VINKLER Isabelle
ENGREF Equipe Ecologie 14 rue Giardet CS 14216 54042 NANCY CEDEX vinkler@engref.fr
VOIRY Hubert
Office National des Forêts 32 route de Bussang 88214 REMIREMONT CEDEX
WAGNER René
Office National des Forêts M.F. de Mouterhouse 57620 MOUTERHOUSE rene.wagner02@onf.fr
WOLTER Frank
Direction des Eaux et Forêts 16 rue Eugène Ruppert L - 2453 LUXEMBOURG Luxembourg frank.wolter@ef.etat.lu
WRIGHT James
Office National des Forêts Service Technique Parc de haye Les merises - Bât 802 54840 VELAYNE EN HAYE james.wright@onf.fr

RENECOFOR [1]
Dépôts atmosphériques de soufre en forêt domaniale de Brotonne : forte diminution de 1993 à 1999, puis stagnation

Pourquoi s'intéresser aux dépôts atmosphériques de soufre en forêt ?

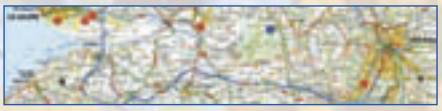
Les études menées suite aux dépérissements forestiers des années 1980 en Europe ont permis de déceler les effets négatifs des dépôts atmosphériques acidifiants sur le fonctionnement des forêts. Lorsque ces dépôts retombent sur des sols pauvres et déjà acides, ils peuvent entraîner des dysfonctionnements dans l'alimentation en éléments minéraux des végétaux, en raison du lessivage du calcium, du magnésium et d'autres éléments nécessaires à la vie des plantes. Le soufre sous forme de sulfate est l'un de ces composés acidifiants.

Pourquoi s'intéresser à la forêt de Brotonne ?

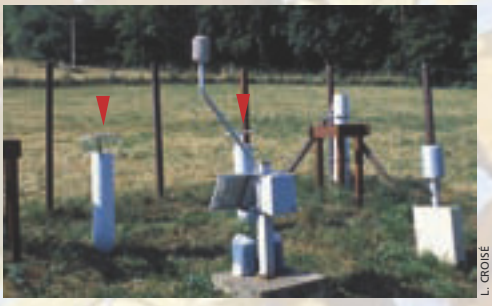
La forêt de Brotonne est située entre les deux grands ports du Havre et de Rouen, qui assurent plus du tiers des échanges maritimes français. En raison de ces ports, une activité industrielle très importante est concentrée autour de Rouen, de Port-Jérôme et du Havre. Cette forte industrialisation est une source importante de pollution atmosphérique.
En Haute-Normandie, le soufre vient essentiellement des raffineries et des installations consommant des énergies fossiles. La forêt de Brotonne est soumise principalement aux vents dominants d'ouest qui apportent les polluants rejetés par les usines du Havre et de Port-Jérôme.

Localisation des grands sites industriels autour de la forêt domaniale de Brotonne
(source : IGN)

● = site de Brotonne, ● = sites industriels



Comment mesure-t-on les dépôts atmosphériques ?



L. CROISÉ

Dispositif de collecte de la pluviosité et des dépôts atmosphériques hors forêt
▼ = collecteur

E. ULRICH

Dispositif de collecte des pluviolessivats[2] sous couvert forestier
▼ = collecteur

Depuis 1993, un dispositif RENECOFOR est implanté en forêt domaniale de Brotonne et permet entre autre de récolter les dépôts atmosphériques. Il est composé de deux sites de collecte. Le premier est situé hors forêt, dans une prairie et le second en forêt, dans un peuplement de pin sylvestre (Pinus sylvestris) de 55 ans, mélangé avec quelques rares hêtres (Fagus sylvatica) en sous étage.

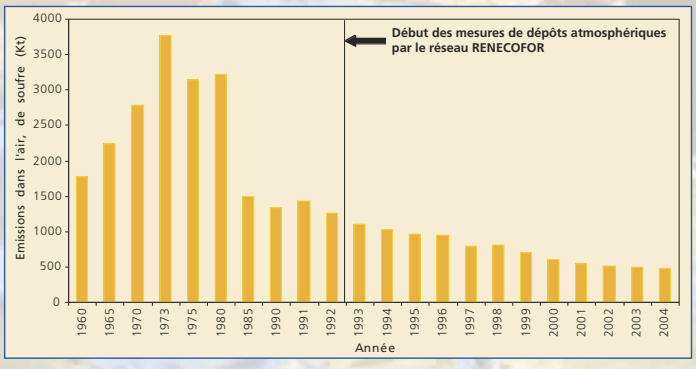
Une forte diminution, puis une stagnation des dépôts de soufre

Lors des premiers traitements des données recueillies sur le réseau RENECOFOR, le site de Brotonne a été remarqué pour ses forts dépôts en soufre sous forêt. Actuellement ces dépôts semblent se stabiliser autour de 15 kg/ha/an. Ce qui reste toutefois environ 3 fois plus élevé en moyenne que sur l'ensemble des 27 sites français et des quelques 200 sites de mesures européens.

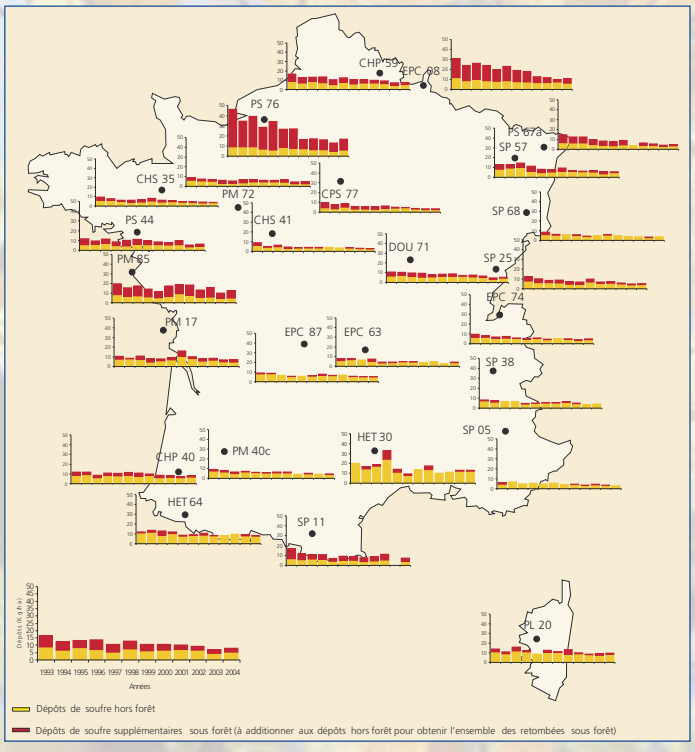
Une diminution des dépôts étroitement liée à celle des émissions en France

La politique de réduction des émissions atmosphériques de soufre mise en place depuis les années 1980 et les progrès techniques de limitations et de traitements des émissions sont à l'origine de la diminution des dépôts atmosphériques. Entre 1993 et 2004, les dépôts atmosphériques de soufre sous forme de sulfate en forêt de Brotonne ont diminué de 35 % hors forêt et de 64 % sous forêt. Durant cette période, les émissions de dioxyde de soufre dans l'air en France métropolitaine ont baissé de 56 %.

Emissions de dioxyde de soufre dans l'air en France métropolitaine de 1960 à 2004
(source : CITEPA / CORALIE / format SECTEN)



Dépôts atmosphériques annuels de soufre hors et sous forêt mesurés de 1993 à 2004 dans 27 sites du réseau RENECOFOR



Les perspectives d'avenir

Malgré une forte diminution ces dernières années, les dépôts atmosphériques de soufre restent encore à des niveaux élevés en forêt domaniale de Brotonne. D'autre part, une telle évolution ne signifie pas forcément une amélioration rapide des sols qui ont accumulé des quantités importantes de soufre depuis 50 ans. Si la question plus globale des changements climatiques occupe actuellement le devant de la scène, l'acidification de certains écosystèmes forestiers sensibles et sous forte contrainte continue à être un risque pour leur bon fonctionnement.

Pour en savoir plus

CROISE L., ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2002. Deux approches indépendantes pour l'estimation et la cartographie des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français. ONF, Département Recherche et Développement. ISBN 2-84207-258-8. 102 p.
ULRICH E., CODDEVILLE P., LANIER M., 2002. Retombées atmosphériques humides en France entre 1993 et 1998. ADEME Editions. ISBN 2-86817-582-1. 132 p.
www.citepa.org
www.onf.fr

S. CECCHINI, Office National des Forêts, sebastien.cecchini@onf.fr

Imprimerie ONF Fontainebleau

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2] Précipitations qui ont traversé les cimes des arbres avant d'arriver au sol.

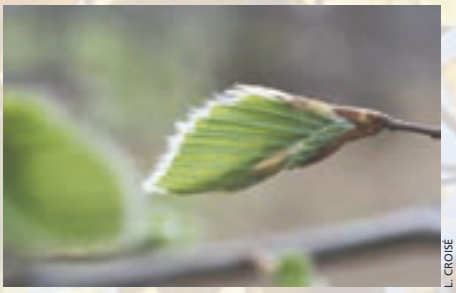
Office National des Forêts

RENECOFOR [1]
Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR : variations entre les espèces et entre les zones bioclimatiques

Qu'est ce que la phénologie chez les végétaux ?
La phénologie est l'étude des développements saisonniers : feuillaison, floraison, fructification, jaunissement, etc.

Pourquoi observer la phénologie dans le réseau RENECOFOR ?
La phénologie est un paramètre essentiel pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers. En France, il n'existe pas de longues séries homogènes pour les peuplements adultes en conditions naturelles. Ainsi, le réseau RENECOFOR constitue à l'heure actuelle la seule source de données phénologiques à grande échelle.
Sur le réseau RENECOFOR nous réalisons des observations phénologiques pour :
- ✓ caractériser l'effet de l'essence, du climat et de la région sur : la feuillaison, le jaunissement et la longueur de la saison de végétation (chez les feuillus et le mélèze d'Europe). Ces travaux concernent 10 des principales espèces forestières : chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea et robur*), hêtre (*Fagus sylvatica*), pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), sapin pectiné (*Abies alba*), épicéa commun (*Picea abies*), pin maritime (*Pinus pinaster*), douglas (*Pseudotsuga menziesii*), pin laricio de Corse (*Pinus nigra laricio corsicana*) et mélèze d'Europe (*Larix decidua*) ;
- ✓ connaître les variations interannuelles des dates d'apparition des stades phénologiques ;
- ✓ élaborer des modèles mathématiques liant les données climatiques et le comportement phénologique. Ils permettront de simuler l'influence du changement du climat sur le comportement des espèces arborées.

Quels stades phénologiques sont observés ?
- ✓ Le débourrement[2] printanier
- ✓ Le jaunissement automnal du feuillage (chez les feuillus et mélèze d'Europe)


L. CROISÉ

Débourrement printanier du hêtre

E. ULRICH

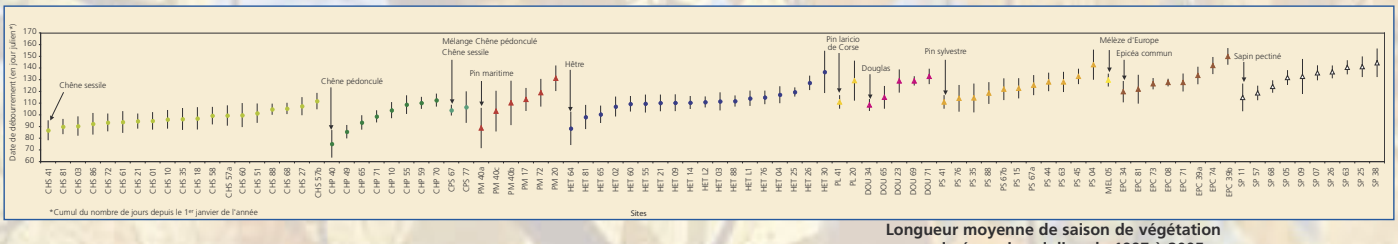
Débourrement printanier de l'épicéa commun

E. ULRICH

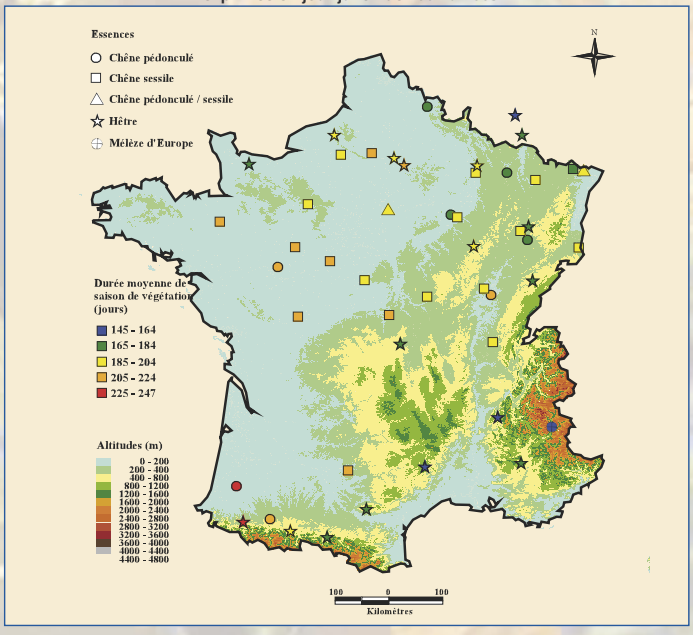
Jaunissement automnal du chêne sessile

La saison de végétation est marquée par d'importantes différences entre les espèces et entre les zones biogéographiques
Sur la période 1997-2005, le début de la saison de végétation est en moyenne plus précoce de trois semaines pour les peuplements feuillus (12 avril) que pour les résineux (4 mai). Il y a en moyenne cinq semaines de décalage entre l'essence la plus hâtive et la plus tardive. Les dates moyennes de débourrement sont (par ordre croissant) : le chêne sessile (6 avril, 19 sites), le chêne pédonculé (7 avril, 8 sites), le pin maritime (19 avril, 6 sites), le hêtre (20 avril, 18 sites), le pin laricio de Corse (29 avril, 2 sites), le douglas (1er mai, 5 sites), le pin sylvestre (2 mai, 11 sites), le mélèze d'Europe (9 mai, 1 site), l'épicéa commun (10 mai, 8 sites) et le sapin pectiné (11 mai, 10 sites).

Classement par ordre croissant des peuplements selon la date moyenne de débourrement de 1997 à 2005 (la barre verticale représente l'écart-type)



Longueur moyenne de saison de végétation exprimée en jour julien de 1997 à 2005



De 1997 à 2005, la saison de végétation (chez les feuillus et le mélèze d'Europe) dure en moyenne 192 jours, avec de fortes variations entre sites (145 en moyenne pour les hêtres du Mont Aigoual et 247 jours pour les chênes pédonculés des Landes). Le jaunissement des chênes étant en moyenne plus tardif d'une semaine (chêne pédonculé : 24 octobre et chêne sessile : 25 octobre) que celui du hêtre (17 octobre), la saison de végétation est plus longue de près de 20 jours pour les chênes (chêne sessile : 200 jours, chêne pédonculé : 202 jours) par rapport au hêtre (180 jours).
Au facteur essence, s'ajoute l'effet de la zone biogéographique. La saison de végétation est plus longue dans le Sud-Ouest et l'Ouest que dans le Nord, le Nord-Est et en zone montagnarde.

L'influence des températures et de l'altitude
Une augmentation de 1°C de la température printanière se traduit par une précocité de 6 jours du débourrement et une augmentation de 10 jours de la saison de végétation. Quant au jaunissement il est retardé d'environ 5 jours par degré d'augmentation de température automnale.
Une augmentation de 100 m d'altitude retarde le débourrement de 2 jours en raison des températures plus basses en altitude. Ce résultat explique la différence entre les feuillus et les résineux du réseau, car un grand nombre de ces derniers sont situés en zone montagnarde.

Les perspectives d'avenir
Les cycles de développement des végétaux étant essentiellement déterminés par le climat, les variations déjà observées depuis 50 ans (environ +1°C) et celles à venir pourraient avoir d'importantes répercutions sur la durée de la saison de végétation des plantes, sur leur croissance, sur leur sensibilité aux aléas climatiques (gel, sécheresse, ...), aux attaques d'agents pathogènes (insectes, champignons, ...) et sur leur capacité de reproduction. La poursuite de cette évolution du climat pourrait affecter l'ensemble des cycles des écosystèmes et orienter la répartition des essences, ainsi que la fertilité des sols, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, ... Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, la phénologie est donc un indicateur clé de la réaction des êtres vivants aux variations du climat.

Pour en savoir plus
LEBOURGEOIS F., DIFFERT J., GRANIER A., BREDA N., ULRICH E., 2002. Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR). Revue Forestière Française, Vol 54, n°5, pp. 407-418.
LEBOURGEOIS F., CECCHINI S., CHUINE I., DIFFERT J, LANIER M., ULRICH E., 2006. Observations phénologiques des arbres forestiers : concepts, intérêts et problématiques actuelles. Rendez-Vous Techniques, n°13, pp.19-22.
LEBOURGEOIS F, CECCHINI S, GODFROY P., LANIER M, PIERRAT, J.C., ULRICH E. 2006. Phénologie des peuplements du RENECOFOR : variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique. Rendez-Vous Techniques, n°13, pp. 23-26.
www.obs-saisons.fr et www.obs-saisons.fr/gdr - www.onf.fr

S. CECCHINI, Office National des Forêts, sebastien.cecchini@onf.fr, F. LEBOURGEOIS, Institut National de la Recherche Agronomique – Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2] ouverture des bourgeons et apparition des feuilles

Office National des Forêts

agroParisTech

Imprimerie ONF Fontainebleau

RENECOFOR [1]
Évolution de la nutrition foliaire en 13 années de suivis : appauvrissement en phosphore, diminution modérée en azote et stabilité en soufre

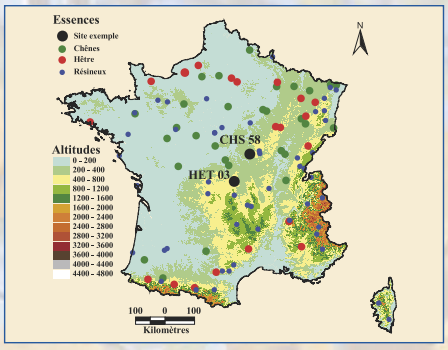
Intérêt des analyses foliaires

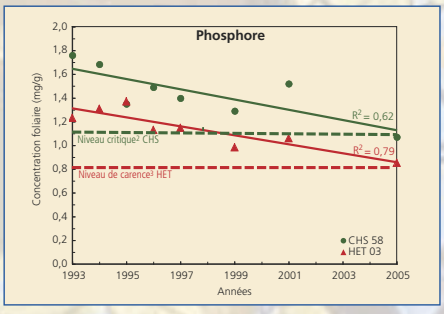
Avec l'eau, le CO_2 et la lumière ; les éléments minéraux dans le sol doivent être disponibles en quantité suffisante pour que la croissance ne soit pas réduite. Mais la simple présence de ces éléments minéraux dans le sol ne permet pas de savoir s'ils sont réellement disponibles pour les plantes, ni si elles les assimilent correctement et de manière équilibrée. Les analyses foliaires représentent des indicateurs de l'état nutritionnel des plantes et permettent de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres, excès ou carences.

Une série temporelle de 13 années

Depuis 1993, des analyses foliaires sont réalisées sur l'ensemble des 102 sites du réseau RENECOFOR. Une analyse des tendances au cours du temps a été réalisée pour les macroéléments (azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, magnésium) et les microéléments (sodium, chlore, aluminium, fer, manganèse, cuivre, zinc). Deux sites sont présentés à titre d'exemple (chêne sessile : CHS 58 et hêtre : HET 03) pour trois macroéléments : le phosphore, l'azote et le soufre.

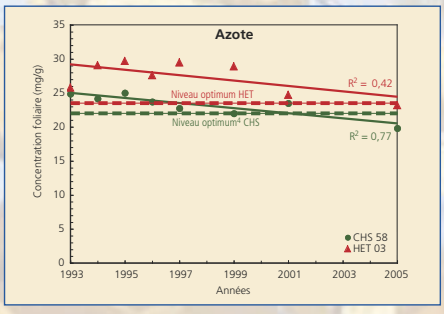
Localisation des placettes RENECOFOR





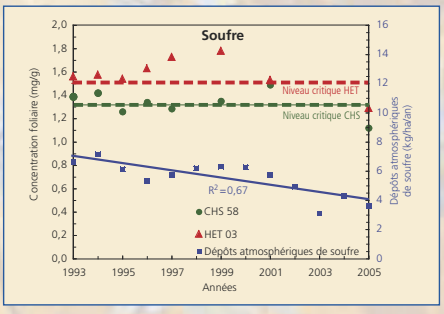
Diminution forte et généralisée du phosphore

Les teneurs foliaires en phosphore ont diminué de 30 % entre 1993 et 2005 sur CHS 58 et HET 03. En moyenne, sur les peuplements de même essence, on constate une diminution de 15 à 20 %. Si cette diminution se poursuit, les niveaux de carences seront rapidement atteints pour les hêtraies et les chênaies étudiées.



Diminution moins systématique de l'azote

Les teneurs foliaires en azote ont diminué de 20 % entre 1993 et 2005 sur CHS 58 et HET 03 tandis qu'aucune évolution n'est observée sur d'autres sites. Cette diminution ramène en 2005 les teneurs foliaires en dessous de l'optimum. Sur l'ensemble des peuplements feuillus, un rapport azote/phosphore nettement supérieur à 15 indique clairement une déficience de l'alimentation en phosphore par rapport à celle de l'azote.



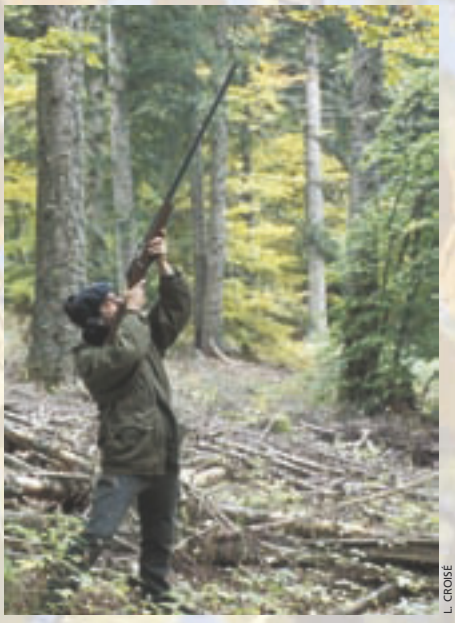
Stabilité du soufre malgré une forte baisse des dépôts atmosphériques

Les teneurs foliaires en soufre n'ont pratiquement pas diminué entre 1993 et 2005 sur CHS 58 et HET 03 malgré une diminution de 40 % des dépôts atmosphériques hors couvert de soufre durant la même période. Ce déphasage est vraisemblablement lié aux stocks importants accumulés dans le sol depuis les années 1960.

Et les teneurs foliaires des autres éléments ?

Une tendance à la baisse est observée pour les teneurs foliaires des autres macroéléments à l'exception du potassium qui augmente au cours du temps chez certains peuplements résineux. Les microéléments ne présentent pas de tendance claire sauf pour les sites de chêne sessile dont les teneurs foliaires en fer, aluminium, zinc, manganèse et cuivre diminuent avec le temps. La variabilité entre années des teneurs foliaires en microéléments est plus importante que celle des macroéléments. Une série plus longue de mesure est donc nécessaire pour mieux caractériser l'évolution des microéléments.

Pour être fonctionnel, le diagnostic de l'état nutritionnel des arbres doit maintenant dépasser l'approche « élément par élément » et leur situation par rapport à des valeurs « critiques ». La définition d'un « profil nutritionnel » prenant en compte l'ensemble des analyses et les relations entre les éléments commence à être utilisée dans la recherche pour un meilleur diagnostic des dysfonctionnements.



L. CROISÉ

Prélèvement foliaire réalisé au fusil en forêt domaniale de Lavillatte (Ardèche)

Rôle du phosphore, de l'azote et du soufre ?

Le phosphore
- ✓ support génétique (ADN), transport d'énergie (ATP)
- ✓ synthèse des sucres et protéines
- ✓ favorise le développement racinaire, la floraison
- ✓ accroît la résistance au froid et aux maladies

L'azote
- ✓ croissance des feuilles et parties ligneuses
- ✓ constituant fondamental des protéines
- ✓ l'excès d'azote allonge la période de végétation et sensibilise aux maladies

Le soufre
- ✓ constituant essentiel des acides aminés soufrés

De manière générale, des carences minérales conduisent à des réductions de croissance, une diminution de la taille des feuilles accompagnée souvent d'une chute prématurée des aiguilles anciennes chez les résineux, et l'apparition de colorations anormales.

Un état nutritionnel à un stade charnière, à prendre en compte pour une gestion durable des forêts françaises

L'interprétation des évolutions de nutrition foliaire est complexe par le nombre de facteurs et de mécanismes impliqués. L'âge des arbres et les précipitations pourraient expliquer une partie de la diminution des teneurs foliaires d'azote et de phosphore sans qu'il soit possible de savoir dans quelle proportion. L'exemple du soufre illustre la capacité de stockage de cet élément dans le sol. La diminution en phosphore foliaire pourrait être reliée à l'abondance de l'azote dans les sols et à l'augmentation du CO_2 atmosphérique conduisant à une stimulation de la croissance et une augmentation des besoins en phosphore peu accessible dans le sol pour la végétation. Le suivi réalisé montre finalement que, loin d'être stationnaire, l'état nutritionnel des arbres est dans une dynamique proche des valeurs de carence pour certains éléments. Ces observations doivent être intégrées notamment dans l'étude des impacts des changements climatiques sur la forêt, et dans les conséquences liées à l'intensification des prélèvements forestiers dans le cadre du développement du bois énergie.

Pour en savoir plus

JONARD M., 2007. Evolution temporelle de la nutrition foliaire dans les placettes des réseaux de suivi à long terme des écosystèmes forestiers de France (RENECOFOR), de Wallonie et du Luxembourg. Rapport interne pp. 67.

CROISÉ L., CLUZEAU C., ULRICH E., LANIER M., GOMEZ A., 1999. 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.

BONNEAU M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF Nancy. ISBN 2-85710-041-8, pp. 367.

http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=2838

L. CROISÉ, Office National des Forêts, luc.croise@onf.fr, M. JONARD, Institut National de la Recherche Agronomique

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers

[2] Niveau critique : seuil indicatif de teneur foliaire (fonction de l'élément et de l'essence) correspondant à une diminution de croissance d'environ 10 % par rapport à la croissance maximale

[3] Niveau de carence : seuil indicatif de teneur foliaire (fonction de l'élément et de l'essence) correspondant à une diminution importante de croissance associée à des symptômes visibles (coloration anormale du feuillage, nécroses foliaires, dessèchement de rameaux …)

[4] Niveau optimum : seuil indicatif de teneur foliaire (fonction de l'élément et de l'essence) correspondant à une croissance maximale

Imprimerie ONF Fontainebleau

RENECOFOR [1]
Cartographie des dépôts atmosphériques en France : comparaison des périodes 1993-1998 et 1999-2004, le cas du soufre et de l'azote

Un suivi continu des apports atmosphériques pour une meilleure gestion des dépôts d'origine anthropique

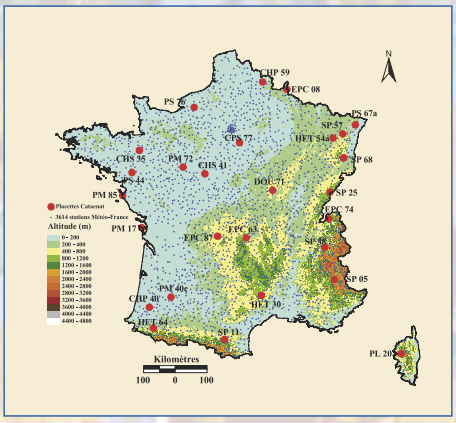
Le suivi des tendances temporelles est un objectif majeur afin d'évaluer les effets des politiques de réduction des émissions anthropiques de polluants atmosphériques. L'acidification et l'eutrophisation[2] des milieux représentent les principaux risques liés aux dépôts atmosphériques. Ces mécanismes dépendent à la fois des caractéristiques stationnelles (sol, végétation) et des quantités d'apports atmosphériques. Un deuxième objectif du réseau est de localiser géographiquement les zones à dépôts acidifiants élevés.

Depuis 1993, les dépôts atmosphériques (soufre $S\text{-}SO_4^{2-}$, nitrate $N\text{-}NO_3^-$, ammonium $N\text{-}NH_4^+$, protons H^+, sodium Na^+, magnésium Mg^{2+}, chlore Cl^-, calcium Ca^+, potassium K^+) hors forêt sont mesurés toutes les 4 semaines sur les 27 sites du sous réseau CATAENAT[3], puis les cumuls annuels sont calculés. Ces mesures traduisent la « pollution de fond » observable en France. Le domaine d'étude exclut donc les agglomérations les plus importantes, les zones industrielles émettrices majeures et les zones d'altitude (> 2000 m).

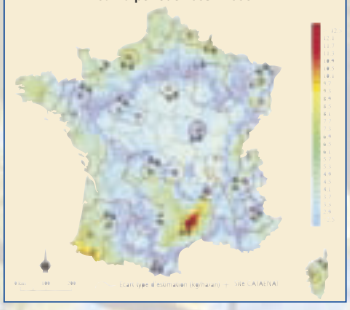
Comment estimer en tout point du territoire les dépôts atmosphériques avec seulement 27 points de mesure ?

Les estimations réalisées par simple interpolation entre les points de mesure sont souvent éloignées de la réalité et fournissent des cartes parfois très différentes selon les méthodes utilisées (moyenne mobile, inverse des distances, polygonale…). L'approche géostatistique est plus adaptée à ce problème car elle prend en compte le comportement spatial spécifique de chaque élément : en présence de corrélation spaciale, plus les points de mesure sont proches, plus ceux-ci sont susceptibles de présenter des valeurs similaires. Cette structure spatiale des données a été mise en évidence pour chaque élément et permet de calculer les dépôts en tout point (blocs de 10 km * 10 km) en prenant en compte les précipitations sur 2 614 stations Météo-France. Les erreurs d'estimation calculées sur les mêmes blocs permettent aussi de connaître la répartition spatiale de l'imprécision des estimations de dépôts.

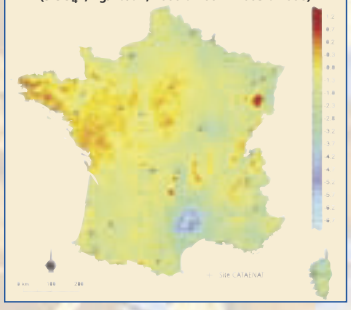
Localisation des sites CATAENAT et des stations Météo-France



Dépôts annuels moyens de soufre ($S\text{-}SO_4^{2-}$, kg/ha/an) sur la période 1993 - 1998



Écarts moyens de dépôts annuels de soufre ($S\text{-}SO_4^{2-}$, kg/ha/an, 1999 à 2004 - 1993 à 1998)

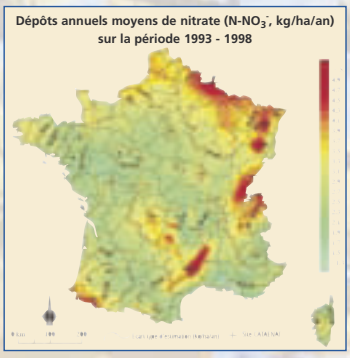


Dépôts de soufre : une tendance générale à la baisse (- 15 %, - 1,0 kg/ha/an) qui masque des différences locales parfois importantes

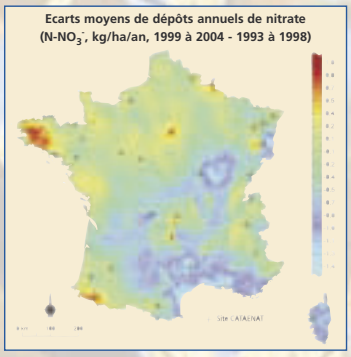
Diminution forte dans les Cévennes	(- 50 %,	- 6,0 kg/ha/an)
Augmentation en Bretagne	(+ 10 %,	+ 0,7 kg/ha/an)
et surtout dans les Vosges	(+ 15 %,	+ 1,2 kg/ha/an)

La répartition géographique des écarts de précipitations annuelles moyennes entre les deux périodes (1993-1998 et 1999-2004) explique une bonne partie de ces variations (- 300 mm/an dans les Cévennes, + 250 mm/an dans les Vosges).

Dépôts annuels moyens de nitrate ($N\text{-}NO_3^-$, kg/ha/an) sur la période 1993 - 1998



Ecarts moyens de dépôts annuels de nitrate ($N\text{-}NO_3^-$, kg/ha/an, 1999 à 2004 - 1993 à 1998)



Dépôts de nitrate : quasiment pas de tendance générale, mais des particularités locales marquées

Diminution marquée dans le sud	(- 50 %,	- 1,3 kg/ha/an)
dans les Cévennes	(- 30 %,	- 1,3 kg/ha/an)
le Morvan et l'Alsace	(- 40 %,	- 1,3 kg/ha/an)
Augmentation en Bretagne	(+ 30 %,	+ 1,0 kg/ha/an)
et dans le pays Basque	(+ 10 %,	+ 0,5 kg/ha/an)

Contrairement au soufre, la répartition géographique des écarts de précipitations annuelles moyennes entre les deux périodes (1993-1998 et 1999-2004) n'explique pas certaines évolutions pour le nitrate (Alsace, le sud, le pays Basque). Le comportement du soufre et de l'azote dans l'atmosphère est bien différent.

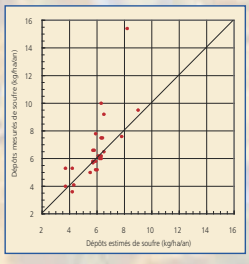
Des estimations en tout point du territoire avec quelle fiabilité ?

La qualité des estimations géostatistiques est appréciée par validation croisée. Pour chaque point de mesure la valeur de dépôt est estimée par le modèle en retirant ce point du jeu de données (n = 27 – 1 stations). La même opération est répétée pour chaque site de mesure et permet ainsi de comparer les valeurs estimées et les valeurs mesurées. Deux critères caractérisent l'ajustement : l'erreur carrée moyenne (ECM) et le rapport entre variance expérimentale et variance d'estimation du modèle ($Var_{exp}/Var_{modèle}$). Plus l'ECM est petite et $Var_{exp}/Var_{modèle}$ proche de 1, plus le modèle reflète bien la réalité. Exemple de validation croisée pour le soufre (ci-contre, ECM = 3,5 kg/ha/an, $Var_{exp}/Var_{modèle}$ = 1) et qualité des estimations pour les autres éléments analysés (ci-dessous) :

1993 - 1998	Soufre	Nitrate	Ammonium	Protons*	Sodium	Chlore	Magnésium	Calcium	Potassium
ECM (kg/ha/an)[2]	3,5	0,7	2,7	3033	101	341	1,9	7,6	0,4
$Var_{exp}/Var_{modèle}$ (-)	1,0	1,0	1,3	1,0	1,0	1,0	1,4	1,6	1,5
Résultat	bon	bon	bon	moyen	moyen	moyen	moyen	médiocre	médiocre

* H+(g/ha/an)

Exemple de validation croisée



Un outil adapté au suivi spatio-temporel des dépôts atmosphériques en France

Malgré un effectif réduit de stations de mesures (n = 27) le réseau CATAENAT s'est révélé adapté pour l'utilisation des techniques géostatistiques et l'obtention de cartes précises de dépôts atmosphériques (notamment soufre et azote) en France.

Cet exemple d'étude cartographique couplée à l'évolution des dépôts au cours du temps illustre clairement les risques d'interprétations inappropriée basées uniquement sur des moyennes nationales : cas du soufre dont les dépôts ont en moyenne fortement diminué mais qui ont simultanément augmenté dans les Vosges où l'acidification des écosystèmes reste préoccupante. D'autre part, le lien fort qui existe entre les précipitations et les dépôts atmosphériques montre clairement l'impact potentiel des changements climatiques sur la répartition et l'amplitude des dépôts via les changements de régime des précipitations. La répétition à intervalle régulier de cette étude géostatistique représentera à la fois un indicateur pertinent des évolutions de dépôts atmosphériques et de l'impact des changements climatiques sur ces dépôts.

L. CROISÉ

Dispositif de collecte des dépôts atmosphériques hors couvert, en forêt domaniale de Boscodon (Hautes-Alpes)

Pour en savoir plus

CROISÉ L, ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2005. Two independent methods for mapping bulk deposition in France. Atmospheric environment, 39, 3923-3941.

CROISÉ L, ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2005. Dépôts atmosphériques et écosystèmes forestiers en France. Rendez-vous techniques, n°7, 4-10.

AUGUSTO L., DAMBRINE E., 2001. L'acidification dans le massif vosgien : comprendre les mécanismes et apporter des solutions. Paris : INRA. ISBN 2-7380-0979-4. 39 p.

www.onf.fr

L. CROISÉ, Office National des Forêts, luc.croise@onf.fr, O. JAQUET, Colenco Power Engineering, 5405 Baden-Dättwil Suisse

Imprimerie ONF Fontainebleau

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2] Excès d'éléments nutritifs (en particulier azote)
[3] CATAENAT : Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Ecosystèmes NAturels Terrestres

Office National des Forêts

COLENCO

METEO FRANCE

RENECOFOR[1]
Observation de la flore : qualité des relevés et évolution temporelle

Pourquoi s'intéresser à la flore forestière et à son évolution temporelle ?

La flore est traditionnellement utilisée par les forestiers pour définir et cartographier les milieux forestiers, c'est également un bio-indicateur des changements environnementaux (changement climatique, dépôts atmosphériques). Les herbacées constituent une composante majeure de la diversité forestière, bien supérieure à celle des arbres. Faute de suivi, nous ne connaissons pas les évolutions récentes de la flore forestière à l'échelle nationale alors que les pratiques de gestion, la pression exercée par les grands herbivores, les dépôts atmosphériques et le climat ont fortement évolué depuis quelques décennies. Certaines espèces forestières se trouvent de ce fait menacées.

Comment quantifie-t-on la diversité floristique ?

La flore est suivie tous les cinq ans depuis 1995 sur les 102 sites du réseau RENECOFOR. Dans chaque site, 8 bandes d'observation de 2 x 50 mètres sont notées. Ces bandes ne sont pas contiguës afin de prendre en compte d'éventuelles hétérogénéités spatiales de la flore. Quatre bandes se trouvent à l'intérieur de l'enclos des sites (0,5 ha) et quatre sont à l'extérieur (exclos), ce qui permet d'évaluer l'impact des grands herbivores.
Les observations portent sur la détermination des espèces, leur abondance, leur recouvrement[2] et leur répartition verticale (strate[3]).

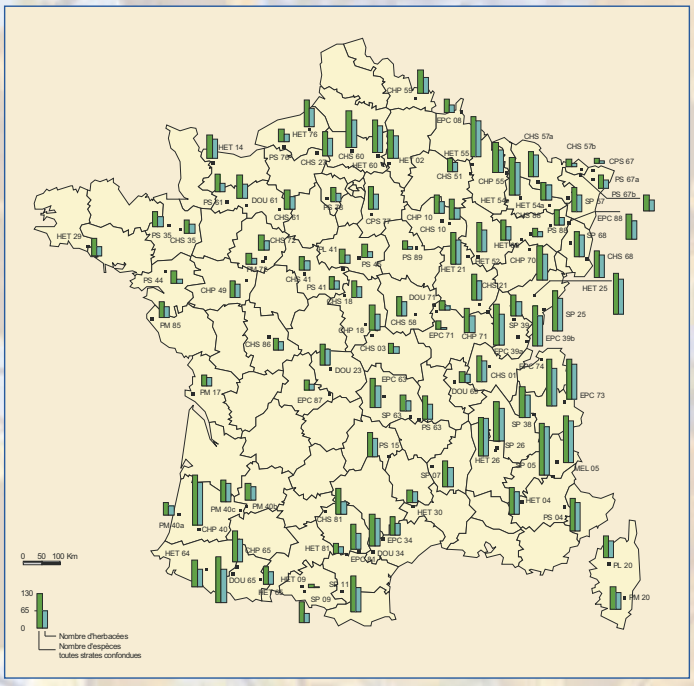
F. MOUCHOT

Botanistes réalisant un inventaire floristique, en forêt domaniale d'Abreschviller (Moselle)

L. CROISÉ

Néottie nid-d'oiseau (*Neottia nidus-avis*)

Nombre total d'espèces et nombre d'espèces herbacées observées en 1995



Quels problèmes sont rencontrés dans le suivi de la flore forestière ?

La difficulté de la mise en évidence des évolutions temporelles de la flore dans les peuplements forestiers matures tient essentiellement de certaines particularités :

- ✓ sous couvert arboré, les plantes sont généralement peu recouvrantes et ne fleurissent pas, faute de lumière, ce qui rend parfois impossible la détermination ;
- ✓ les plantes des forêts matures sont essentiellement des espèces vivaces, de dynamique lente, bien que des espèces apparaissent de façon furtive ;
- ✓ à long terme, différents botanistes se succéderont sur les mêmes sites. Les différences entre observateurs auront des répercussions sur les relevés.

Ces éléments sont à l'origine de la mise en place d'un système rigoureux de contrôle qualité :

- ✓ visites de contrôle croisées entre équipes ;
- ✓ journées d'inter-calibration des équipes.

Près d'une espèce sur cinq est ratée, cette proportion varie selon les équipes

En 2004 et 2005, 11 équipes se sont réunies pour échantillonner la flore dans les huit mêmes bandes et se sont mises d'accord sur les espèces présentes à l'issue des relevés.
Ces observations ont mis en évidence :

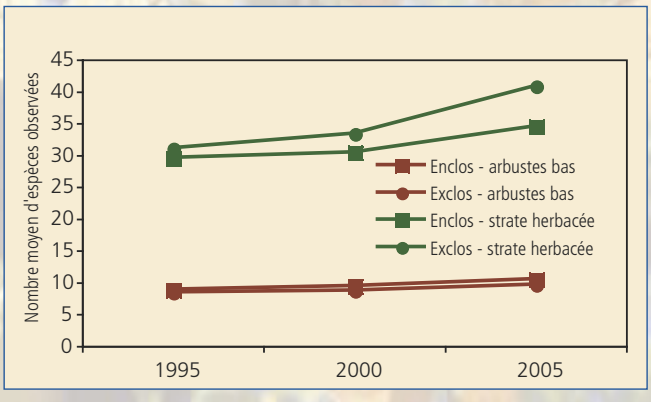
- ✓ que les équipes ratent entre 10 et 30 % des plantes,
- ✓ que les équipes identifient le genre seulement ou se trompent sur l'identité de 5 à 10 % des plantes détectées.

Ces observations suggèrent une interprétation prudente des tendances. Des indices moyennés sur l'ensemble des espèces et la comparaison des variations temporelles de la flore entre enclos et exclos devraient être moins affectés par les différences entre équipes.

L'évolution de la flore

La flore n'a pas pu être suivie en 2000 dans 13 sites fortement touchés par les tempêtes de 1999.
Le nombre moyen d'espèces observées a progressivement augmenté de 1995 à 2000, aussi bien dans la strate arbustive basse que dans la strate herbacée, cependant, il faut intégrer l'effet observateur dans cette évolution. Cette augmentation a été similaire dans les enclos et les exclos pour la strate arbustive basse mais l'augmentation a été plus marquée dans les enclos pour la strate herbacée. Il apparaît également un glissement progressif de la composition de la flore au profit d'espèces plus nitrophiles et plus atlantiques.
Le recouvrement moyen de la strate arborescente et herbacée des sites RENECOFOR, a progressivement diminué entre 1995 et 2005. A contrario, le recouvrement moyen des strates arbustives a augmenté. Seul le recouvrement des mousses est resté stable sur la période. L'accroissement du recouvrement de la strate arbustive basse et la diminution de celui de la strate herbacée sont plus marqués dans les enclos qu'en dehors. La ronce profite particulièrement de l'absence des grands herbivores dans l'enclos. Par conséquent, plusieurs espèces de la strate herbacée ont progressivement diminué en fréquence ou en recouvrement, alors qu'elles sont restées stables ou se sont répandues à l'extérieur des enclos.

Nombre moyen d'espèces observées dans les strates arbustive et herbacée dans le réseau RENECOFOR en 1995, 2000 et 2005



Les perspectives d'avenir

Au-delà des difficultés méthodologiques, l'analyse des relevés floristiques fait apparaître des évolutions qui semblent résulter à la fois de la dynamique des peuplements et de la pression exercée par les grands mammifères herbivores. Des tendances semblant liées aux dépôts atmosphériques et au changement climatique apparaissent mais sont trop faibles pour être interprétées sans ambiguïté. Des analyses plus fines, intégrant au mieux les effets observateurs et la poursuite à long terme du programme sont nécessaires pour mieux estimer la part de ces différents facteurs.

Pour en savoir plus

DOBREMEZ J.-F., CAMARET S., BOURJOT L., ULRICH E., BRETHES A., COQUILLARD P., DUME G., DUPOUEY J.-L., FORGEARD F., GAUBERVILLE C., GUEUGNOT J., PICARD J.-F., SAVOIE J.-M., SCHMITT A., TIMBAL J., TOUFFET J., TREMOLIERES M., 1997. Inventaire et interprétation de la composition floristique des 101 peuplements du réseau (Campagne 1994/95). ONF, Département des Recherches Techniques. ISBN 2 - 84207 - 111 - 5. 513 p.
CAMARET S., BOURJOT L., DOBREMEZ J.-F., 2004. Suivi de la composition floristique des placettes du réseau (1994/95-2000) et élaboration d'un programme d'assurance qualité intensif. Editeur : ONF, Direction Technique, ISBN 2-84207-290-1. 86 p.
www.onf.fr

F. ARCHAUX, Cemagref, frederic.archaux@cemagref.fr, J.L. DUPOUEY, P. HEUZE, Institut National de la Recherche Agronomique, S. CAMARET, Laboratoire d'Ecologie Alpine, S. CECCHINI, Office national des forêts

Imprimerie ONF Fontainebleau

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2] surface de la projection au sol de l'ensemble des organes d'une espèce ou d'un groupe d'espèces
[3] l'appartenance d'une plante à une strate est définie par sa hauteur : strate herbacée = moins de 30 cm, strate arbustive basse = 0,3 à 2 m, strate arbustive haute = 2 à 7 m, strate arborescente = plus de 7 m

Cemagref — INRA — LECA — Office National des Forêts

RENECOFOR [1]
Variabilité des températures dans le réseau météorologique à différentes échelles de temps

L. CROISÉ

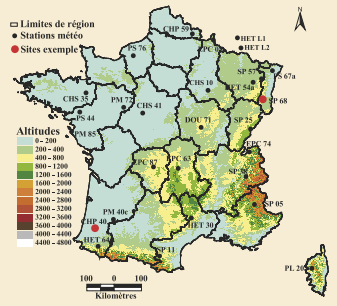
Site hors forêt équipé d'une station météorologique à 6 paramètres (Massif de Belledonne, Isère)

Le réseau météorologique RENECOFOR

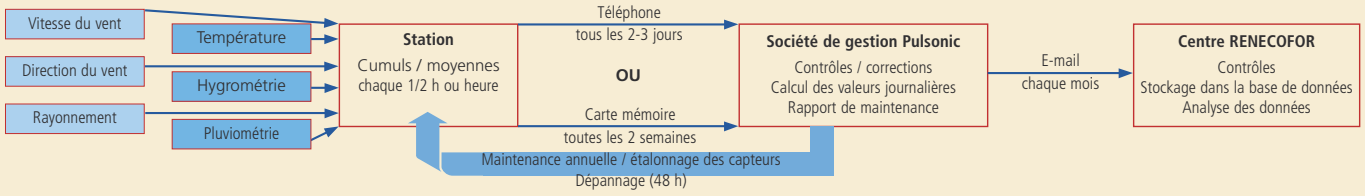
L'objectif des stations météorologiques RENECOFOR est de mesurer les principaux paramètres dans des conditions les plus proches possibles des écosystèmes forestiers étudiés. Le réseau comporte 28 stations, dont deux au Luxembourg. A deux exceptions près, elles sont couplées à des sites du sous réseau CATAENAT[2] dans lesquelles on mesure et analyse les précipitations hors et sous forêt.

Chaque station est implantée dans l'espace découvert où sont récoltés les précipitations et est située à une distance variant de 300 m à 6 km du site sous forêt correspondant. L'installation s'est faite progressivement à partir de décembre 1994 et le réseau est pleinement opérationnel en année pleine depuis 1996.

Localisation des stations météo



Fonctionnement et assurance qualité



Ce mode de fonctionnement a permis d'atteindre un taux élevé de données conservées : sur la période 1995-2004, 98,3 % des 43 millions de données sont archivées tous paramètres confondus. Ce taux atteint 98,6 % pour les mesures de température.

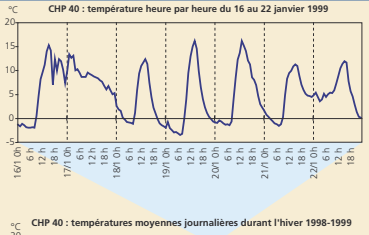
Zoom sur deux sites : les variations de la température à différentes échelles de temps

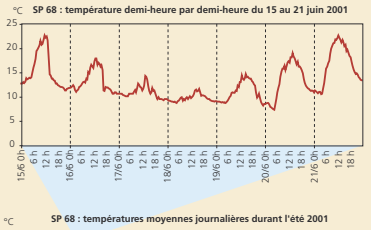
Le site CHP 40

En forêt communale de Gamarde dans le sud des Landes, ce site est à 20 m d'altitude et à 45 km de l'océan Atlantique. La pluviosité annuelle est d'environ 1 200 mm.

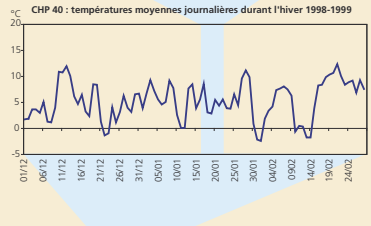
Le site SP 68

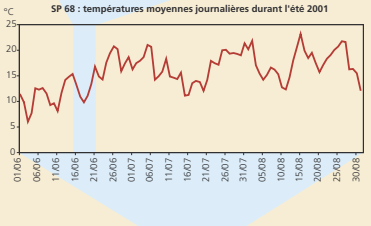
En forêt domaniale de Guebwiller sur le versant alsacien des Vosges, ce site est à 650 m d'altitude. La pluviosité annuelle est d'environ 1 500 mm.



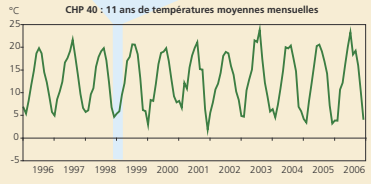


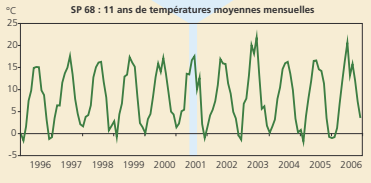
Selon l'échelle de temps (jour, mois, année), la variabilité de la température reflète des processus atmosphériques de fréquences différentes : mouvements de masses d'air, alternance de nuits claires, passages nuageux rapides en cours de journée... Cette variabilité climatique, ici illustrée sur les températures, joue sur des fonctions physiologiques instantanées des arbres ou sur des processus à seuil (gradients thermiques dans le tronc et le sol, phénologie, croissance racinaire, régulation stomatique...).



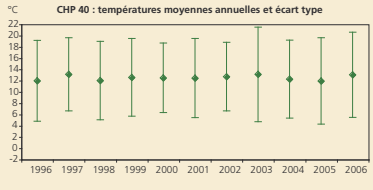


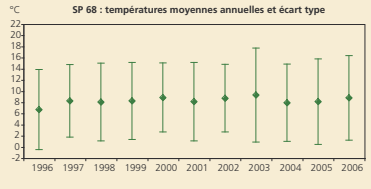
La périodicité liée à l'alternance jour-nuit est parfois masquée par des changements rapides de régime météorologique.
Sur CHP 40 le 17 janvier 1999 on observe une diminution quasi régulière de la température au cours de la journée.
Sur SP 68 la température maximale diurne du 18 juin 2001 n'a été supérieure que de 2 °C à la température nocturne des deux nuits l'encadrant.





Les variations journalières de température traduisent des changements de type de temps qui s'établissent sur plusieurs jours (phase de réchauffement en début d'été sur SP 68 ou de refroidissement sur CHP 40).





Les deux stations montrent une périodicité intra et inter annuelles similaire, typique des climats tempérés à saisonnalité marquée. Les températures sont en moyenne supérieures de 4,2 °C sur CHP 40 par rapport à SP 68.
Les étés 2003 et 2006 présentent des pics de températures élevées dans les deux stations.

Sur les 11 années mesurées, la variabilité intra-annuelle (représentée par l'écart-type) est plus marquée que la variabilité entre années sur les deux sites CHP 40 et SP 68. Aucune tendance ne peut être observée sur la température moyenne. L'année 2003 se distingue par une plus grande variabilité de la température, plus marquée sur SP 68.
Onze ans est une durée insuffisante pour tirer des conclusions : les moyennes caractéristiques d'un climat sont généralement établies sur une base de 30 ans. Les dérives climatiques sont calculées à l'échelle du siècle.

Les perspectives d'avenir

La mesure des paramètres météorologiques au plus près des peuplements observés dans le réseau RENECOFOR doit permettre de mettre en évidence des relations entre les événements météorologiques et certains phénomènes constatés sur les écosystèmes forestiers. Des études croisées avec les données dendrométriques, phénologiques, floristiques et de santé des arbres sont quelques pistes à explorer pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes étudiés.

Pour en savoir plus

PONETTE, Q., ULRICH, E., COLLET, G., KOT, J., BRUNO, F., LANIER, M., 1996 : RENECOFOR - Sous réseau météorologique forestier. Bilan de la phase test (1994/95) et perspectives. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 2, 102 p.

PEIFFER, BADEAU, V., M., BREDA, N., ULRICH, E., LANIER, M., 2007 RENECOFOR - Sous réseau météorologique forestier. Bilan de la phase 1995-2004. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, à paraître.

www.onf.fr

M. LANIER, Office National des Forêts, marc.lanier@onf.fr

Imprimerie ONF Fontainebleau

[1]REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2]Charge Acide Totale d'origine Atmosphériques dans les Ecosystèmes NAturels Terrestres.

Office National des Forêts

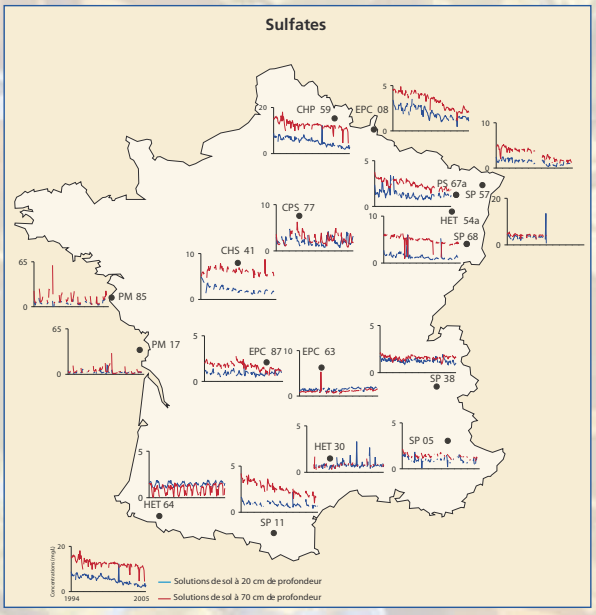
RENECOFOR [1]
Les solutions de sol : un "baromètre" de l'équilibre nutritif des écosystèmes forestiers révélateur des phénomènes d'acidification

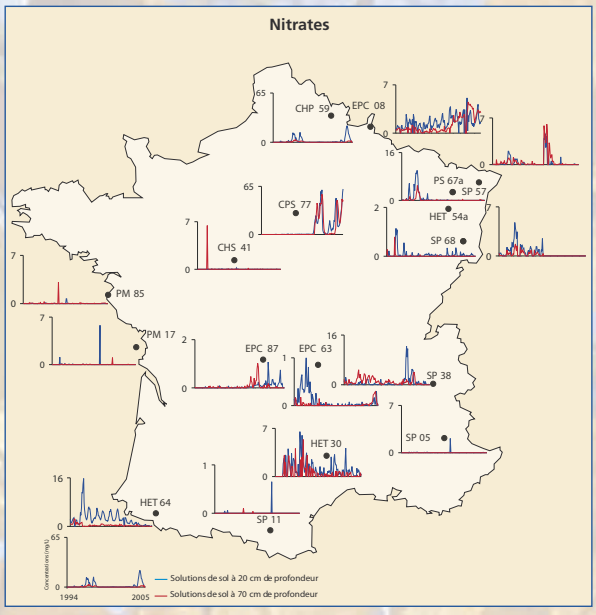
Pourquoi s'intéresser à l'acidité dans les sols forestiers ?

L'équilibre nutritif des écosystèmes forestiers est menacé sur sols pauvres par les dépôts atmosphériques acidifiants, notamment de soufre et d'azote, en raison du drainage des cations[2] basiques (calcium et magnésium principalement), qu'ils peuvent entraîner. Depuis les années 1980, les émissions atmosphériques de soufre ont fortement diminué mais celles d'azote sont restées élevées. L'étude des solutions de sol[3] permet de suivre la dynamique d'acidification ou de restauration en fonction de la richesse des sols.

Quelles évolutions pour les sulfates et les nitrates ?

Evolution des sulfates et des nitrates dans les solutions de sol prélevées à 20 et 70 cm de profondeur, dans 17 sites du réseau RENECOFOR, de 1994 à 2005
(concentration en mg/L de soufre pour les sulfates et d'azote pour les nitrates)





Les sulfates, à 20 cm et 70 cm de profondeur, suivent des tendances décroissantes sur près de la moitié des sites, en particulier dans l'Est et dans le Nord de la France, où les émissions industrielles de soufre ont été fortes par le passé. Ailleurs, on n'observe pas de tendances mais parfois des variations saisonnières marquées.

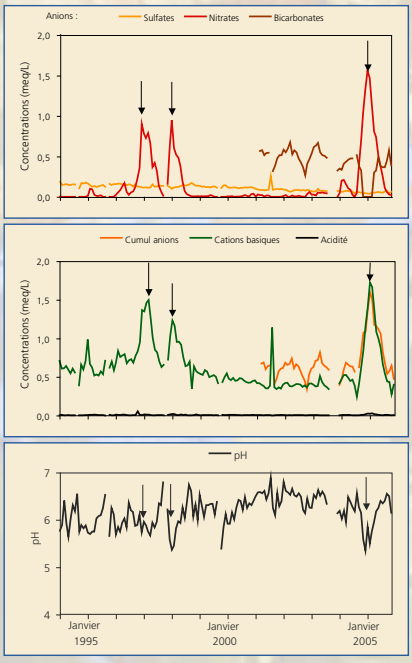
Les nitrates ne présentent pas de tendances à moyen terme sauf sur quelques sites (notamment EPC 08 dans les Ardennes). Leur concentration évolue généralement par pics brusques correspondant soit à des variations saisonnières, soit à des événements ponctuels parfois explicables (éclaircies, tempête, défoliations...).

Zoom sur le site de la forêt domaniale de Mormal, CHP 59 (Nord)

Type de sol : Luvisol-Redoxisol
Chimie à 10-20 cm en 1993 :
- ✓ pH_{eau} = 4,4
- ✓ Saturation en bases = 25,9 %

Dépôts atmosphériques hors forêt :
- ✓ Soufre = 6,7 kg/ha/an
- ✓ Azote = 10,9 kg/ha/an

Solutions de sol à 20 cm de profondeur



B. DERMAUX

Profil de sol

Les sulfates diminuent, les bicarbonates dominent sauf lors des trois pics de nitrates.
Les fortes charges des anions[4] cumulés (sulfates + nitrates + bicarbonates) sont équilibrées par les cations basiques (calcium + magnésium). L'acidité (aluminium + hydronium) reste très faible.

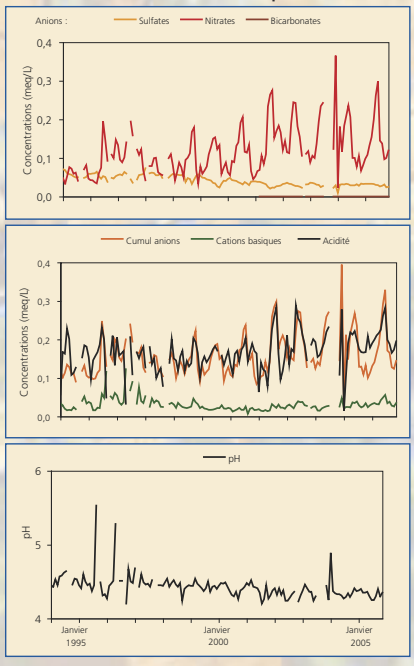
Les réserves minérales du sol permettent de neutraliser l'acidité actuelle des dépôts. La baisse des dépôts de soufre entraîne une augmentation générale du pH. Mais la baisse du pH lors des pics acidifiants de nitrates montre que les dépôts d'azote sont en excès.

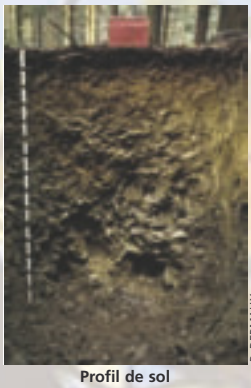
Zoom sur le site de la forêt domaniale de la Croix-Scaille, EPC 08 (Ardennes)

Type de sol : Podzosol Ocrique
Chimie à 10-20 cm en 1993 :
- ✓ pH_{eau} = 4,3
- ✓ Saturation en bases = 3,7 %

Dépôts atmosphériques hors forêt :
- ✓ Soufre = 8,3 kg/ha/an
- ✓ Azote = 15,9 kg/ha/an

Solutions de sol à 20 cm de profondeur





B. DERMAUX

Profil de sol

Les sulfates diminuent mais les nitrates augmentent. Les bicarbonates sont absents.
La hausse des charges anioniques totales (sulfates + nitrates) est équilibrée par la hausse de l'acidité (aluminium + protons[5]). Les concentrations des cations basiques (calcium + magnésium) restent très faibles.

Ici, le seuil de charge critique[6] est dépassé. Les faibles réserves minérales du sol ne neutralisent pas la charge acidifiante de nitrates, les dépôts d'azote sont en excès.

Les perspectives d'avenir

L'étude des solutions de sol du réseau RENECOFOR montre que les efforts de réduction des émissions industrielles de soufre ont porté leurs fruits. En revanche, les sols forestiers français sont toujours soumis à des dépôts d'azote élevés et montrent des sensibilités différentes à l'acidification. Dans la perspective proche de multiplication des stress climatiques, l'équilibre minéral des écosystèmes est à surveiller pour assurer la meilleure stabilité des peuplements forestiers.

M. NICOLAS, Office National des Forêts - Institut National de la Recherche Agronomique, mnicolas@nancy.inra.fr, E. DAMBRINE, Institut National de la Recherche Agronomique, S. CECCHINI, Office National des Forêts

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2] Ion chargé positivement
[3] Eau contenue dans la porosité du sol et prélevée au moyen de bougies poreuses
[4] Ion chargé négativement
[5] H^+
[6] Si ces charges sont dépassées, il y a un risque de déstabilisation des écosystèmes

Office National des Forêts
INRA
Imprimerie ONF Fontainebleau

RENECOFOR [1]
Évolution des chutes de litière : 12 années de suivi, zoom sur une hêtraie et une chênaie

Les retombées de litière, 3 rôles majeurs pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers :

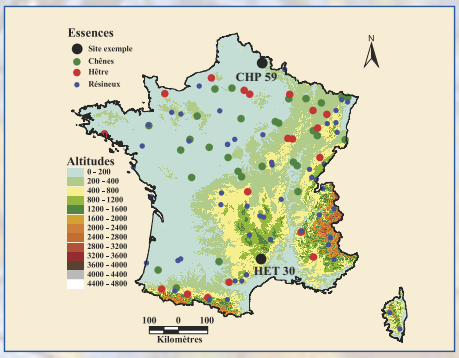
La litière : source d'un recyclage intense des éléments nutritif prélevés dans l'écosystème. Selon les éléments nutritifs et les essences forestières, entre 50 % et 80 % des quantités d'éléments nutritifs prélevées dans le sol lui sont restitués à travers les retombées de litière. Cette caractéristique permet à des milieux relativement pauvres de fonctionner avec une bonne économie de moyens.

La litière : outil de référence pour la mesure de l'indice foliaire. Cet indice est un des paramètres clé qui permet aux écosystèmes forestiers de réguler les échanges d'eau et de CO_2 entre l'atmosphère et le sol. Il correspond à la surface développée de feuille exprimé par unité de surface de sol (indice compris entre 4 et 11 m^2 de feuilles / m^2 de sol). Parmi les méthodes d'estimation, les récoltes de litières permettent d'obtenir la mesure la plus fiable de cet indice moyennant la détermination de la surface spécifique des feuilles pour chaque essence et chaque année (surface de feuilles / poids de feuilles).

La litière : compréhension des fréquences de fructification et potentiel de régénération naturelle. Les mesures simultanées sur les mêmes sites des fructifications et des paramètres stationnels et météorologiques constitue enfin un outil de premier choix pour mieux comprendre les facteurs prépondérants conduisant à de fortes fructifications.

Une série temporelle de 12 années

Depuis 1994, les retombées de litière sont échantillonnées sur les 102 sites du réseau à raison de 10 collecteurs par site, soit une surface de collecte de 5 m^2. Selon les sites entre 3 et 5 collectes sont réalisées dans l'année et elles sont triées en 4 catégories. Trois années de suite (1996, 1997, 1998) des analyses par type d'échantillon ont été réalisées pour les éléments suivants : carbone (C), azote (N), calcium (Ca), potassium (K), magnésium (Mg), soufre (S), phosphore (P), chlore (Cl), sodium (Na), aluminium (Al), fer (Fe), cuivre (Cu), zinc (Zn) et manganèse (Mn).



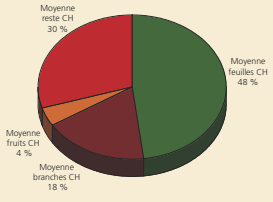
Localisation des placettes RENECOFOR

E. ULRICH

Collecteur de litière en forêt domaniale de l'Aigoual (Gard)

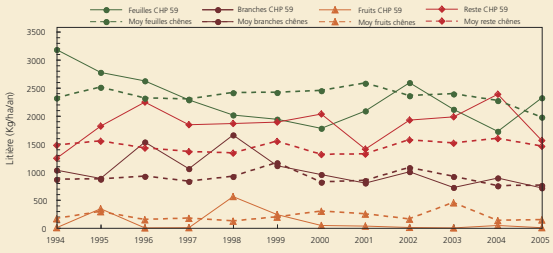
Diminution des litières de feuilles depuis 2001 et fructification très irrégulière dans les chênaies

Les 4 catégories triées



La catégorie « feuilles » contient uniquement les feuilles de l'essence principale. Les feuilles des essences secondaires sont dans le « reste »

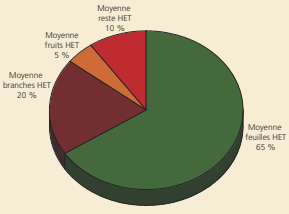
Evolution des retombées de litière dans les chênaies de 1994 à 2005
(En forêt domaniale de Mormal : CHP 59 et moyenne des placettes de chêne)



Les chutes de feuilles présentent de 1994 à 2000 une diminution marquée pour CHP 59 (- 44 %). Par la suite des variations inter annuelles importantes se manifestent. En moyenne pour les placettes de chênes les retombées de feuilles sont remarquablement constantes avec une diminution légère à partir de 2001. Les compartiments « branches » et « reste » ne présentent pas d'évolution particulière. Les fructifications sont très irrégulières avec deux années particulières pour CHP 59 : 1995 et 1998. On notera que la sécheresse combinée à la canicule remarquable de 2003 ne se répercute pas directement sur ce suivi.

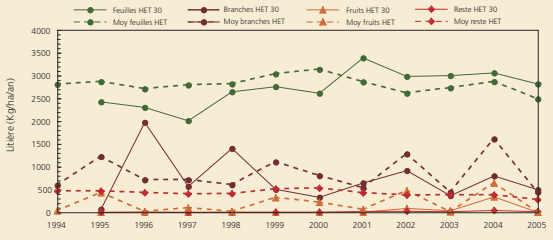
Absence de tendance et fructifications plus fréquentes ces dernières années dans les hêtraies

Les 4 catégories triées



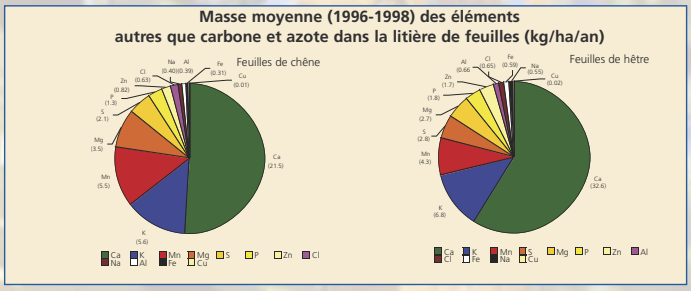
La catégorie « feuilles » contient uniquement les feuilles de l'essence principale. Les feuilles des essences secondaires sont dans le « reste »

Evolution des retombées de litière dans les hêtraies de 1994 à 2005
(En forêt domaniale de l'Aigoual : HET 30 et moyenne des placettes de hêtre)



Le compartiment « feuilles » est quasiment stable au cours de la période aussi bien pour le site HET 30 que pour l'ensemble des sites de hêtre. Le « reste » de la litière est stable au cours de la période. A l'opposé les « branches » présentent des variations inter annuelles très importantes avec des pics souvent synchrones avec des fructifications marquées. Les fructifications les plus fortes depuis le début du suivi sont observées en 2004 à la suite de la sécheresse combinée à la canicule de 2003.

Masse moyenne (1996-1998) des éléments autres que carbone et azote dans la litière de feuilles (kg/ha/an)



De fortes retombées de carbone et d'azote

Traduit en retour d'éléments au sol par la litière totale, les analyses réalisées de 1996 à 1998 indiquent en moyenne : 2463 kg/ha/an (sites de chênes) et 2120 kg/ha/an (sites de hêtres) de carbone, 60 kg/ha/an (sites de chênes) et 52 kg/ha/an (sites de hêtres) d'azote et 46 kg/ha/an (sites de chênes) et 45 kg/ha/an (sites de hêtres) pour la somme des autres éléments. La répartition de ces derniers dans les feuilles de chêne et de hêtre est indiquée ci-contre.

Une source d'informations fondamentales en début de valorisation pour une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers

Les mesures de retombées de litière en forêt, réalisées sur le réseau RENECOFOR sont uniques en France par leur durée et par la diversité des situations stationnelles couvertes. Elles sont encore loin d'avoir été entièrement exploitées par rapport aux questions posées sur le fonctionnement hydrique et minéral des écosystèmes forestiers et dans le cadre des changements globaux. Des études en cours vont donner des éléments de compréhension sur ces questions y compris sur les facteurs explicatifs des fructifications.

Pour en savoir plus
BONNEAU M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF Nancy. ISBN 2-85710-041-8, pp. 367.

L. CROISÉ, Office National des Forêts, luc.croise@onf.fr

[1] REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers

Office National des Forêts

Imprimerie ONF Fontainebleau

RENECOFOR [1]
Détermination des indices foliaires des placettes feuillues du réseau : une information clé issue des collectes de litières

Pourquoi quantifier la surface foliaire par hectare d'un peuplement ?

L'indice de surface foliaire correspond à la surface foliaire d'un peuplement exprimée par unité de surface de sol. Ce paramètre est une caractéristique majeure des couverts qui conditionne : les capacités d'interception des précipitations et des dépôts atmosphériques, les besoins en évapotranspiration du peuplement, ses capacités d'assimilation du CO_2, les retours quantitatifs et qualitatifs de litière foliaire dans le cycle biogéochimique... L'indice foliaire est un paramètre clé de tous les modèles de bilans hydrique et carboné à bases fonctionnelles. Sa détermination à partir des collectes de litières constitue la méthode directe de référence en peuplements feuillus.

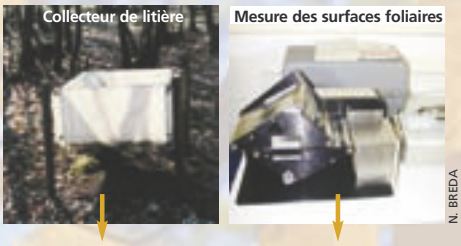
Comment passer d'une biomasse de litière foliaire à un indice de surface foliaire ?

Depuis la création de RENECOFOR, les litières sont collectées annuellement, triées, séchées et pesées. Ce travail considérable, long et fastidieux, donne accès à la biomasse de litière foliaire de l'espèce principale et de l'accompagnement, exprimée en tonne par hectare, mais pas à la surface foliaire. Il n'est donc pas possible d'estimer l'indice foliaire en routine dans le réseau.

Pour convertir les biomasses de litières foliaires en indice foliaire, il faut multiplier la masse de feuilles par un coefficient appelé surface spécifique, qui donne la surface de feuilles par unité de masse sèche. Dans le cadre de l'ORE F-ORE-T[2] et avec un soutien financier du GIP ECOFOR[3], nous avons entrepris de déterminer ces coefficients pendant trois années successives, de 2004 à 2006.

Les responsables locaux des sites ont pris en charge la collecte de sous échantillons de litières et leur acheminement à l'INRA Champenoux, où ont été réalisées les mesures.

Principe du calcul d'indice foliaire



(exemple : indice 6 = 6 hectares de feuille sur 1 hectare de forêt)

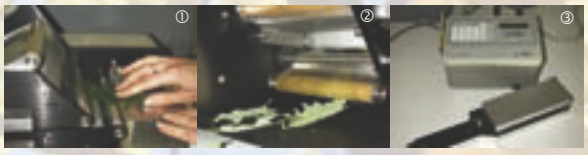
N. BREDA

Dispositif de mesure des surfaces foliaires (Li Cor, Nebraska, USA)

Comment mesure-t-on les surfaces foliaires ?

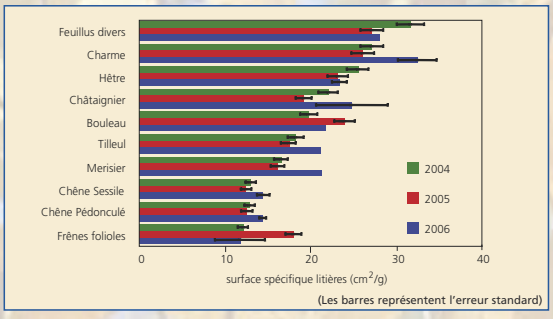
Des échantillons de 200 feuilles par site et par espèce ont été prélevés dans les collecteurs. Nous avons mesuré à l'INRA la surface des feuilles à l'aide d'un planimètre, qui enregistre les caractéristiques moyennes des feuilles. Après mesures des surfaces, les 200 feuilles ont été séchées à l'étuve à 105 °C et leur poids sec a été déterminé. La surface spécifique a été calculée en divisant la surface totale des feuilles par leur poids sec.

Etapes de mesure de la surface foliaire : (1) entrée de la feuille sur un tapis roulant pour acheminer la feuille vers la tête de mesure, (2) sortie de la feuille après mesure, (3) détail de la pince de mesure et centrale d'acquisition



N. BREDA

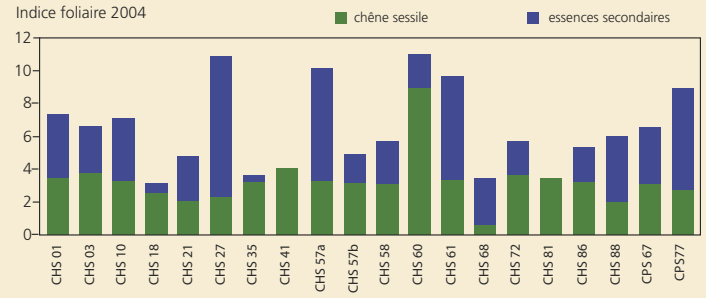
Des feuilles aux caractéristiques très différentes entre espèces, en moyenne peu variables entre années



(Les barres représentent l'erreur standard)

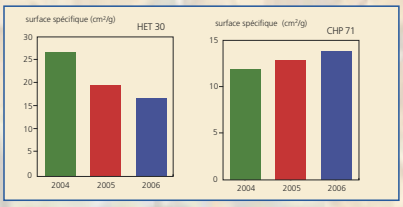
Indice foliaire des placettes de chêne sessile en 2004 calculé à partir des collectes de litières dans les bacs et des surfaces individuelles de feuilles

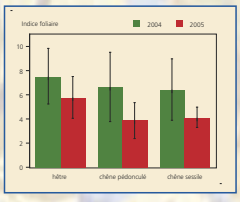
Une contribution du chêne à l'indice foliaire total du peuplement souvent faible (55 %)



L'indice foliaire varie entre 4 et 11, ce qui représente une variabilité aussi grande que celle observée entre les grands biomes, allant d'une toundra à une forêt tropicale humide. Cependant, la contribution du chêne à l'indice foliaire total du peuplement est faible comparativement aux peuplements de hêtre, en moyenne 55 % et comprise entre 20 % en forêt domaniale de la Harth (CHS 68) et 100 % dans les jeunes futaies de chêne sessile.

Mais dans le détail, la variabilité entre années de la surface spécifique peut être forte sur certaines placettes, résultant d'effets différés d'une attaque biotique, d'un accident climatique, d'une éclaircie (CHP 71) ou d'une fructification (HET 30).





Une chute significative des indices foliaires moyens par essence dominante entre 2004 et 2005

Indice foliaire moyen par essence principale calculé à partir des collectes de litières, sur 9 placettes de chêne pédonculé, 20 de chêne sessile et 18 de hêtre (les barres représentent l'erreur standard).

Les indices foliaires sont significativement plus faibles en 2005 pour les trois espèces. Il pourrait s'agir d'un effet différé et cumulé de fructifications abondantes en 2004, des sécheresses et des attaques de défoliateurs. Les indices foliaires moyens sont identiques entre les trois espèces en 2004, tandis qu'en 2005, les valeurs sont significativement supérieures chez le hêtre. Les chênaies accusent donc plus nettement la réduction entre 2004 et 2005, essentiellement par une réduction de l'indice foliaire des chênes et non de l'accompagnement.

Les études à venir

Grâce au tri des feuilles par espèces dans les retombées annuelles, la méthode mise en œuvre sur RENECOFOR est la seule qui donne accès à la contribution de chaque espèce à l'indice foliaire total du peuplement. Les caractéristiques foliaires (surface et surface spécifique) d'une espèce donnée varient fortement entre placettes, entre position dans le couvert (essence principale ou d'accompagnement), et pour une placette donnée entre les années. A l'avenir, ces valeurs d'indice foliaire pourront être utilisées pour calculer les bilans hydrique, carboné et minéraux des sites du réseau.

Pour en savoir plus

BRÉDA N. (1999) L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. Revue Forestière Française, LI-2, 135-150

BRÉDA N., SOUDANI K., BERGONZINI J. C. (2002) Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP-ECOFOR ed., ISBN 2-914770-02-2

ULRICH E., LANIER M. (1994) RENECOFOR - Manuel de référence n°5 pour la collecte de la litière et le traitement des échantillons recueillis. Placettes de Niveau I. Office National des Forêts ed., Département des Recherches Techniques, Mai 1994, 35 p.

[1]REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2]ORE F-ORE-T : Observatoire de recherche en environnement sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers
[3]GIP ECOFOR : Groupement d'intérêt publique pour les écosystèmes forestiers

Office National des Forêts — INRA — ECOFOR

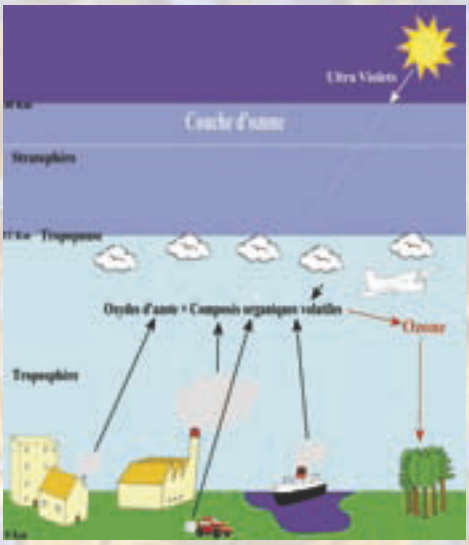
Imprimerie ONF Fontainebleau

RENECOFOR [1]
Effets de l'ozone sur la végétation

Qu'est ce que l'ozone ?

L'ozone est un gaz formé de trois atomes d'oxygène (formule chimique : O_3), dégageant une forte odeur.
Il faut bien différencier l'ozone contenu dans la stratosphère (entre 12 et 40 km d'altitude) et celui présent dans la troposphère (entre le sol et 12 km). La limite entre ces deux couches s'appelle la tropopause. Il y circule des vents violents et le gradient thermique vertical s'y inverse. Ces deux phénomènes empêchent souvent les échanges entre couches.
L'ozone stratosphérique protège la vie sur la terre en filtrant une partie des rayons ultraviolets, elle est couramment appelée couche d'ozone.
L'ozone de la troposphère devrait être naturellement faible. Mais il s'en forme dans l'air chargé en polluants dit « primaires » tels que les oxydes d'azote qui sont produits par la combustion des carburants fossiles (automobile, chauffage,...) et les composés organiques volatils provenant des émissions naturelles et humaines (automobile, raffinerie, combustion des déchets). Ces réactions sont actionnées par le rayonnement solaire.

Schéma de la formation de l'ozone dans la troposphère



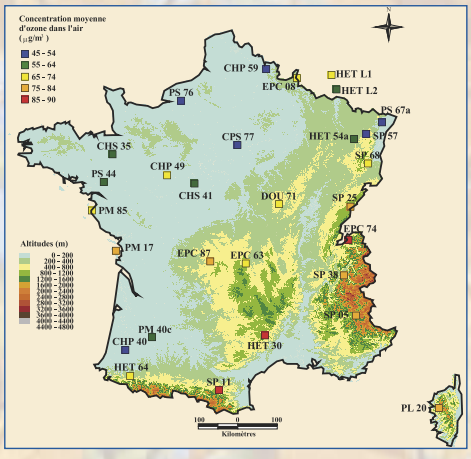
Comment mesure-t-on les concentrations dans l'air ?

E. ULRICH

Echantillonnage des concentrations d'ozone dans l'air, en forêt domaniale de Boscodon (Hautes-Alpes)

Depuis 2000, une surveillance des concentrations d'ozone dans l'air est réalisée sur 27 sites hors forêt du réseau. Ces mesures sont réalisées durant la période de végétation, à l'aide de capteurs passifs (petites pastilles réagissant de manière sélective avec l'ozone).

Concentration moyenne d'ozone dans l'air durant la période de végétation, de 2000 à 2005



De fortes concentrations mesurées

Actuellement un seuil limite de toxicité de l'ozone sur la végétation est disponible : l'AOT 40[2] (directive européenne 2002/3/CE relative à l'ozone dans l'air ambiant) qui est un indicateur de cumul d'ozone pendant la période de végétation. Nous observons régulièrement que ce seuil est dépassé sur plusieurs sites. Il existe donc des risques de réaction des végétaux selon leur sensibilité.
Les plus fortes concentrations sont observées dans les sites d'altitude. Cela s'explique par l'épaisseur plus réduite de l'atmosphère en montagne, entraînant un plus faible filtrage du rayonnement solaire et engendrant une plus forte production d'ozone.

Des symptômes sur la végétation

L'ozone est un gaz très oxydant qui, à des concentrations élevées, a un effet néfaste sur la végétation. Il pénètre dans les feuilles par les stomates[3] et se dégrade instantanément au contact des cellules entraînant des réactions en chaîne et aboutissant à la mort de celles-ci. Sur les plantes les plus sensibles, les symptômes sont identifiables dans un premier temps par la présence de nécroses foliaires et dans un second temps par la chute prématurée des feuilles. Ces pertes foliaires entraînent des diminutions de croissance et un affaiblissement des plantes, les rendant plus sensibles aux attaques parasitaires (insectes, champignons) et aux aléas climatiques (sécheresse).

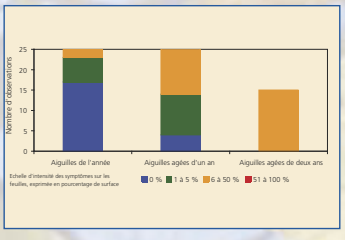
Zoom sur le site de la forêt territoriale d'Aïtone (PL 20, Haute Corse)

- Essence : Pin laricio de Corse (*Pinus nigra laricio corsicana*)
- Altitude : 1100 m
- Concentration moyenne d'ozone dans l'air de 2000 à 2005 = 84 µg/m³

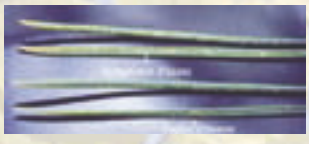
Zoom sur le site de la forêt domaniale de l'Aigoual (HET 30, Gard)

- Essence : Hêtre (*Fagus sylvatica*)
- Altitude : 1400 m
- Concentration moyenne d'ozone dans l'air de 2000 à 2005 = 88 µg/m³

Symptômes d'ozone observés en 2001

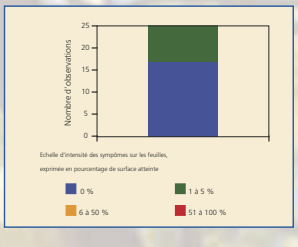


Aiguilles de deux ans avec symptômes d'ozone



L. DALSTEIN

Symptômes d'ozone observés en 2004



Feuilles avec symptômes d'ozone

L. DALSTEIN

Des symptômes d'ozone ont été observés sur cette pinède et cette hêtraie d'altitude où les concentrations d'ozone mesurées dans l'air sont fortes.

Les perspectives d'avenir

Pour les années à venir les symptômes dus à l'ozone pourraient s'amplifier si les épisodes caniculaires et l'émission des polluants se multiplient, entraînant de possibles pertes de croissance et des dépérissements.

Pour en savoir plus

ULRICH E., DALSTEIN L., GÜNTHARDT-GOERG M.S., VOLLENWEIDER P., CECCHINI S., VAS N., SJOBERG K., SKARMAN T., KARLSSON G.P., 2006 : RENECOFOR - Effets de l'ozone sur la végétation, concentrations d'ozone (2000-2002) et symptômes d'ozone sur la végétation forestière (2001-2003). Editeur : Office National des Forêts, Direction Technique, Département Recherche ISBN 2-84207-300-2, 126 p.
ULRICH E., 2005. Effet de l'ozone sue la végétation. Introduction générale dans la problématique. Rendez-Vous Techniques, n°9. pp.6-12.
ULRICH E., CECCHINI S., DALSTEIN L., VAS N., GÜNTHARDT-GOERG M.S., VOLLENWEIDER P., PIHL KARLSSON G., 2005. Concentrations d'ozone en zone forestière et symptômes d'ozone observés sur la végétation dans le réseau RENECOFOR. Rendez-Vous Techniques, n°10. pp.3-11.
www.onf.fr

S. CECCHINI, E. ULRICH, Office National des Forêts, sebastien.cecchini@onf.fr, L. DALSTEIN, N. VAS, Groupement International d'Etude de Forêts Subalpines, M.S.GÜNTHARD-GOERG, P. VOLLENWEIDER, Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

[1]REseau National de suivi a long terme des ECOsystèmes FORestiers
[2]Seuil d'accumulation d'ozone 40 ppb = 80 µg/m³
[3]Minuscule orifice situé au niveau de l'épiderme des végétaux et servant aux échanges gazeux

Office National des Forêts

WSL

Imprimerie ONF Fontainebleau

Comité d'organisation

BAROCHE Christiane	Office National des Forêts, Département de la Communication christiane.baroche@onf.fr
BIROT Yves	Président du Comité Scientifique de l'ONF yves.birot@free.fr
BOURJOT Laurence	Bourjot Environnement laurence.bourjot@free.fr
BREDA Nathalie	INRA Centre de Nancy, Equipe Ecologie et Ecophysiologie Forestière breda@nancy.inra.fr
CHUINE Isabelle	CEFE-CNRS, Equipe Bioflux isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr
DAMBRINE Etienne	INRA Centre de Nancy, Equipe Cycles biogéochimiques dambrine@nancy.inra.fr
ELICHEGARAY Christian	ADEME Centre de Paris-Vanves, Département surveillance de la qualité de l'air christian.elichegaray@ademe.fr
FLOT Jean-Luc	Département de la Santé des Forêts, Ministère d'Agriculture et de la Pêche, DGFAR/SDFB jean-luc.flot@agriculture.gouv.fr
GÜNTHARDT-GEORG Madeleine S.	Centre de Recherche Fédéral Suisse, Centre de validation des symptômes d'ozone pour l'Europe Centrale - madeleine.goerg@wsl.ch
LANDMANN Guy	Groupement d'Intérêt Public ECOFOR landmann@gip-ecofor.org
MENGIN-LECREULX Patrice	Office National des Forêts, Département Recherche patrice.mengin-Lecreulx@onf.fr
PEYRON Jean-Luc	Groupement d'Intérêt Public ECOFOR peyron@gip-ecofor.org
PILARD-LANDEAU Brigitte	Office National des Forêts, Direction Territoriale Ile-de-France-Nord-Ouest, Direction Forêt brigitte.pilard-landeau@onf.fr
PROBST Anne	Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie (LMTG), UMR 5563 CNRS/IRD/UPS aprobst@lmtg.obs-mip.fr
SCHULTE Ernst	Commission Européenne Direction Générale Environnement, Secteur Forest Focus sector ernst.schulte@cec.eu.int
ULRICH Erwin	Office National des Forêts, Département Recherche erwin.ulrich@onf.fr
VALEIX Jacques	Office National des Forêts, Inspection Générale jacques.valeix@onf.fr

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE

Pour se procurer RDV techniques :

ONF - Documentation technique
Boulevard de Constance
77300 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 24 - Fax 01 64 22 49 73
dtech-documentation@onf.fr

Office National des Forêts

ISSN : 1776-7717
Prix : 20 €