

RenD ez-Vous t e c h n i q u e s

n° 8 - printemps 2005



Dossier
p.23

***Tassements du sol dus à
l'exploitation forestière***

Pommier et poiriers sauvages



p. 3

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable

Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Jacques Valeix

Rédactrice en chef

Dominique de Villebonne

Comité éditorial

Yves Birot, Peter Breman, Jean-Marc Brézard, François Chièze, Jean-Luc Dunoyer, Claude Jaillet, Patrice Mengin-Lecreulx, Rémy Metz, Pierre-Jean Morel, Frédéric Mortier, Jérôme Piat, François-Xavier Rémy, Jacques Valeix, Dominique de Villebonne

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

page de couverture

En haut : omiérage et tassement de sol sur coupe d'exploitation en plein (T. Barrateau, ONF)

En bas : *Malus sylvestris* (L. Lévêque, ONF-CGAF)

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 : dtech-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

prix au numéro : 10 euros

abonnement : 45 euros (tarif 2005) durée 1 an (4 numéros et un hors série 2005)

Dépôt légal : mai 2005

Toutes les contributions proposées à la rédaction sont soumises à l'examen d'un comité de lecture.

sommaire

n° 8 - printemps 2005

- 3 pratiques
Pommiers et poiriers sauvages : comment les reconnaître ?
par Thierry Lamant et Laurent Lévêque
- 7 pratiques
Pommiers et poiriers sauvages en forêt
par Thierry Lamant et Laurent Lévêque
- 15 méthodes
Évaluer la potentialité forestière d'un site sans observer la flore
par Christian Ripert et Michel Vennetier
- 23 dossier thématique**
Tassements du sol
- 52 pratiques
Conséquences de la sécheresse et de la canicule 2003
par Frédéric Mortier, Jean-Claude Chopart et Thierry Sardin
- 57 pratiques
Cartographie au GPS des routes forestières d'Alsace
par Gérard Patzelt, Jean-Louis Besson, Laurent Gautier et Pierre Geldreich
- 64 pratiques
Plantation en milieu acide hydromorphe
par Anne Laybourne, Loïc Nicolas et Xavier Mandret

éditorial

Dans ces nouveaux « Rendez-vous techniques », nous avons tenu à attirer votre attention sur un compartiment essentiel de l'écosystème forestier : le sol. De sa qualité dépend en grande partie l'avenir de la forêt, aussi doit-il faire l'objet de soins très particuliers.

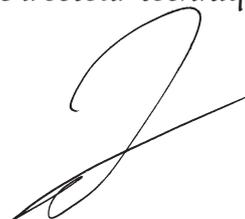
Si la fertilité du sol est un sujet déjà largement exploré, il n'en est pas de même en ce qui concerne ses caractéristiques physiques. Pourtant, le fonctionnement du sol et le bon développement des peuplements forestiers en dépendent largement.

Comment le fonctionnement du sol est-il affecté par un tassement excessif lors d'une exploitation forestière réalisée dans de mauvaises conditions ? Quelles peuvent en être les conséquences à moyen et long termes pour l'écosystème forestier ? Ces questions sont examinées ici à la lumière de collaborations fructueuses nouées avec divers organismes de recherche et de développement.

À l'image de la nette intensification des exploitations forestières observée à la suite des tempêtes de 1999, l'évolution rapide des modes d'exploitation forestière, avec notamment une mécanisation plus poussée, constitue une menace pour l'intégrité du capital sol. Gestionnaires et exploitants doivent donc prendre pleinement conscience du rôle essentiel du sol dans le bon fonctionnement des écosystèmes forestiers, tout comme des mesures et précautions qu'ils doivent prendre pour préserver la qualité des sols.

À cet effet, des solutions techniques sont présentées dans ce numéro. Pour assurer une gestion vraiment durable des sols et donc de la forêt, il convient de les mettre résolument en œuvre, en concertation étroite avec les acteurs forestiers concernés.

Le Directeur technique



Jacques Valeix

Pommier et poiriers sauvages : comment les reconnaître ?

Identifier à coup sûr l'une de ces espèces n'est pas chose aisée. C'est pourtant l'étape préalable incontournable avant toute investigation sur leur comportement et leur gestion. En complément d'une synthèse des principales caractéristiques écologiques de ces essences, les auteurs mettent à disposition des critères et des outils de reconnaissance éprouvés.

Les espèces disséminées contribuent à la biodiversité au sein des peuplements d'essences sociales plutôt monospécifiques (chênes, hêtre...) et participent pleinement à l'équilibre de l'écosystème forestier. Il s'agit le plus souvent de fruitiers, qui permettent d'assurer l'alimentation de nombreuses espèces animales, et peuvent en outre fournir du bois de très haute qualité pour peu que l'on ait favorisé leur développement dès leur plus jeune âge. Pourtant, si la gestion des grandes espèces sociales est bien connue, celle des espèces disséminées comme les poiriers et pommiers en est à ses balbutiements, en particulier en France. Ce manque de connaissances à leur égard, à commencer par leurs caractères botaniques, leur distribution géographique et leurs effectifs, peut s'avérer un handicap sérieux car leur avenir n'est pas garanti (voir article suivant p. 7).

Une ressource autochtone trop souvent mal identifiée

En dépit d'une taxonomie souvent contradictoire, on peut affirmer qu'il existe en France trois espèces de poiriers autochtones et une seule de pommier (Phipps, 1990). Quelques critères permettent de différencier ces divers taxons (voir tableau « Critères discriminants du pommier et des poiriers sauvages » P.5). Les autres caractères non précisés sont communs ou n'apportent aucune aide à l'identification.

Le pommier sauvage

■ Aire de répartition

Le pommier commun (*Malus sylvestris* L.) est présent dans toute l'Europe sauf dans sa partie la plus septentrionale, en Afrique du Nord et jusque dans l'Ouest et le Sud-Ouest du continent asiatique. En France, présent sur tout le territoire national (figure 1) sous forme d'arbres isolés ou de petits groupes

d'individus, mais plus rare en région méditerranéenne, il se rencontre de l'étage collinéen jusqu'à 1 400 m à l'étage montagnard. Sa longévité est estimée entre 70 et 100 ans.

■ Exigences écologiques

C'est un arbuste ou un arbre de taille moyenne, héliophile mais qui tolère l'ombre : il reste alors dominé, de croissance très lente et fructifie pas ou peu. Espèce mésophile à très large amplitude, il affectionne les milieux ouverts tels que les haies, friches ou fruticées et se rencontre également en forêts claires. Il croît rarement sur stations acidiphiles. Si son optimum écologique potentiel se situe sur terrains riches et frais, son optimum d'existence, imposé par la compétition naturelle des autres espèces, se situerait à la limite humide de la forêt, en conditions ripicoles telles que les prairies humides alluviales (Wagner, 1995).

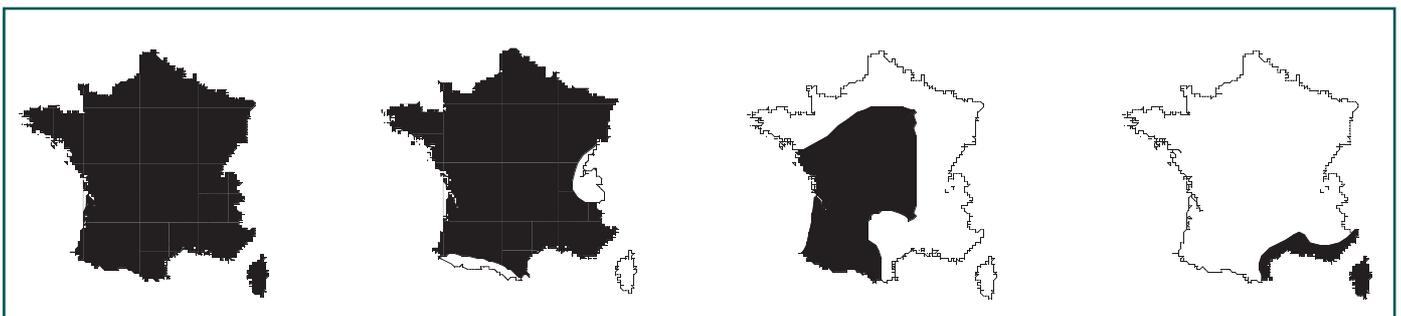


Fig. 1 : de gauche à droite, aires de répartition de *Malus sylvestris* L., *Pyrus pyraster* Burgsd., *Pyrus cordata* Desv. (Rameau et al., 1989) et *Pyrus amygdaliformis* Vill. (Bolos et al, 1984)

■ Éléments d'identification

Il se distingue des poiriers par son pétiole toujours plus court que le limbe, le limbe plutôt mou que ferme, l'écorce interne jaune et non blanche, la couleur jaune des étamines (au lieu de rouge ou pourpre) et bien entendu la forme des fruits. La distinction entre la forme sauvage et les formes cultivées ou hybrides est parfois délicate. Le fruit est sûrement le critère le plus fiable (de 35 à 40 mm de hauteur et largeur, avec un goût acide et un cœur dépassant 50 % de la largeur du fruit chez l'espèce sauvage) mais ce caractère peut être combiné à la pilosité de l'individu examiné (Müller et Litschauer, 1996). Il est ainsi possible d'exclure l'hypothèse d'un pommier sauvage si le sujet présente, en deuxième partie de saison de végétation, un feutrage cotonneux intense à la face inférieure des feuilles (Coart et al., 2003). Si la pubescence est par contre plus légère, il n'est pas possible de trancher avec ce seul critère, en raison de sa variabilité naturelle chez *Malus sylvestris*, et il s'agira alors de multiplier les caractères observés (fleurs, feuilles, rameaux) pour affiner le diagnostic (descriptions détaillées par Müller et Litschauer, 1996).

Les poiriers sauvages

■ Le poirier commun

Aire de répartition

L'aire naturelle du poirier commun (*Pyrus pyraster* Burgsd) est vaste puisqu'on le rencontre de l'Ouest de la péninsule ibérique jusqu'en Ukraine, et à l'Est de l'Irak et jusqu'au Nord de l'Iran en passant par l'Italie, le Nord de la Grèce et de la Turquie. Sa limite septentrionale est le Sud des Pays baltes. En France, il est présent pratiquement sur l'ensemble du territoire national, Pyrénées, Nord des Alpes et du Jura et Corse exclus (figure 1) mais pas au-dessus de 1 600 m d'altitude. Sa longévité est estimée à plusieurs siècles.



Fleurs de pommier sauvage

L. Lévêque, ONF - CGAF

Exigences écologiques

C'est un arbuste ou un arbre de taille moyenne, thermophile, héliophile mais qui tolère la mi-ombre, et à très large amplitude édaphique. Il pousse en effet sur des sols secs à très frais, riches en bases à modérément acides, argileux ou limoneux, plus ou moins caillouteux. Son optimum écologique potentiel est cependant le même que celui de *Malus sylvestris* (sols riches et frais), mais exposée à la concurrence naturelle, l'espèce est

souvent refoulée aux limites sèche ou humide de la forêt (Wagner, 1995).

Éléments d'identification

Des trois espèces de poiriers autochtones, c'est le seul présentant des caractères morphologiques relativement proches des poiriers de culture. La discrimination avec les poiriers cultivés ne peut se faire assurément qu'à partir de la dimension des fruits (jusqu'à 30 mm pour le poirier sauvage) et de leur aspect piriforme (caractère peu prononcé chez les sujets sauvages). Les critères de pubescence des bourgeons évoqués parfois ne sont basés que sur un nombre trop limité d'échantillons pour pouvoir être totalement discriminants. Il en est de même pour les dimensions du limbe et la proportion longueur / largeur de ce dernier. Enfin, la face supérieure du limbe est fréquemment plus luisante sur les poiriers de culture mais, là encore, ce critère n'est pas fiable à 100 %. Les feuilles des sujets sauvages ne sont par contre jamais densément tomenteuses, et leurs rameaux portent généralement des épines, hormis chez les sujets très âgés (Müller et Litschauer, 1996).



Écorce et feuille de poirier commun (*Pyrus pyraster*)

L. Lévêque, ONF - CGAF

	<i>Malus sylvestris</i> Pommier	<i>Pyrus pyrauster</i> Poirier	<i>Pyrus cordata</i> Poirier à feuilles en cœur	<i>Pyrus amygdaliformis</i> Poirier à feuilles d'amandier
Aspect	Arbuste ou petit arbre	Arbuste ou petit arbre	Arbuste ou arbrisseau	Arbuste ou petit arbre
Hauteur	5 à 15 m	8 à 20 m	3 à 8 m	6 m et +
Écorce adulte	plaquettes écailleuses grises, larges et fines	grise, très fissurée dans les 2 sens, écailleuse rectangulaire	grise, peu crevassée	gris foncé à noirâtre et fissurée
Écorce interne	jaune	blanche	blanche	blanche
Rameau long aoûté	brun rouge, parfois épineux	jaunâtre, épineux (sauf sujets très âgés)	violacé, parfois épineux	brun rouge, parfois épineux
Bourgeon	pubescent, appliqué au rameau	glabre, écarté du rameau	glabre, écarté du rameau	écarté du rameau, velu devenant glabrescent
Feuille	molle	assez ferme, rarement en cœur à la base	assez ferme, en cœur à la base	ferme, en coin ou arrondie à la base
Nombre de paires de nervures	jusqu'à 4	supérieur à 4	supérieur à 4	supérieur à 4
Nervation face inférieure	saillante	non saillante	non saillante	aussi long ou plus court que le limbe
Pétiole	plus court que le limbe	aussi long ou plus court que le limbe	plus long que le limbe	aussi long ou plus court que le limbe
Feuille morte	ne noircit pas, se décompose facilement	noircit, se décompose difficilement	noircit, se décompose difficilement	noircit, se décompose difficilement
Couleur de la fleur	blanche teinté de rose	blanche	blanche	blanche
Couleur des étamines	jaune	pourpre	rouge	rouge à pourpre violacé
Disposition des fleurs	groupées par 4 à 8	groupées par 10 à 12	non connu	groupées par 8 à 12
Fruit à maturité	pomme jaune verdâtre	poire brièvement allongée jaune verdâtre	poire globuleuse rouge	poire quasi globuleuse brun jaunâtre
Nature du calice à l'extrémité du fruit	persistant	persistant	caduc	persistant
Mensurations des fruits	1 à 4 cm de diamètre	3 à 4 cm de diamètre	1 à 2 cm de diamètre	1 à 3 cm de diamètre
Disposition des fruits	solitaire, par paire ou plus	solitaire ou par paire	solitaire, par paire ou plus	solitaire, par paire ou plus

Critères discriminants du pommier et des poiriers sauvages

Synthèse réalisée d'après les sources suivantes : Bean, 1919 ; Bonnier, 1886-1934 ; Durand, 1988 ; Jacamon, 1987 ; Mathieu, 1877 ; Rameau et al., 1989 ; Rehder, 1947 ; Rol et al., 1968 ; Stace, 1997 ; Tutin et al., 1966-1976

■ Le poirier à feuilles en cœur
Uniquement présent des Pyrénées centrales et du Pays basque jusqu'en région Centre et au Sud de la Bretagne en passant par la Champagne humide (figure 1), le poirier à feuilles en cœur (*Pyrus cordata* Desv.) est le moins connu des poiriers sauvages. On le rencontre en France de l'étage collinéen à la base de l'étage montagnard, jusque vers avec 1 200 m d'altitude. D'un point de vue européen, c'est une espèce présente en bordure Ouest du continent, allant du centre du

Portugal au Sud-Ouest de l'Angleterre. Sa longévité est inférieure à celle de l'espèce précédente. C'est un arbuste ou arbrisseau thermophile et héliophile mais tolérant la mi-ombre, acidiphile à large amplitude. On le rencontre tant en milieux ouverts qu'en forêt.

■ Le poirier à feuilles d'amandier
Enfin, on peut ajouter en région méditerranéenne le poirier à feuilles d'amandier (*Pyrus amygdaliformis* Vill.), dont les feuilles, comme son nom l'indique, rappellent celles de *Prunus*

amygdalus (amandier). C'est une espèce très disséminée, observable des Pyrénées-Orientales aux Alpes-Maritimes et en Corse, ainsi que dans le Sud de l'Aveyron et du Tarn, dans la Drôme et les Hautes-Alpes (figure 1). C'est un arbuste ou un petit arbre héliophile sur stations sèches et ensoleillées jusqu'à 1 700 m d'altitude. On le rencontre en dehors de la forêt, dans des formations arbustives (garrigues, haies) plus ou moins dégradées. Il préfère les sols très secs, qu'ils soient calcaires ou marno-calcaires. Il résiste très bien aux sécheresses.

Ces quatre taxons sont tous entomophiles et la dissémination des fruits et graines est assurée par les animaux (mammifères, oiseaux). Ils rejettent de souche et drageonnent de manière importante.

Si les aires de répartition de ces fruitiers sont assez vastes, elles ne reflètent que très imparfaitement leur abondance réelle sur le terrain, car nous avons affaire à des espèces disséminées, présentes sous forme de petites populations, voire d'individus isolés dispersés au milieu d'autres essences.

Usages et propriétés

Le bois du pommier, rosé à brun rougeâtre plus ou moins foncé et homogène, est employé en ébénisterie, sculpture et gravure. Celui des poiriers à débits plus gros (en ce qui concerne *P. pyraeaster*), est homogène, très compact, de couleur rouge saumoné avec des petites mailles de teinte plus sombre ; il présente un beau poli et s'avère donc recherché en ébénisterie, marqueterie, gravure, sculpture et usages variés tels les outils de dessin (règles, équerres). Les autres poiriers présentent des débits de faibles dimensions (surtout *P. cordata*) mais leurs qualités semblent identiques. Il n'existe pas de cours pour les bois de ces espèces, le prix est fixé au cas par cas, mais il peut atteindre des valeurs très intéressantes pour les bonnes qualités.

Enfin, il ne faut pas négliger l'utilisation de ces espèces comme porte-greffes de variétés fruitières.

Plus disséminés encore que l'alisier torminal ou le merisier, moins bien connus et reconnus botaniquement, les véritables pommier et poiriers sauvages méritent pourtant toute l'attention des forestiers. Éléments originaux de la flore ligneuse de nos massifs, ils contribuent discrètement à la diversité spécifique de ces derniers. Source possible de bois de haute qualité, ils peuvent inciter propriétaires et gestionnaires à leur

accorder plus d'égards. À l'origine de nos variétés cultivées, ils constituent une ressource génétique naturelle potentiellement fort utile à l'avenir. Encore faut-il prendre conscience de leur présence ! Alors, un bonus pour *Malus* et *Pyrus* ?

Thierry LAMANT
Laurent LÉVÊQUE

ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers
Orléans
thierry.lamant@onf.fr
laurent.leveque@onf.fr

Bibliographie

BEAN W.J., 1919. Trees and shrubs hardy in the British Isles. Londres : John Murray. pp 280-287

BONNIER G., 1886-1934. Flore complète illustrée de France, Suisse et Belgique. Paris, Orhac.

COART E., VEKEMANS X., SMULDERS M.J.M., WAGNER I., VAN HUYLENBROECK J., VAN BOCKSTAELE E., ROLDAN-RUIZ I., 2003. Genetic variation in the endangered wild apple (*Malus sylvestris* (L.) Mill.) in Belgium as revealed by amplified fragment length polymorphism and microsatellite markers. *Molecular Ecology*, vol. 12, pp. 845-857

DURAND R, 1988. Les arbres. Paris : Solar. Guide vert, pp. 221-222

JACAMON M, 1987. Guide de Dendrologie : arbres, arbustes et arbrisseaux de la forêt française. Tome 2. 2e édition Nancy : ENGREF. 256 p.

MATHIEU A, 1877. Flore forestière, 3e édition entièrement revue et considérablement augmentée. Paris : Berger-Levrault. 618 p.

MÜLLER F., LITSCHAUER R., 1996. Unterscheidung zwischen Wildobstarten und verwilderten Kulturformen. *Österreichische Forstzeitung* 107 (3), pp.21-22.

PHIPPS J., 1990. A checklist of the sub-family Maloideae. *Canadian Journal of Botany*, vol.68, n° 10, pp. 2234, 2238, 2240.

RAMEAU J.-C., MANSION D., DUME G., 1989. Flore forestière française. Tome 1 : plaines et collines. Paris : IDF. pp.503,549-553

REHDER A, 1947. Manual of cultivated trees and shrubs hardy in North America. 2e ed., tome 1. New York : Mac Millan Company, pp. 391, 402, 403.

ROL R., JACAMON M., 1968. Flore des arbres, arbustes et arbrisseaux. Tome 3 : région méditerranéenne. Paris : La Maison Rustique, pp. 60-61

STACE C.A., 1997. New flora of the British isles. 2e ed. Cambridge : Cambridge University Press. 1130 p.

TUTIN T.G. et al., 1976. Flora Europaea. Vol. 1. Cambridge : Cambridge University Press. pp. 65,66.

WAGNER I., 1995. Identifikation von Wildapfel (*Malus sylvestris* (L.) MILL.) und Wildbirne (*Pyrus Pyraeaster* (L.)

En ligne

http://www.lpgri.Cgiar.Org/Networks/Euforgen/Euf_Home.htm. Stephan BR, Wagner I, Kleinschmit J. Wild apple (*Malus sylvestris* (L.) Mill.) and pear (*Pyrus pyraeaster* (L.) Burgsd.).

Pommier et poiriers sauvages : réhabilitons les arbres à pépins en forêt !

Fort de son expérience sur l'alisier torminal, le Conservatoire génétique des arbres forestiers (CGAF) a effectué en 1999-2001 une enquête nationale auprès des personnels de terrain de l'Office, sur d'autres espèces fruitières à caractère disséminé, parfois délaissées mais faisant néanmoins partie du patrimoine forestier. La présentation de ces résultats est l'occasion de faire le point sur l'état des ressources naturelles des pommiers et poiriers sauvages dans les forêts publiques, et de réfléchir à la pérennisation de ce capital rare.

Les pommiers et poiriers sauvages sont menacés par suite de la destruction d'habitats comme la suppression de haies, ou en raison, jusqu'à il y a une quinzaine d'années, de l'inadaptation de la sylviculture appliquée aux espèces sociales avec lesquelles ils se trouvent en mélange. Existente également des risques de perte de diversité génétique et d'hybridation avec les variétés ornementales et cultivées homologues, ou suite à des transferts de plants à longue distance lors de plantations (Fady et Lefèvre, 2004).

Plusieurs pays européens comme l'Allemagne (Kleinschmit *et al.*, 1998), la Suisse (Barengo, 2001 ; site www.seba.ethz.ch) ou la Belgique (Coart *et al.*, 2003) se préoccupent activement de la conservation de telles espèces. Le réseau européen EUFORGEN (ensemble des réseaux du programme européen des ressources génétiques forestières) place également pommiers et poiriers parmi les espèces forestières aux ressources génétiques menacées (Stephan *et al.*, 2003). Il nous a donc paru opportun, dans ce contexte, de dresser un premier constat de l'état de ces espèces en forêt publique et de sensibiliser les gestionnaires à leur présence et à leur sauvegarde.

Premier inventaire, un goût d'inachevé...

Le constat d'un manque d'informations précises, non seulement sur la distribution géographique mais aussi sur les effectifs des pommiers et poiriers sauvages en forêt publique métropolitaine, a conduit le CGAF à lancer une première enquête courant 1999 auprès du personnel de terrain de l'ONF, sous la forme d'un questionnaire diffusé dans le mensuel Info ONF. Ce sondage a été actualisé fin 2001, après passage de la tempête de 1999, par l'envoi aux premiers contributeurs d'une demande de renseignements sur les dégâts éventuels causés par celle-ci et sur les potentialités de régénération de ces espèces. Les agents de l'ONF présents sur le terrain ont montré à cette occasion leur motivation et leur intérêt pour la connaissance du milieu forestier. Les réponses à l'enquête, basée sur le volontariat, ont été nombreuses (62) et ont permis la constitution d'une base de données dynamique sur ces espèces (voir encadré « Un inventaire à compléter ! » p.8).

Localisation de la ressource

Les résultats qui suivent ne sauraient être considérés comme exhaustifs à l'échelon national. En effet, la forêt privée n'est pas couverte par l'enquête et

les taux de réponse obtenus varient d'une région à l'autre, sans lien avec l'importance des forêts publiques (figures 1 et 2). Si l'Est de la France concentre l'essentiel des réponses, certaines régions restent non renseignées, bien que l'ONF y gère de nombreuses forêts et que ces fruitiers y soient potentiellement présents.

Néanmoins actuellement, des pommiers et poiriers sauvages, tous statuts confondus (semis ou drageons, jeunes tiges, arbres adultes ou sénescents), ont été signalés sur 117 parcelles forestières réparties dans 65 forêts, majoritairement (près des 2/3) communales. Malgré ses lacunes et la sur-représentation de l'Est de la France, l'échantillon semble confirmer la présence de pommiers sauvages *Malus sylvestris* et de poiriers *Pyrus pyraeaster* sur l'ensemble du territoire national. Le poirier *Pyrus cordata* n'est signalé qu'au sein de l'aire qui lui est communément attribuée dans les flores, conformément à son tempérament à tendance atlantique ; il se trouve de fait moins représenté dans notre enquête que les autres espèces en raison notamment du faible taux de forêts soumises dans le grand Ouest et du faible taux de réponse dans les zones de montagne. Les poiriers non identifiés peuvent comprendre *a priori* quelques exem-

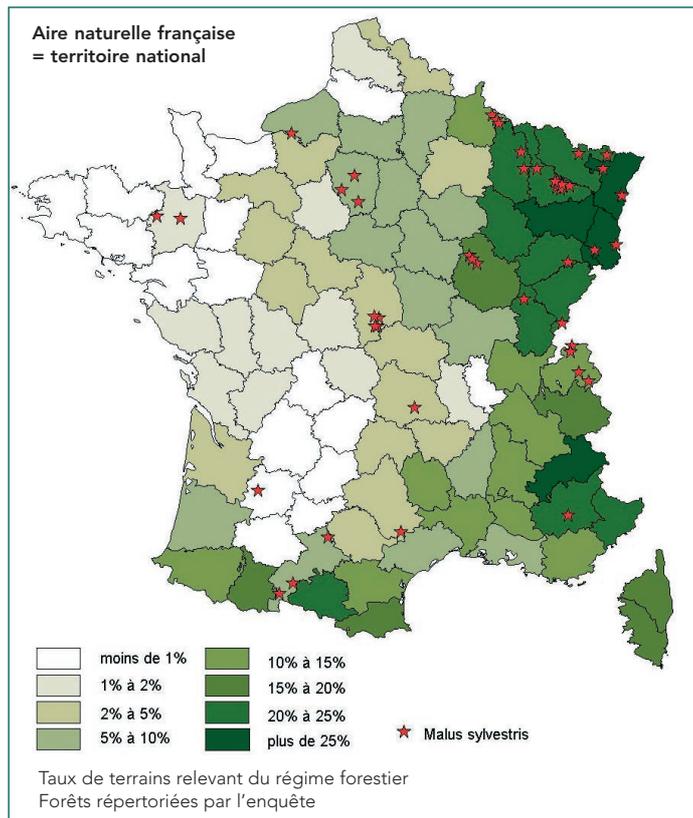


Fig. 1 : localisation des sites recensés de pommiers sauvages (*Malus sylvestris*)

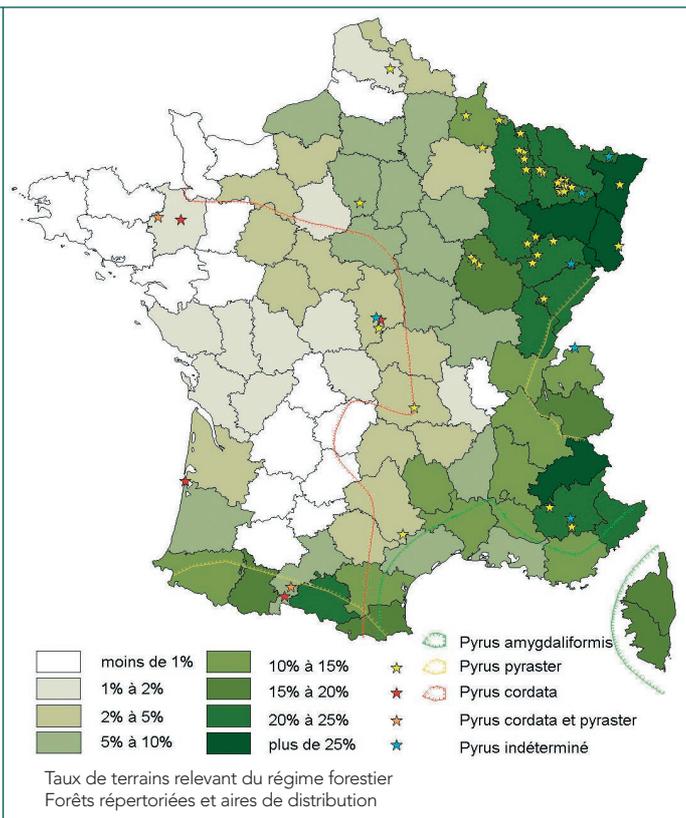


Fig. 2 : localisation des sites recensés de poiriers sauvages (*Pyrus pyraeaster*, *P. cordata* et sp.).

plaires de poirier à feuilles d'amandier (*P. amygdaliformis*), lequel avait été exclu dans un premier temps de cette enquête, mais aussi probablement des

hybrides entre les différentes espèces sauvages (*P. pyraeaster* et *cordata*), et entre sauvages et cultivés (en Lorraine par exemple).

Première analyse des données recueillies

Les analyses qui suivent sont communes aux pommiers et poiriers, l'enquête ayant montré des résultats similaires pour ces espèces. Compte tenu des caractéristiques particulières de l'enquête (effort de prospection non homogène sur l'ensemble des forêts gérées et probablement aussi sous-estimation de la présence de jeunes tiges non florifères, plus difficiles à repérer), cette analyse constitue un premier état des lieux, non exhaustif, de la ressource existant en pommiers et poiriers sauvages, en termes de présence / absence et sans approche quantitative. Néanmoins, les résultats de cette première étape, à confirmer par un futur échantillonnage plus conséquent, semblent d'ores et déjà cohérents avec ce que fournit la littérature existante (parcimonieuse) sur le comportement de ces fruitiers sauvages.

Un inventaire à compléter !

Nous profitons de cet article pour relancer cette enquête et solliciter la contribution de chacun afin de compléter les manques de cet inventaire, notamment (mais pas exclusivement !) dans les Vosges, la Marne, la Haute-Saône, les Cévennes, la Corse et les départements des arcs alpins et pyrénéens.

La fiche de renseignements peut être téléchargée sur le site intraforêt de la direction technique, ou obtenue auprès du CGAF sur demande (Laurent Lévêque). Les fiches renseignées sont à renvoyer à l'adresse suivante, par voie postale ou électronique :

Conservatoire génétique des arbres forestiers

Campus INRA

Avenue de la Pomme de Pin - BP 20 619 - Ardon - 45166 Olivet CEDEX

Tél. : 02 38 41 48 08 / 02 38 41 48 06 - fax : 02 38 41 48 00

laurent.leveque@onf.fr

En retour, des données (extraits de la base de données, listings, cartes) peuvent être fournies sur demande par le CGAF aux services intéressés.

Au sein de l'échantillon, ces espèces se rencontrent dans tous les types de peuplements, avec une prépondérance de la futaie régulière (figure 3). Majoritairement signalées dans les séries à objectif de production, elles sont présentes pour un tiers des cas dans les parcelles classées en régénération ou en préparation, mais se rencontrent dans tous les groupes de classement d'aménagement : connaissance plus fine de la ressource dans les massifs de production, plus faible présence des conditions écologiques optimales des *Pyrus* et *Malus* en zones de protection ou simple biais d'enquête ?

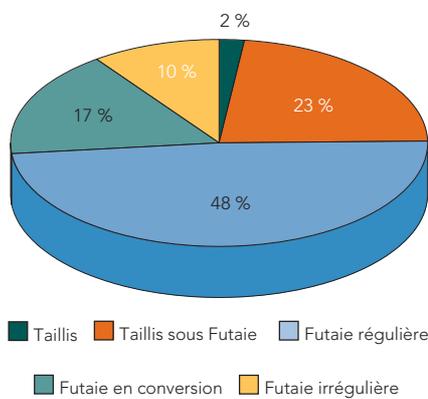


Fig. 3 : traitement appliqué à la parcelle

L'espèce principale composant les peuplements à pommiers et poiriers est majoritairement le chêne, seul ou associé à d'autres feuillus (figure 4). Mais on trouve également ces fruitiers, de manière plus surprenante, dans les peuplements résineux (16 %) et on peut s'interroger, pour ce dernier cas, sur la capacité de ces fruitiers à s'y reproduire (le cas existe néanmoins en forêt d'Orléans – L. Nicolas, comm. pers.). La nécessité d'intégrer pleinement ces feuillus disséminés dans la sylviculture des grandes essences sociales, explicitement mentionnée dans les nouveaux guides de sylviculture (Jarret, 2004), est ici clairement mise en évidence.

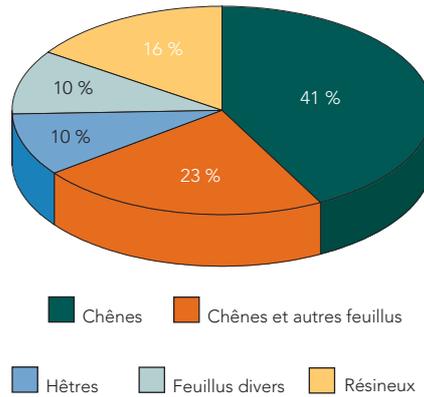


Fig. 4 : essence principale du peuplement

L'enquête confirme le comportement de feuillus disséminés, d'une part par les très faibles densités rencontrées (notées à l'échelle de la parcelle pour notre enquête) (figure 5) et d'autre part en raison de leur répartition très majoritairement sous forme de pieds isolés (91 % des cas), beaucoup plus rarement par groupes de quelques individus.

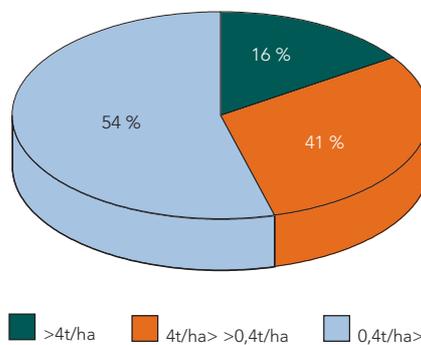


Fig. 5 : densité en nombre de tiges à l'hectare (à l'échelle de la parcelle)

Le tempérament héliophile de ces espèces est en outre confirmé et illustré par la fréquence des cas de lisière ou de parcelles à houppiers discontinus (figure 6). Cependant, le quart des individus recensés se trouve sous peuplement fermé ce qui risque, à terme, de limiter leur potentiel de développement et de reproduction en l'absence d'interven-

tions sylvicoles ciblées à leur profit. Par ailleurs, les sujets en situation de fleur ne produisent pas tous des fruits (figure 7), et en outre la proportion d'arbres ayant produit des descendants (semis, rejets ou drageons repérés par l'agent local) est faible. Ce constat peut s'expliquer en partie par la sensibilité des fleurs aux aléas climatiques (essentiellement gelées tardives et fortes pluies printanières), mais également par la pression de la faune sur les jeunes sujets, ainsi que par l'impact négatif de l'ombre et de la concurrence des espèces qu'ils accompagnent (Barengo, 2001).

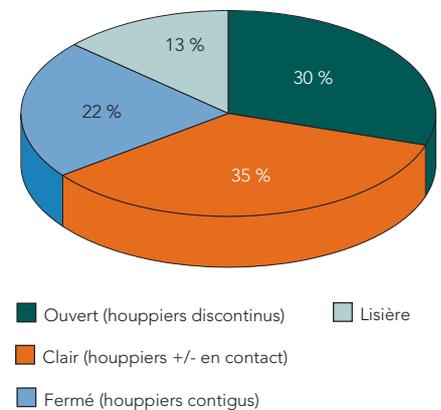


Fig. 6 : état du couvert des peuplements abritant des pommiers et poiriers

Menaces pesant sur ces fruitiers

Gestion sylvicole inadaptée

Comme le montre l'analyse précédente, pommiers et poiriers sauvages sont disséminés dans des peuplements d'essences sociales (chênes, hêtre, mais aussi résineux), qui, sans démarche volontariste de la part du sylviculteur, laissent de manière naturelle peu de chances de survie à moyen terme à ces espèces héliophiles peu compétitives. La ressource existante ne doit son salut qu'à la présence d'individus sous faible couvert ou en lisière – donc en situation de faible compétition – et/ou à l'intérêt que leur accorde le gestionnaire local, aidé en particulier par les guides de sylviculture, tel celui paru récemment pour la chênaie atlan-

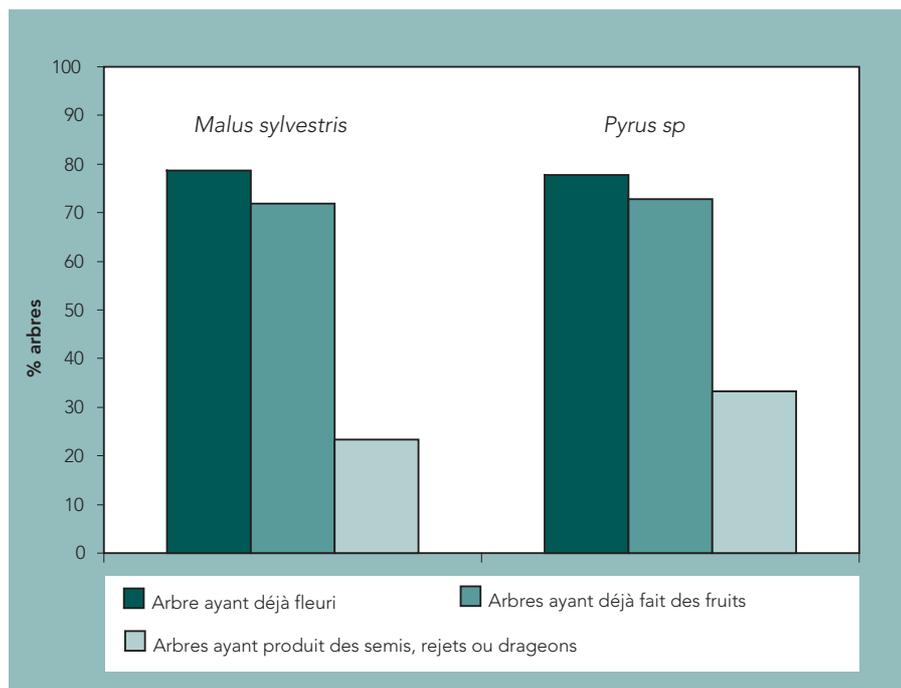


Fig. 7 : proportion des arbres ayant produit fleurs, fruits et descendants (moyenne sur un échantillon de 11 forêts pour *Malus* et 9 forêts pour *Pyrus*)

tique (Jarret, 2004). Plus que la destruction directe des habitats naturels – cause souvent citée de disparition d’une espèce (Lefèvre, 2004), l’élimination par martelage et la concurrence non contrôlée des essences sociales, telles que fréquemment pratiquées dans la gestion passée, constituent de fait des menaces directes sur les populations existantes de fruitiers.

De plus, la diminution du nombre de reproducteurs, la pression importante de la faune sauvage sur les fruits et semis ou rejets naturels (Barengo, 2001), la fragmentation des milieux (anciennes plantations de résineux par exemple qui font écran entre deux îlots de fruitiers) et l’augmentation consécutive des distances entre individus florifères peuvent entraîner à terme une réduction potentielle de la diversité intraspécifique pour chaque espèce (Stefan et al., 2003 ; ONF, 2004).

Des risques d’hybridation entre espèces sauvages et cultivées

À ces menaces s’ajoutent des risques d’hybridation possible avec des fruitiers

(à usage personnel ou industriel), signalée pour certaines forêts de l’enquête, constitue une menace potentielle pour la préservation des ressources génétiques de cette espèce sauvage. Pour le poirier en revanche, l’hybridation avec les cultivars utilisés en vergers constitue une menace avérée pour le pool génétique de l’espèce sauvage (Barengo, 2001), pouvant conduire à la production de fruits et de graines hybrides – et donc de semis hybrides. Chercher à obtenir des régénérations naturelles dans des forêts comportant peu d’adultes sauvages et situées à proximité de vergers de production est donc risqué car cela pourrait conduire à favoriser l’installation de semis hybrides qui, à terme, se substitueraient à la ressource locale sauvage (Barengo, 2001 ; Coart et al., 2003). C’est ainsi qu’en Allemagne, la régénération naturelle par graines du poirier sauvage est déconseillée.

L’absence de réglementation nationale sur les matériels forestiers de reproduction de ces espèces autorise aujourd’hui tout transfert de plants, d’origines géographique et génétique inconnues, avec des risques d’hybridation entre matériel végétal local et individus introduits aux caractéristiques adaptatives éventuellement très diffé-



Un poirier (*Pyrus pyraster*) en peuplement

L. Lévêque, ONF-CGAF

rentes (dates de débourrement par exemple), et des conséquences génétiques négatives à long terme. En outre, en raison principalement de la faible abondance des fructifications en milieu forestier mais aussi de leur irrégularité interannuelle, sources de coûts élevés de mobilisation, une partie non négligeable des récoltes actuelles de matériel végétal se fait vraisemblablement sur arbres isolés de lisière ou de haies, avec là encore des risques élevés d'hybridation. Pour autant, la mise en place de plantations conservatoires régionalisées ne saurait être préconisée tant que demeure totalement inconnue la structuration de la diversité et de la variabilité génétiques de ces taxons en France.



Attaque de feu bactérien sur pommier

site http://sea.ne.chOPC_FeuBac.htm

Problèmes phytosanitaires

Signalons enfin un dernier type de menaces, cause possible de raréfaction des populations sauvages, notamment pour les individus isolés de haies ou de lisière : les maladies affectant les variétés cultivées, vieilles maladies endémiques comme la rouille grillagée du poirier, la tavelure et l'oïdium ou maladies d'introduction récente comme le feu bactérien (toutes les espèces de *Pyrus* et *Malus* sont hôtes de cette bactérie), ainsi que les insectes ravageurs des fruitiers de culture. On peut sup-

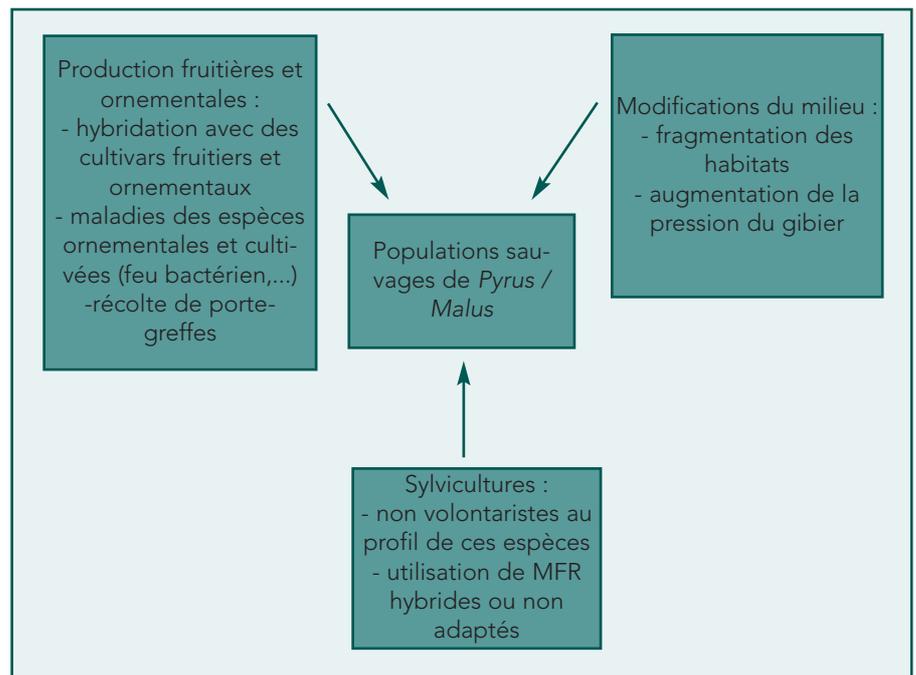


Fig. 8 : principales menaces d'origine anthropique affectant les ressources génétiques des pommiers et poiriers sauvages (adapté de Barengo, 2001)

poser une cohabitation ancienne entre les fruitiers sauvages et leur cortège de parasites et donc l'effet d'une longue pression de sélection sur les populations sauvages actuelles de fruitiers. Une attention particulière doit être portée cependant à *Gymnosporangium sabinae* (Barengo, 2001), la rouille grillagée du poirier, dont l'hôte intermédiaire est le genévrier : certes contrôlée en vergers en partie grâce aux traitements fongicides anti-tavelure, elle pourrait notamment affecter les poiriers sauvages dans les stations où ils cohabitent avec le genévrier (L. Parisi INRA Angers, comm. pers.).

Pour les maladies récentes, en revanche, on peut craindre une sensibilité générale des *Pyrus* et *Malus* sauvages avec des niveaux de résistance extrêmement variables d'un individu à l'autre (Paulin INRA Angers, comm. pers.). Les pathologistes font toutefois observer que la dispersion des tiges, l'hétérogénéité génétique des populations (à caractériser pour la France) et le mélange avec d'autres essences limitent les risques d'attaques des maladies à dispersion aérienne (Paulin, comm. pers.).

Finalement, les impacts actuels, anthropiques et non anthropiques (figure 8), sur les forces évolutives (Musch *et al.*, 2004) et les ressources génétiques des pommiers et poiriers sauvages conduisent sur le plan génétique à des risques non négligeables :

- de dérive génétique avec appauvrissement de la diversité génétique, par réduction des effectifs des populations en cas de sylvicultures non respectueuses de la diversité des essences, de pression de gibiers ou des pathogènes des variétés cultivées ;
- de dérive génétique par l'absence de flux de gènes entre populations sauvages du fait de la fragmentation de milieux ou plus largement par une difficulté croissante de croisements naturels entre individus sauvages de la même espèce ;
- d'hybridations suite à des flux de gènes provenant soit de variétés cultivées et ornementales soit de transferts de matériel végétal d'un pays à l'autre ou à l'inverse.

Un certain nombre de mesures peuvent néanmoins permettre de diminuer les risques de disparition à court et moyen terme.

Règles de gestion de base préconisées

D'abord mieux connaître, pour sauvegarder

Avant toute chose, il convient d'abord de préciser la carte de distribution de ces fruitiers en forêt relevant du régime forestier, en complétant les prospections dans certains massifs (voir encadré) puis de préciser les effectifs présents par classes d'âge ou, au minimum, par stades de développement (régénération, jeunes arbres, arbres matures, arbres sénescents). Outre la sensibilisation des agents ONF à cette recherche, la mise à disposition de critères simples d'identification est capitale, notamment pour le repérage de jeunes sujets. Le tableau comparatif préalablement utilisé pour cette enquête (voir article précédent p 3) constitue à ce titre une aide efficace, puisqu'il compare divers critères dendrologiques aisés à observer.

Cette étape devrait être suivie d'une analyse de la distribution géographique de la diversité neutre et de la variabilité génétique (débourrement, vigueur, résistance aux pathogènes) de chaque taxon afin de guider les choix en matière de transferts de matériel végétal (ONF, 2004), voire d'identifier des zones homogènes pouvant servir de base à la mise en place de plantations conservatoires régionalisées.

Préserver la ressource existante

Assurer un avenir aux individus déjà présents constitue bien entendu une priorité. La première mesure préconisée est l'établissement de règles simples de gestion, visant à permettre la croissance et le développement du houppier des individus en place pour favoriser leur floraison. C'est essentiellement pendant la phase juvénile du peuplement (phase d'installation et de compression) qu'il est

possible d'assurer l'avenir des essences précieuses et rares. Cela nécessite :

- un repérage précoce de ces individus rares par du personnel sensibilisé ;
- des interventions en dégagement (< 3 m) ou en nettoyage ciblés particulièrement sur ces espèces visant à préserver l'accès à la lumière des houppiers. La sensibilisation des personnels est là encore capitale.

Des tailles de formations et un élagage complémentaire sont souvent nécessaires sur ces fruitiers pour obtenir une bille nette de nœuds d'environ 5 - 6 m de hauteur.

En sortie de phase de compression, la désignation de tiges-objectif permet de garantir la présence de ces essences précieuses au sein du peuplement. En phase de grossissement des tiges, lors des martelages en coupes d'amélioration, la croissance optimale de ces dernières peut être assurée par des détou-rages qui consistent à enlever les arbres directement en contact avec un fruitier (surtout s'il est désigné). Il faut tout de même veiller à ne pas trop exposer le pommier ou le poirier à des vents froids susceptibles de provoquer des gelées printanières lors des floraisons.

Ces mesures, peu contraignantes, s'inscrivent pleinement dans le cadre du mélange des essences préconisées dans la gestion courante des peuplements (instruction ONF 93-T-23). Elles visent dans un premier temps à maintenir les individus en place, au minimum aux densités actuelles, c'est-à-dire environ 1 tige/ha, pour favoriser la production de semences. Il convient ensuite de gérer les éventuelles régénérations naturelles ou productions de drageons, pour assurer la pérennité des populations.

Penser la régénération

La structuration spatiale de la diversité génétique de ces fruitiers n'a pour l'heure pas encore été étudiée pour les populations françaises. On peut néanmoins penser que tout comme en Belgique ou en Allemagne (Coart et al., 2003), l'essentiel de cette diversité provient du niveau intrapopulations. Les recommandations usuelles concernant



T. Lamant, ONF - CGAF

Un pommier en forêt domaniale de Rambouillet

les matériels forestiers de reproduction s'appliquent donc aux pommiers et poiriers : privilégier la ressource locale ou à défaut la plus proche, en ayant soin de vérifier l'adéquation des conditions écologiques avec celles du lieu d'installation. Ainsi, à défaut de régénération naturelle repérée, la récolte de semences par des personnels motivés et débouchant sur un contrat de culture avec un pépiniériste (apport des graines, éducation en pépinière et récupération des matériaux forestiers de reproduction) constitue un excellent moyen de compenser un faible dynamisme reproductif naturel. Nombre de forestiers produisent d'ailleurs des plants, initiatives individuelles qu'il convient de souligner.

La sélection des sujets ne doit pas s'appuyer sur des critères dendrométriques, l'objectif étant d'obtenir une diversité génétique la plus large possible. On choisira donc des individus de formes et dimensions variées, en nombre le plus grand possible, dispersés à l'échelle du massif forestier : une distance d'au moins

50 m entre les tiges fructifères retenues peut garantir *a priori* une certaine diversité. Selon les agents ayant répondu à l'enquête, la fréquence de fructification varie d'un à trois ans (avec possibilité de conservation des graines – voir encadré ci-dessous « Propagation des pommiers et poiriers ») : une solution complémentaire au mélange des graines entre individus peut être le mélange temporel (lots de graines de plusieurs années différentes) afin de maximiser le brassage génétique (figure 7).

En présence de régénération naturelle sous semenciers dans les parcelles non prévues en coupe, des prélèvements de semis d'un an sont envisageables. Hormis ce cas particulier, il est important de faire attention aux éventuels semis naturels présents dans les espaces ouverts et autres coupes de régénérations. Les agents questionnés ont d'ailleurs confirmé la présence de semis dans ces zones qui concentrent le gibier vecteur des graines (mustélidés, renard, sanglier...).

Dans les situations de risque d'hybridation avéré (proximité d'espèces cultivées), l'utilisation de graines ou

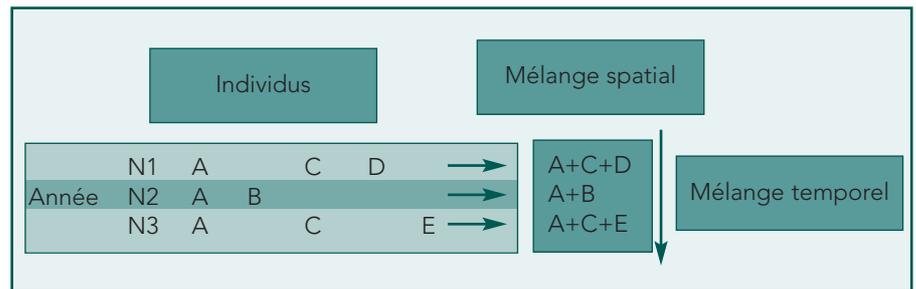


Fig. 9 : mélange des semences pour améliorer la diversité génétique des lots de graines

semis naturels peut être délicate et les drageons, ou encore greffons ou boutures de sujets sauvages (voir encadré « Propagation des pommiers et poiriers »), peuvent alors fournir une solution alternative à moyen terme.

Après éducation en pépinière des plants issus de graines ou éventuellement de prélèvements *in situ*, on peut procéder à un enrichissement sous forme de bouquets de plantations à distance définitive (entre 7 et 10 m d'équidistance), dans des trouées (par exemple dans les coupes secondaires en futaie régulière). Il est préférable d'utiliser des plants de grande taille de type 1+1

(100-120 cm) ou 1+2 (170-180 cm), nécessairement pourvus d'une protection individuelle contre le gibier (Barengo, 2001). Le coût estimatif est de l'ordre de 4 - 5 € par plant (fourniture du plant + protection et mise en place). Ces bouquets seront installés dans les régénérations d'essences sociales ou en mélange avec d'autres fruitiers à croissance lente (comme l'alisier par exemple), en situation de bordure de parcelle ou en lisière. Il est cependant à noter qu'en raison du risque potentiel de contamination par le feu bactérien, il est recommandé d'éviter les lisières forestières proches de grands vergers d'espèces cultivées (au moins 500 m) et de procéder à des vérifications sanitaires des individus sauvages existants en juin et septembre (Stadler *et al.*, 2004).

Propagation des pommiers et poiriers

La multiplication végétative, préconisée uniquement en cas de risques réels et importants d'hybridation avec des sujets cultivés, peut passer par l'utilisation des drageons naturels, mais à défaut il est également possible de faire des boutures ou des greffes. De jeunes pousses tendres sont prélevées en mai-juin, et bouturées avec hormones rhizogènes sur perlite en atmosphère brumisée (Dirr *et al.*, 1987). Les greffes de bourgeons s'effectuent quant à elles à la fin de l'été, et celles de scions, à 2 ou 3 yeux, vers la fin de l'hiver, sur porte-greffes vigoureux.

En ce qui concerne les graines (Suszka *et al.*, 1985), elles doivent être mises à macérer dans l'eau et bien nettoyées de la pulpe des fruits. Elles sont ensuite étalées à l'air libre en fines couches et régulièrement brassées afin d'obtenir un séchage de l'ordre de 8 - 10 % d'humidité. Une fois déshydratées et conditionnées en récipients hermétiques placés entre -3 °C et -10 °C, elles peuvent se conserver 2 ou 3 ans sans perte trop importante de capacité germinative (graines « orthodoxes »). La dormance de la graine est aisée à lever. Afin d'obtenir une bonne germination, il suffit de disposer les graines en caisses (contenant du sable humide par exemple) durant 2 à 3 mois en stratification froide (+2 à +4 °C) puis les placer à +20 °C jusqu'à leur germination.

En conclusion

La prise de conscience de l'intérêt du capital que représentent les pommiers et poiriers sauvages est un des nombreux enjeux du maintien de la diversité biologique en forêt, et la réalisation de cette enquête constitue un premier pas dans cette prise de conscience.

À court terme, des mesures simples peuvent enrayer la raréfaction et la disparition probable, dans le contexte actuel, de ces espèces :

- connaissance détaillée et protection de la ressource existante ;
- préservation de l'existant par le

repérage et le dégagement précoce pendant la phase juvénile, par la désignation, puis le détournement des sujets en âge de fleurir lors des coupes d'amélioration ;

■ développement de la régénération aussi souvent que possible, en tenant compte des risques d'hybridation avec les variétés cultivées et de transferts mal maîtrisés de matériel de reproduction d'origines parfois inconnues (plants, graines) ;

■ renforcement de populations avec des sources locales bien identifiées de matériel sauvage sain.

Leur mise en œuvre suppose la sensibilisation, la formation et le soutien technique des personnels (formations martélosopes, guides de sylviculture)

À moyen terme, et en l'absence de connaissances plus précises sur les niveaux actuels et les mécanismes de la diversité génétique au sein des populations sauvages, la solution peut être l'organisation, à une échelle locale ou régionale, de campagnes de récoltes de semences lors d'années de bonne floraison/fructification, suivies de contrats de cultures et de plantations en enrichissement dans les massifs concernés. De telles opérations de récolte, menées sur des effectifs suffisants pour garantir une variabilité minimale des semences produites, couplées à des plantations dans les mêmes zones, permettraient de préserver les caractéristiques génétiques locales tout en assurant le renouvellement des populations de pommier et de poiriers.

Parallèlement, il serait souhaitable de combler de nombreuses lacunes dans la connaissance de ces espèces, comme la variabilité du débournement, la fréquence des floraisons et fructifications, l'importance de la multiplication végétative par drageonnage, mais aussi dans la connaissance des espèces associées (pollinisateurs, animaux assurant la dissémination des semences, cortèges associés à la consommation des fruits). Ces acquis dans le domaine de la reproduction et de la diversité génétique et écologique sont les véritables garants de la pertinence de

règles de gestion efficaces à long terme.

Laurent LÉVÊQUE

Alain VALADON

Thierry LAMANT

ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers

Orléans

laurent.leveque@onf.fr

alain.valadon@onf.fr

thierry.lamant@onf.fr

Remerciements

Les auteurs remercient vivement :

l'ensemble des personnels techniques ayant répondu à cette enquête ;

J.-P. Paulin et L. Parisi, pathologistes de l'INRA Angers pour leurs apports sur le feu bactérien et la rouille grillagée du poirier ;

J. Bock, L. Nicolas et C. Robert pour leur relecture « sylvicole » de cet article et leurs nombreux commentaires.

Bibliographie

BARENGO N., 2001. Projet Favoriser les essences rares. Chaire de sylviculture EPFS, Direction Fédérale des forêts OFEFP, 8 p.

COART E., VEKEMANS X., SMULDERS M.J.M., WAGNER I., VAN HUYLENBROECK J., VAN BOCKSTAELE E., ROLDAN-RUIZ I., 2003. Genetic variation in the endangered wild apple (*Malus sylvestris* (L.) Mill.) in Belgium as revealed by amplified fragment length polymorphism and microsatellite markers. *Molecular Ecology*, vol. 12, pp. 845-857

DIRR A.M., HEUSER C., W JR, 1987. The reference manual of woody plant propagation : from seed to tissue culture : a practical working guide to the propagation of over 1100 Species. Varsity Press Incorporated, pp. 154-155, 182-183

JARRET P., 2004. Guide des sylvicultures : chênaie atlantique. Paris : ONF, Lavoisier. 335 p.

LEFÈVRE F., 2004. Human impacts on forest genetic resources in the temperate zone : an updated review. *Forest Ecology and Management*, vol. 197, n° 1-3, pp. 257-271

MUSCH B., VALADON A., ODDOUMURATORIO S., 2004. À propos de génétique des populations... Rendez Vous Techniques ONF, hors-série n° 1 « Diversité génétique des arbres forestiers : un enjeu de gestion ordinaire », pp. 6-15

ONF, 1993. Instruction 93-T-23 sur la prise en compte de la biodiversité dans l'aménagement et la gestion forestière, 18 p.

ONF Direction technique, 2004. Diversité génétique des arbres forestiers : un enjeu de gestion ordinaire. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 1. 130 p.

STADLER B., RUDOW A., GÜNTER M., POPOW G., LINDAU S., HOLLIGER E., URECH H-P., 2004. Recommandations en vue de favoriser les espèces fruitières sauvages et l'aubépine malgré le risque de contamination par le feu bactérien. L'environnement pratique, Fiche technique, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage Berne. 5 p.

STEFAN B.R., WAGNER I., KLEINSCHMIT J., 2003. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for wild apple and pear (*Malus sylvestris* and *Pyrus pyrastrer*). Rome : International Plant Genetic Resources Institute. 6 p.

SUSZKA B., MULLER C., BONNETMASIMBERT M., 1985. Graines des feuillus forestiers : techniques et pratiques. Paris : INRA. pp.16-19

En ligne

http://www.lpgri.Cgiar.Org/Networks/Euforgen/Euf_Home.htm. Stephan BR, Wagner I, Kleinschmit J. Wild apple (*Malus sylvestris* (L.) Mill.) and pear (*Pyrus pyrastrer* (L.) Burgsd.)

<http://www.seba.ethz.ch> : site suisse traitant de la conservation des essences rares en forêt.

Évaluer la potentialité forestière d'un site sans observer la flore.

Présentation d'une méthode développée en région méditerranéenne calcaire

À l'époque où l'on souhaite harmoniser les typologies de stations de régions voisines, voici une approche méthodologique originale adaptée au contexte de la région méditerranéenne, mais qui peut présenter un intérêt également pour d'autres régions y compris de plaine. La méthode vise à obtenir des indices de potentialité des stations reposant uniquement sur l'observation de facteurs abiotiques du milieu, qui soient valables en tout point de la zone d'étude et quel que soit l'état de dégradation de la forêt, et de se passer de la flore comme critère d'appréciation.

En région méditerranéenne française, dans les zones de basses et moyennes altitudes, la surface couverte par les catalogues de stations forestières est très inférieure à la moyenne nationale. Les méthodes classiques de typologie de stations forestières développées dans les régions tempérées, basées en partie ou totalement sur la phytoécologie, n'y sont pas entièrement transposables. En effet, la flore forestière est perturbée depuis plusieurs milliers d'années par les nombreuses actions anthropiques : défrichements, épierrage, incendies, pâturage ou débroussaillage. Beaucoup de forêts sont jeunes, notamment dans les zones où l'activité et la pression humaine sont fortes, et où l'environnement naturel est soumis à des perturbations intenses et fréquentes, comme l'incendie qui rajeunit périodiquement l'écosystème. Dans ces zones de basses et moyennes altitudes, la végétation est le plus souvent en phase de reconstitution et reflète plus les perturbations que les réelles potentialités du milieu.

Comme dans d'autres régions, la tentative d'extrapolation de catalogues existants hors de leur zone d'étude est res-

tée infructueuse. Il en est de même pour la synthèse de deux catalogues de régions voisines, les stations définies par l'un étant rarement comparables à celles de l'autre. L'expérience a été tentée en 1996 sans résultat satisfaisant (Vennetier et Ripert, 1996).

C'est pourquoi il est apparu nécessaire à l'échelle régionale de chercher une nouvelle méthode d'analyse et de description du milieu qui soit assez rapide à

mettre en œuvre et couvre une plus grande surface que celle de la plupart des catalogues.

Cette méthode a été développée grâce à l'acquis scientifique des études sur l'autécologie des principales espèces de reboisement et des typologies de stations réalisées précédemment dans la région méditerranéenne française (voir bibliographie). Ces études ont montré que la détermination de la potentialité



Pinède incendiée sur restanque

C. Ripert, Cemagref

forestière dans cette région repose essentiellement sur l'évaluation du bilan hydrique (principal facteur limitant), ce qui est une spécificité des régions méditerranéennes. L'étude couvre 5 000 km² de la Provence calcaire Ouest, comprenant le département des Bouches-du-Rhône, l'extrême Ouest du Var, le Sud-Est du Vaucluse.

La méthode pourrait être étendue ultérieurement aux zones méditerranéennes françaises déficitaires en catalogues, ou envisagée pour la simplification et l'harmonisation des typologies existantes en formation calcaire.

L'outil d'évaluation **proposé** est basé sur deux échelles d'analyse :

- **une première approche à l'échelle régionale** utilisant les macro-facteurs climatiques et géographiques qui permettent de produire, grâce à un SIG, une carte des indices climatiques de potentialité forestière,

- **une deuxième approche à l'échelle stationnelle** analysant plus finement le milieu sur la base des facteurs topographiques et édaphiques, mesurables uniquement sur le terrain, et qui permet le calcul d'un indice de potentialité topo-édaphique. Cet indice complète et précise localement l'indice climatique.

Des tableaux de correspondance entre les deux indices de potentialités et la productivité des principales espèces forestières méditerranéennes complètent l'outil pour aider à faire un choix d'essences.

Méthodologie

Démarche scientifique

Le travail scientifique repose sur la description et l'analyse d'un réseau régional de 315 placettes, représentatives des principaux gradients écologiques régionaux (voir plan d'échantillonnage). Ces placettes ont été choisies dans des peuplements assez âgés où il n'y a eu ni exploitation, ni incendie, ni autre perturbation majeure depuis 30 ans au moins, situation rare en région méditerranéenne. La flore y est de ce fait considérée comme représentative des conditions du milieu et de ses potentialités, donc

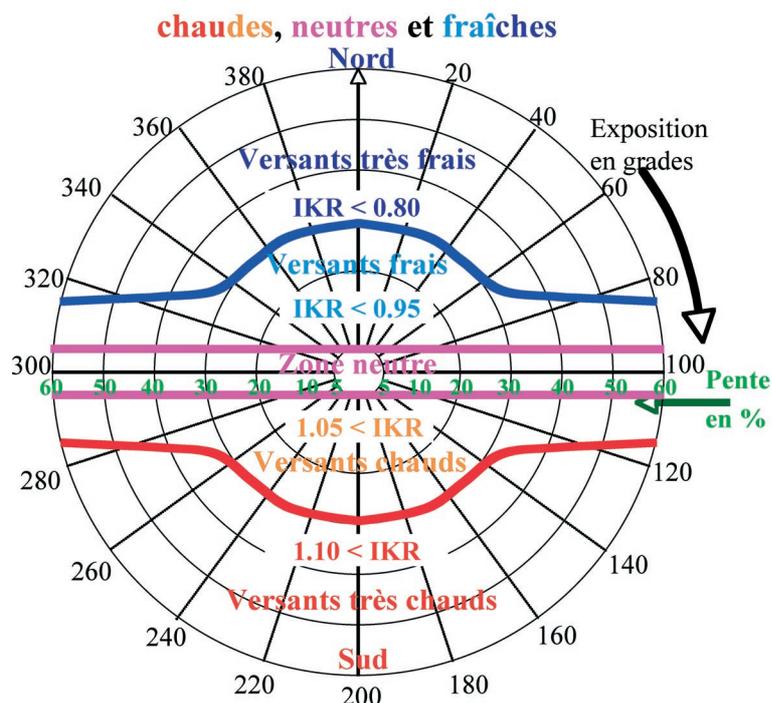


Fig. 1 : indice de climat

du bilan hydrique, en raison de l'ancienneté du couvert forestier qui a permis à la végétation d'atteindre un certain état d'équilibre avec le milieu.

Dans un premier temps, la flore de ces placettes est analysée. Les traitements statistiques, décrits ci-après, permettent de déterminer, en fonction de cette flore, un gradient de bilan hydrique selon lequel les placettes se classent sur la base de leur inventaire floristique : il s'agit d'un travail préalable, qui sert de fondement à la méthode. Dans un second temps, un modèle est élaboré permettant de prédire ce classement de bilan hydrique à l'aide des seuls facteurs abiotiques descriptifs du milieu, relevés de façon très détaillée sur le terrain.

Ce modèle peut ensuite être utilisé sur l'ensemble du territoire concerné pour

prédire le bilan hydrique d'un site, et les potentialités forestières, quel que soit l'état de sa végétation.

Plan d'échantillonnage

Le choix des placettes a été effectué en tenant compte de quatre facteurs dont des études précédentes ont montré le rôle prépondérant :

- le bioclimat divisé en deux classes :
 - la Basse Provence (bioclimat méso-méditerranéen, étage du chêne vert),
 - l'Arrière Pays méditerranéen (bioclimat supra méditerranéen, étage du chêne blanc) ;
- l'altitude selon quatre classes de 200 m d'amplitude, de 0 à 800 m ;
- l'exposition pour laquelle on a utilisé l'indice de climat lumineux de Becker (IKR, combinaison de l'exposition et de la pente, voir encadré) en cinq classes : très froid, froid, neutre, chaud et très chaud (voir figure 1) ;

L'IKR est un indice calculé qui traduit le % de lumière directe et indirecte reçue par un point donné du fait de son exposition et de la pente, par rapport à celle que recevrait ce point s'il se trouvait en situation plate et sans confinement. On parle de « climat lumineux », entraînant des variations importantes de température. Cela se traduit dans le langage populaire en « versants froids » et « versants chauds », ou encore « ubacs » et « adrets ». Le passage du froid au chaud est assez rapide. Il est concrétisé par une zone intermédiaire « neutre », comprenant les zones plates et de très faible pente ainsi que les positions orientées plein Est ou plein Ouest quelle que soit leur pente.

■ le matériau superficiel : altérite ou colluvion, sur ou issues des roches les plus communes dans le domaine d'étude (calcaires durs, marneux, dolomitique, marnes...).

Choix des peuplements en vue de caractériser les stations

Les relevés ont été réalisés dans des peuplements relativement anciens et peu anthropisés, constitués de pin d'Alep pur ou, le plus souvent, d'un mélange pin d'Alep/chênes (vert ou pubescent), la présence de chênes adultes attestant de l'ancienneté de la formation, et le pin d'Alep permettant de mesurer facilement la potentialité forestière de la station. Cette essence étant bien représentée dans tout le domaine, une étude autécologique en a été tirée (voir bibliographie).

Les peuplements devaient par ailleurs être suffisamment ouverts pour avoir une flore abondante et diversifiée puisque le but était de qualifier la station grâce à celle-ci (nombre moyen de plantes par relevé = 46 ±13).

Facteurs descriptifs du milieu utilisés

Les études autécologiques et typologiques antérieures, dont les résultats sont très cohérents, montrent que ce sont toujours les mêmes variables qui expliquent la fertilité ou la croissance d'une essence, même si leur importance relative peut varier d'une étude à l'autre. Le tableau ci-après donne la liste des principaux facteurs du milieu qui ont été relevés dans les placettes.

Les données de l'étude peuvent finalement se résumer ainsi :

315 placettes où les relevés portent sur :
 - la flore caractérisée par 179 plantes dont il faut expliquer la distribution écologique,
 - des variables écologiques abiotiques qui sont les facteurs explicatifs,
 - des variables dendrométriques du pin d'Alep qui constituent des paramètres de croissance et de fertilité qui sont à expliquer.

Élaboration des outils d'évaluation de la potentialité d'un site

Détermination des facteurs explicatifs de la répartition de la flore

Les analyses statistiques des relevés floristiques (analyse factorielle des correspondances – AFC – en particulier) ont montré que, conformément aux études antérieures, le **bilan hydrique** est le facteur le plus puissant expliquant la distribution de la flore en région méditerranéenne. Comme l'illustre la figure 2 p.18, les relevés floristiques se distribuent dans le plan 1-2 de l'AFC selon quatre gradients écologiques (chacun d'eux regroupant plusieurs facteurs de même type dont les modalités vont dans le même sens) :

- climatique (pluie, température, altitude),
- d'exposition, se traduisant par un gradient de température (versants chauds, versants frais),
- topo-édaphique (topographie générale et stationnelle, charge en cailloux et profondeur du sol, etc.), texture du sol qui ressort de manière séparée.

Chacun de ces gradients est clairement relié à une composante du bilan hydrique : soit par la quantité d'eau apportée, évaporée ou transpirée (pluie et température), soit à travers les transferts latéraux au sol, positifs ou négatifs (topographie), soit par les capacités de stockage de l'eau dans le sol (texture, charge en éléments grossiers, profondeur du sol...).

La projection, sur ce plan, de l'indice de fertilité du pin d'Alep (H70) suit plus spécifiquement le gradient topo-édaphique (H70 I étant la meilleure classe).

L'axe 1 de l'AFC est la résultante de ces quatre gradients, et peut être assimilé au bilan hydrique global de la station. Il représente la dimension maximum du nuage de points des plantes et des placettes, donc le facteur qui explique le mieux la composition floristique des relevés.

Calcul de l'indice floristique de bilan hydrique

À un niveau de bilan hydrique correspond donc une végétation potentielle, atteinte dans les forêts anciennes, ayant une composition et une vigueur données. Pour élaborer un indice synthétique représentatif du bilan hydrique de la placette, plusieurs approches ont été testées, dont les résultats se sont avérés concordants. L'indice retenu, le plus simple, consiste à utiliser directement les coordonnées des 315 relevés sur l'axe 1 de l'AFC (le plus intégrateur notamment sur le plan climatique). La position de chaque relevé, projeté sur cet axe, peut s'interpréter comme un indice de bilan hydrique global calculé objectivement à partir de la flore.

Facteurs abiotiques		Facteurs biotiques	
Macro-facteurs	Mésos et micros facteurs	Flore	Dendrométrie
<p>Géographie : altitude, distance à la mer, altitude du masque ¹, exposition du grand versant...</p> <p>Climat : température (moyenne annuelle.) et pluie (totale et d'été)</p>	<p>Topographie : générale et stationnelle</p> <p>Exposition et pente (combinés en IKR)</p> <p>Géologie : roche, pendage, fissuration, stratification</p> <p>Pédologie : horizon, matériau superficiel, texture, profondeur, % cailloux, test tarière hélicoïdale...</p> <p>Anthropiques : degré d'anthropisation (épierrage banquette...)</p>	<p>Notée en abondance dominance (méthode Braun-Blanquet)</p>	<p>Hauteur et âge des pins d'Alep + analyses de tige sur un échantillon restreint de placettes.</p>

¹ Altitude du masque : altitude du relief le plus haut entre un point et la mer, mesurée ici dans plusieurs directions correspondant aux vents dominants apportant sur terre les influences maritimes

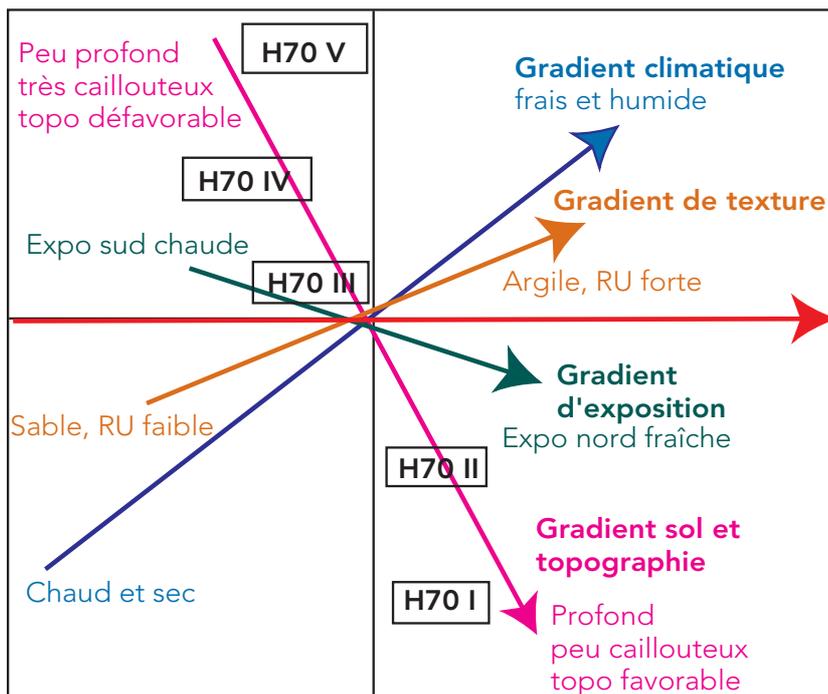


Fig. 2 : plan 1-2 de l'AFC sur la flore des placettes quatre gradients concordants allant :

- de la gauche (niveau le plus chaud ou le plus sec)
- vers la droite (niveau le plus frais ou le plus humide)

L'axe 1 est la résultante des 4 gradients, c'est le bilan hydrique global

Le modèle prédictif du bilan hydrique d'un site

L'indice floristique de bilan hydrique, spécifique de chaque placette, est ensuite utilisé en tant que facteur à expliquer, dans les étapes ultérieures de la démarche. Il a été modélisé avec une combinaison de l'ensemble des variables abiotiques : climatiques, géographiques et topo-édaphiques, en distinguant deux composantes, l'une relative aux caractéristiques régionales du milieu, l'autre aux caractéristiques stationnelles donc locales.

■ **Première composante** : l'indice floristique global, c'est-à-dire le classement des placettes selon le bilan hydrique, est expliqué uniquement à l'aide des facteurs spatialisables à l'échelle régionale. Ce sont les facteurs climatiques et géographiques tels que des macro-facteurs d'ordre régionaux (pluie, température, distance à la mer...), et des méso-facteurs qui ont une signification climatique et qui sont cartographiables par SIG (altitude et IKR). L'IKR, exprimant l'exposition, arrive en tête.

À ce stade, le pourcentage de variance expliqué du modèle est de 60 % ce qui

confirme la pré-éminence des facteurs climatiques dans l'explication de la répartition de la flore forestière. Cette première composante permet de calculer un « indice climatique » et de dessiner à l'échelle régionale une carte des potentialités forestières moyennes.

■ **Deuxième composante** : elle prend en compte les variables qui ne sont observables que sur le terrain, à l'échelle stationnelle. L'apport de ces variables topo-édaphiques pour compléter le modèle et expliquer l'indice global de bilan hydrique n'augmente que de 13 % l'explication de la variance.

En revanche, l'indice de fertilité du pin d'Alep (hauteur à 70 ans), projeté dans le plan 1-2 de l'AFC (voir figure 2), s'aligne principalement sur le gradient topo-édaphique. Les mesures dendrométriques effectuées sur cette essence étaient d'ailleurs destinées à compléter la mesure de la fertilité forestière, les arbres ayant accès à des ressources en eau bien plus profondes que la majorité des petites plantes. L'étude autécologique du pin d'Alep qui a été tirée de ces mesures montre que la croissance

du pin d'Alep est principalement dépendante des facteurs topo-édaphiques.

Ces résultats confirment une idée classique en région méditerranéenne : si le climat explique la répartition de la flore, la topographie et le sol expliquent mieux la vigueur de cette végétation.

Une optimisation de la composante topo-édaphique du modèle, destinée à évaluer la potentialité stationnelle s'est donc appuyée sur l'indice de fertilité du pin d'Alep (hauteur à 70 ans). Le pourcentage de variance expliqué est proche de 80 %.

Présentation des outils d'évaluation de la potentialité forestière

La carte des indices climatiques de bilan hydrique

Elle constitue le premier outil de travail opérationnel (figure 3). Cette carte, obtenue grâce à un SIG (système d'information géographique), illustre la valeur estimée de l'indice de potentialité climatique sur toute la zone d'étude avec une précision de 50 m x 50 m (qui correspond à la précision du modèle numérique de terrain de l'IGN (MNT, voir détail dans l'encadré ci-après).

Calcul de la carte régionale des potentialités forestières

Chaque variable utile au calcul de l'indice climatique est spatialisée à l'échelle régionale à l'aide du SIG :

- 1 – à l'aide du MNT, attribution à chaque pixel d'un indice (IKR) calculé à partir de la pente et de l'exposition, d'une distance à la mer et des altitudes maximales mesurées entre ce pixel et la mer ;
- 2 – attribution à chaque pixel des valeurs climatiques : pluie totale, pluie d'été, températures. Le calcul se fait par interpolation (directe ou après calculs) à chaque pixel, à l'aide de méthodes statistiques optimisées, des valeurs des points du domaine d'étude où ces variables sont connues (stations météo et placettes).

3 – l'altitude de chaque pixel est donnée directement par le MNT.

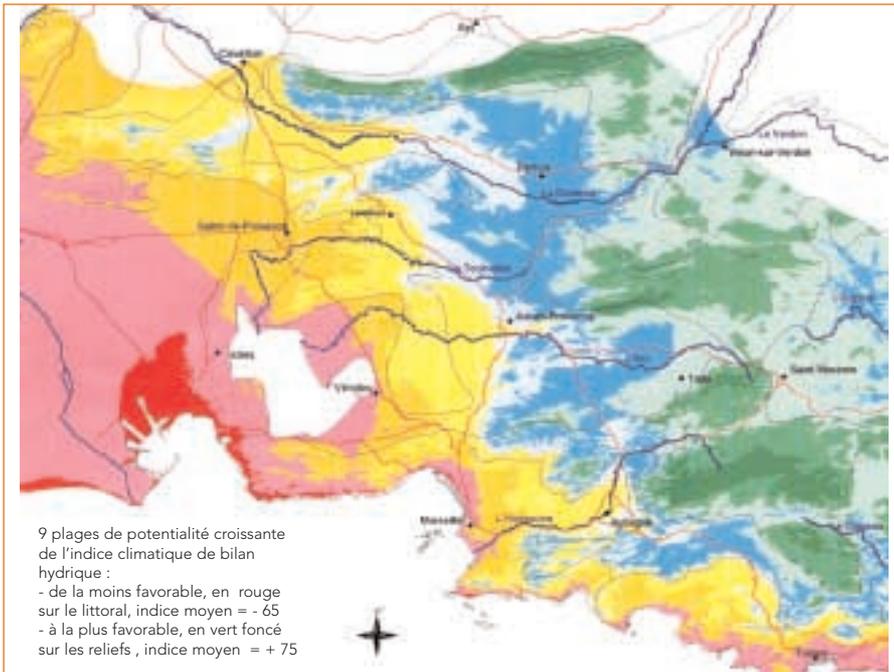


Fig. 3 : carte des indices climatiques de bilan hydrique (échelle régionale)

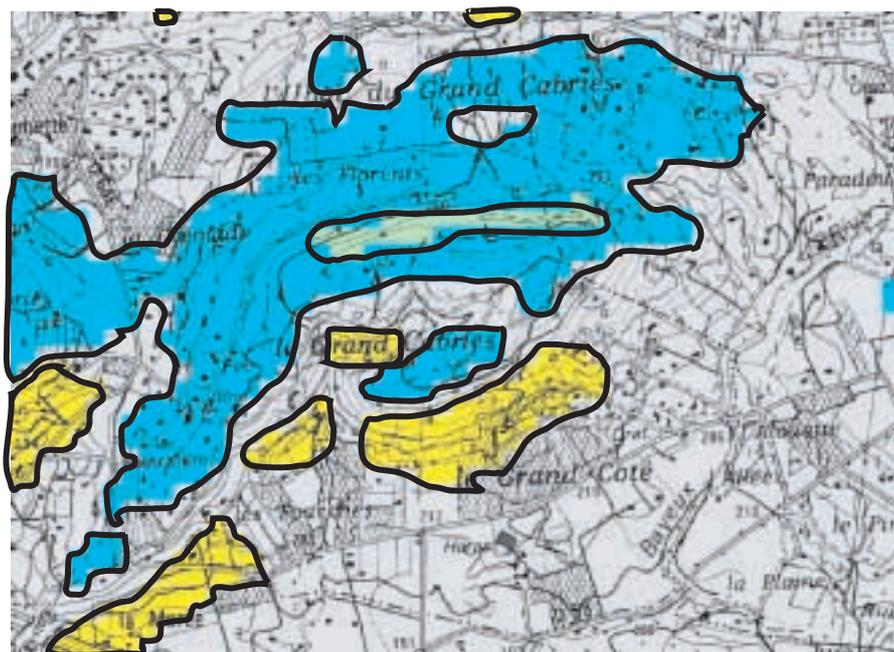


Fig. 4 : zoom à grande échelle de la carte régionale sur fond IGN qui permet :

- de situer le site dans une ou plusieurs classes d'indice climatique
- de corréler chaque plage aux composants du fond topographique (forme du relief, pente, exposition)
- de commencer à structurer le milieu

Tous les pixels de la carte se voient donc attribuer un indice climatique, qui varie en continu de -100 à +100. L'histogramme des valeurs de cet indice présente un profil très irrégulier

à partir duquel ont été déterminées neuf plages distinctes de potentialité croissante se succédant selon un gradient sud-ouest/nord-est, du plus chaud et sec, sur le littoral,

au plus humide et frais, sur les reliefs.

Cette carte peut-être zoomée à différentes échelles jusqu'au 1/10 000^e ou plus (figure 3), sa précision opérationnelle étant de l'ordre de l'hectare. La carte est ainsi adaptée à une utilisation à l'échelle régionale comme à l'étude de parcelles forestières et à l'aménagement de massifs.

Pour obtenir les zooms locaux de la carte régionale, qui permettent l'étude écologique d'un site, il faut disposer d'un logiciel d'information géographique (Arcview, MapInfo, Géo-concept...) qui permet de superposer la carte des indices climatiques et un fond topographique transparent (EDR IGN 1/25 000).

L'exemple de la figure 4 (superposition agrandie au 1/10 000^e) montre qu'il y a plusieurs plages climatiques sur le site étudié. La plus importante correspond au contexte climatique moyen, les deux ou trois autres, d'indices voisins, supérieurs ou inférieurs, reflètent les variations locales d'exposition, d'altitude ou de pente et proposent ainsi une première structuration du site. Celle-ci peut-être affinée :

- éventuellement au bureau avec des données supplémentaires (géologiques par exemple),
- et sur le terrain par la détection de découpes supplémentaires justifiées par la physionomie de la végétation par exemple, révélant des conditions de sol différentes.

L'étape suivante consiste à caractériser les unités écologiques ainsi définies grâce à la clef de détermination de l'indice de bilan hydrique topo-édaphique.

La clef de détermination de l'indice de bilan hydrique topo-édaphique

Elle permet de compléter l'évaluation de la potentialité climatique par une appréciation du bilan hydrique au niveau de l'unité écologique étudiée, grâce à l'observation de paramètres abiotiques sur le terrain (voir figure 5).

		facteurs défavorables				facteurs neutres		facteurs favorables					
TOPOGRAPHIE	topographie générale	sommet croupe	-14	haut de pente	-6	pente	-3	plateau	0	bas pente	10	vallon vallée	18
	topographie stationnelle			convexe	-8			plan	0	concave	8		
	banquettes							absence	0			présence	13
ROCHE	pente du terrain					> 27° ou 50%	-1	< 27° ou 50%	0				
	affleurement rocheux	>= 30%	-8	10 - 30%	-3	1 - 10 %	-1	0	0				
	affleurement de cailloux			> 3 %	3	0 3 %	2	0	0	0	2		
MATÉRIAU	pendage / pente (sur altérité et colluvion < 80 cm)					défavorable	-1	neutre	0	favorable	1		
	Diaclases (sur altérité et colluvion < 80 cm et pendage défavorable ou neutre)					absentes	-2	quelques	0	nombreuses	3		
	matériau de référence	roche	-4	altérité	-2	lapiaz	-1			colluvium	5		
PROFONDEUR	HCl terre					forte	-2	faible	0	nul	3		
	éléments grossiers	>= 90%	-7	60-90%	-3			30-60%	0	< 30%	4		
	plaquettes horizontales			présentes	-6			absentes	0				
	réserve utile / texture**	< = 0.7mm/cm	-10	1 à 1,3	-3			1,35 à 1,6	0	1,7 à 1,95	5	2	10
	épaisseur de colluvion			absent	-2	5-20 cm	-1	25-50 cm	0	> 50 cm	3		
	profondeur totale	0-20 cm	-12	25-45 cm	-5			50-75 cm	0	75-100	5	> 100 cm	10
	tests tarière					0-20 cm	-2	21-40 cm	0	41-75cm	2	> 75 cm	3

indice topo-édaphique	32	← = -		+	-3	+	-6	+	0	+	31	+	10
-----------------------	----	-------	--	---	----	---	----	---	---	---	----	---	----

L'indice de potentialité (bilan hydrique global d'une station) = indice climatique + indice topo-édaphique. Il permet de situer la potentialité d'un site sur une échelle variant de -160 à + 190 et de comparer des stations éloignées très différentes

Fig. 5 : clef de détermination de l'indice de bilan hydrique topo-édaphique stationnel roche

Cette clef se présente sous la forme d'un tableau à double entrée avec :

- en ligne les facteurs à observer sur le site, rangés par rubrique (topographie, roche, matériaux, profondeur),

- en colonne les modalités de ces facteurs variables, rangées du plus défavorable au plus favorable sur l'échelle de l'indice topo-édaphique variant de - 80 à + 80.

Il suffit de cocher pour chaque facteur la modalité observée ou mesurée sur le terrain. On fait ensuite la somme algébrique des notes ainsi obtenues pour déterminer un indice topo-édaphique de l'unité écologique.

L'utilisateur dispose de deux grilles d'évaluation :

- l'une pour les substrats issus de roches dures (système calcaire dur), présentée ci-dessus (figure 5),
- l'autre, pour les roches fluides (systèmes marneux ou assimilés), non présentée ici.

Ces deux grilles sont très similaires, les modalités de variable n'ont pas le même poids dans les deux systèmes et les variables concernant la structure de la roche disparaissent du modèle roche fluide.

La détermination de l'indice topo-édaphique à l'aide de cette grille d'évaluation nécessite bien entendu de faire une ou deux fosses pédologiques par unité écologique ; mais la méthode d'approche qui a permis un découpage de la zone à étudier, permet d'optimiser le nombre de sondages à réaliser et d'en limiter le nombre.

Pour comparer la fertilité de différentes unités, voisines ou réparties sur un plus vaste territoire il suffit d'ajouter les indices, climatique et topo-édaphique, de chacune d'elles pour disposer d'un indice global permettant de les classer et de les comparer.

Mais le forestier qu'il soit aménagiste, gestionnaire ou reboiseur souhaite souvent faire le lien avec des essences.

Il veut savoir celles qui sont adaptées au site et celles qui le sont moins ou pas du tout. Les indices précédents ont donc été croisés avec les données autécologiques disponibles dans le domaine d'étude, pour produire des tableaux de correspondance entre indices de potentialités et productivité des principales espèces forestières méditerranéennes.

Les tableaux de correspondance entre indices de potentialités et productivité des principales espèces forestières méditerranéennes

Les essences concernées sont le pin d'Alep, le cyprès de l'Arizona, le pin pignon, le cyprès vert, le pin Eldarica, le pin Brutia, le chêne vert, le chêne blanc, le cèdre de l'Atlas, le sapin de Grèce. Elles ont toutes fait

l'objet d'une étude autécologique en région méditerranéenne.

Pour chaque essence, un tableau à double entrée donne pour chaque plage de l'indice climatique le comportement de l'essence en fonction des indices topo-édaphiques découpés en 7 classes pour faciliter le maniement de l'outil (voir figure 6).

Pour réaliser ces correspondances, les relevés effectués dans le domaine délimité par la carte climatique ont été repris, pour chaque essence, ce qui a permis de leur attribuer un indice climatique. Un indice topo-édaphique a ensuite été calculé en fonction de leur descriptif écologique. Ces opérations ont permis de mettre en relation les indices de potentialité des stations et les classes de fertilité définies dans leur étude autécologique, et déceler ainsi des seuils dans leur comportement.

Pour conclure

Cette méthode a été présentée et mise à disposition des gestionnaires locaux (ONF et CRPF). Une formation a été dispensée pour chacun des deux organismes qui disposent donc de la carte régionale climatique, des modèles topo-édaphiques et d'un guide d'utilisation destiné à les aider dans la mise en œuvre de leurs applications. Les utilisateurs apprécient la simplicité et la facilité d'utilisation des outils d'une part parce qu'on ne se sert pas de la flore comme critère d'évaluation, mais de paramètres objectifs, d'autre part parce qu'ils permettent de disposer d'une échelle de mesure de la potentialité forestière simple et homogène sur un vaste domaine.

Cette méthode ne définit pas des types de station mais des niveaux de fertilité ou plus exactement des niveaux de bilan hydrique et fait pra-

tiquement abstraction des problèmes trophiques. La raison vient de ce qu'en région méditerranéenne, le climat comporte une saison sèche estivale qui fait du besoin en eau la contrainte majeure pour la végétation, que l'on soit sur terrain calcaire ou acide d'ailleurs (Ladier J., Ripert C., 1996).

Pour la végétation forestière cette contrainte est particulièrement forte car les surfaces qu'elle occupe sont cantonnées sur les reliefs ou les zones délaissées par l'agriculture, et sont en général dotées de substrats à faibles réserves hydriques car superficiels, trop caillouteux ou rocheux quand ils ne sont pas, en plus, très pentus. Les problèmes trophiques sont donc secondaires mais ils existent ; la distinction entre roches dures et marnes, dans le modèle topo-édaphique, repose en partie sur un problème d'ordre chimique. Le bilan trophique n'est donc

indice Climatique			Cèdre	Indice topo-édaphique							conditions							
moy	min	max		-80	extrêmes	-50	défavorables	-30	défavorables	-10	moyennes	10	favorables	30	favorables	50	exceptionnelles	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95		-75		-55		-35		-15		30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73		-53		-33		-13		7		44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79		-59		-39		-19		1		21		58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64		-44		-24		-4		16		36		75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50		-30		-10		10		30		50		85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37		-17		3		23		43		63		102
30	22	à 38	p.verte clair	-58		-20		0		20		40		60		80		118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1		19		39		59		79		99		140
75	60	à 110	verte foncé	-20		25		45		65		85		105		125		190

indice Climatique			Cyprés vert	Indice topo-édaphique							conditions							
moy	min	max		-80	extrêmes	-50	défavorables	-30	défavorables	-10	moyennes	10	favorables	30	favorables	50	exceptionnelles	80
-65	-80	à 50	plage rouge	-160		-115		-95		-75		-55		-35		-15		30
-43	-50	à 36	plage rose	-130		-93		-73		-53		-33		-13		7		44
-29	-36	à 22	plage orange	-116		-79		-59		-39		-19		1		21		58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64		-44		-24		-4		16		36		75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50		-30		-10		10		30		50		85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37		-17		3		23		43		63		102
30	22	à 38	p.verte clair	-58		-20		0		20		40		60		80		118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1		19		39		59		79		99		140
75	60	à 10	verte foncé	-20		25		45		65		85		105		125		190

Fig. 6 : tableau de correspondance entre indices de potentialité et productivité des 10 principales essences forestières méditerranéennes. Exemple du cèdre et du cyprès vert :

un tableau, à double entrée, pour chaque essence (indice ou plage climatique x indice topo-édaphique) donne l'adaptabilité de chaque espèce en fonction des classes d'indice de potentialité, selon la nomenclature suivante :

- classe 1 (bleu) les conditions de milieu correspondent très bien ou bien aux exigences de l'essence,
- classe 2 (vert) les conditions de milieu correspondent assez bien aux exigences de l'essence,
- classe 3 (jaune) quelques facteurs écologiques limitants induisent une adaptabilité difficile de l'essence,
- classe 4 (blanc) de nombreux facteurs limitants induisent une adaptabilité très difficile, ou excluent l'essence

pas totalement occulté mais peut-être pas suffisamment analysé. Dans le projet d'extension de la méthode aux zones voisines, il est envisagé de mieux tenir compte de cet aspect.

Cette méthode a été développée sur une région qui manque de catalogues de stations forestières, mais où il n'est pas nécessaire de disposer d'outils extrêmement précis dans ce domaine. Elle représente une alternative avantageuse pour combler ce vide et pourrait être étendue à un ensemble plus vaste de la région méditerranéenne dans les étages bioclimatiques du méso et supra méditerranéen (hors zone à climat montagnard où la méthode ne serait pas facilement applicable).

Christian RIPERT
Michel VENNETIER

Cemagref, unité de recherche écologie méditerranéenne et risque
Aix-en-Provence
christian.ripert@aix.cemagref.fr
michel.vennetier@aix.cemagref.fr

Remerciements à Jean Ladier (ONF, Manosque) pour sa relecture.

Bibliographie

VENNETIER M., RIPERT C., 1996. Typologie des stations forestières sur de grandes surfaces en Provence calcaire : préétude. Aix en Provence : Cemagref. 21 p.

Catalogues des stations forestières

LADIER J., BOISSEAU B., 1994. Typologie des stations forestières de la Montagne Sainte-Victoire. Antony : Cemagref. 279 p.

LADIER J., RIPERT C., 1996. Les stations forestières de la Provence cristalline (cap Sicié, îles d'Hyères, Maures, Tanneron). Aix-en-Provence : Cemagref. 107 p.

NOUALS D., JAPPIOT M., 1996. Les stations forestières des plateaux et monts de Vaucluse et des versants sud des montagnes de Lure et du Ventoux. Aix en Provence : Cemagref, ONF. 192 p.

REGAD J., 1994. Catalogue des stations forestières de la forêt communale de Murs en Vaucluse. Aix en Provence : Cemagref. 78 p.

VARESE P., 1997. Catalogue des stations forestières des pays du Lubéron. Apt : Parc naturel régional du Lubéron. 260 p.

Études autécologiques réalisées par le Cemagref

BOUVET J.-Y., 1983. Le cyprès vert « *Cupressus sempervirens* » en zone méditerranéenne française : étude écologique et perspectives d'utilisation. Aix en Provence : Cemagref. 137 p. Mémoire de 3^e année Enitef

COLOMBET M., 1988. Écologie des sapins méditerranéens en Provence et Languedoc. Aix en Provence : Cemagref. 99 p. Mémoire de 3^e année Enitef

COMMERÇON R., 1988. Comportement du pin laricio en région méditerranéenne française. Aix en Provence : Cemagref. 107 p. Mémoire de 3^e année Enitef

D'EPENOUX F., 1992. Relation milieu production : application au pin noir d'Autriche dans les Alpes externes méridionales. Aix en Provence : Cemagref. 226 p. Thèse de doctorat en biologie

DUCHÉ Y., 1983. Établissement de classes de croissance des peuplements de chêne pubescent en Provence : analyse de leurs facteurs explicatifs. Aix en Provence : Cemagref. 180 p. Mémoire de 3^e année Enitef

LABADIE J., 1983. Étude des exigences écologiques du pin pignon en région méditerranéenne française. Aix en Provence : Cemagref. 106 p. Mémoire de 3^e année Enitef

NOUALS D., 1991. Choix des essences en région méditerranéenne française : les pins brutia et eldarica. Aix en Provence : Cemagref. 16 p.

RICHARD P., 1987. Étude des facteurs explicatifs de la croissance du chêne-liège dans le Var. Aix en Provence : Cemagref. 86 p.

RIPERT C., BOISSEAU B., 1993. Écologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence. Aix-en-Provence : Cemagref. 107 p.

RIPERT C., VENNETIER M., 2001. Écologie et croissance du pin d'Alep en France. Aix en Provence : Cemagref. 38 p.

TANGHE C., 1991. Écologie et croissance du pin de Salzman en France. Aix en Provence : Cemagref. 124 p. Mémoire de 3^e année Enitef

Étude présentée dans cet article

VENNETIER M., RIPERT C., MAILLÉ E., 2001. Étude des potentialités forestières de la Provence Calcaire Ouest : évaluation à petite échelle sur de grandes surfaces. Aix-en-Provence : Cemagref

Dossier



Conséquences des tassements du sol dus à l'exploitation forestière

Après avoir présenté de façon approfondie les conséquences des dégradations des sols soumis à des contraintes physiques, sur leur fonctionnement, sur les essences en place et les régénérations, et sur les écosystèmes, ce dossier explique en outre les facteurs de sensibilité des sols ou liés à l'exploitation elle-même qu'il faut prendre en compte pour prévenir des dommages parfois irréversibles

- p. 24 Pour une gestion respectueuse des sols - par Alain Brêthes et François Charnet
 - p. 27 Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème - par Jacques Ranger, Matthieu Lamandé et Yves Lefèvre
- p. 36 Récolte des bois et respect du sol : un dialogue à développer entre les acteurs par Emmanuel Cacot et Didier Pischedda
 - p. 44 Régénération naturelle du hêtre en forêt de Soignes : impact de la compaction des sols - par Stéphane Loyen
- p. 48 Les cloisonnements d'exploitation : pourquoi et comment les protéger ? par Claudine Richter et Philippe-Éric Durand
 - p. 50 La protection des sols : sensibilisation et études en forêt privée par François Charnet

Pour une gestion respectueuse des sols

Les forestiers n'ont pas attendu les effets de la tempête de décembre 1999 pour s'inquiéter des dégâts qu'occasionne en forêt la mécanisation de l'ensemble des travaux. Déjà, un tel constat avait pu être formulé il y a bien longtemps, lors du remplacement du cheval par le tracteur pour la réalisation de ces travaux. Toutefois, ces inconvénients étaient jugés accessoires, et les gestionnaires s'en sont longtemps accommodés. Pourtant, dès 1991, le Département de la santé des forêts (Ministère de l'Agriculture et de la forêt), à la suite de nombreux travaux français et étrangers et d'observations régionales, soulignait le rôle du compactage des sols limoneux dans le dépérissement de la hêtraie.

Les tempêtes de ces dernières années et les impératifs d'exploitation et de débardage nécessités par la limitation de la dépréciation des bois ont conduit les gestionnaires à s'intéresser de plus près aux caractères physiques des sols, et plus particulièrement au compactage et à ses conséquences.

En parallèle à cette émergence chez les gestionnaires, un mouvement politique général, engagé à la suite de la Conférence de Rio (1992), a cherché à promouvoir des modèles de gestion forestière durable, c'est-à-dire « *une gestion susceptible de fournir à nos contemporains les biens et les services qu'ils attendent de la forêt, sans remettre en cause la possibilité, pour les générations futures, de faire de même* ». Ainsi, ont été progressivement mis à l'ordre du jour des thèmes comme la protection des sols. Cette préoccupation est égale-

ment incluse dans les réflexions de l'Union européenne sur la gestion conservatoire des sols (une directive européenne sur les sols est en cours d'élaboration).

La protection du capital sol est apparue comme un facteur important pour l'attribution des différents labels de qualité. Ainsi les critères de protection des sols, en particulier face au risque de tassement lors des travaux forestiers, ont été inscrits dans les procédures ISO 9 000 et ISO 14 001 ainsi que dans certaines chartes PEFC (chartes de la région Centre, par exemple), malgré la difficulté de trouver des indicateurs de terrain éprouvés et maniables.

Lors de la conférence ministérielle d'Helsinki (1993), les gouvernements européens ont retenu six critères pour définir cette gestion durable :

- maintien des capacités de production,
- maintien de bon état sanitaire, satisfaction de la fonction de production,
- respect de la biodiversité,
- protection des sols et des eaux,
- fourniture des diverses « aménités » (accueil, qualité de paysage, etc.).

On se doit cependant de constater que sous la rubrique « protection des sols et des eaux », la protection des eaux est largement et plus anciennement reconnue, et que la « protection des sols », *sensu stricto*, recouvre surtout, de fait, les problèmes d'érosion, qui sont documentés de plus longue date. Les débats entre spécialistes du symposium sur les sols tenu à Bordeaux en 2004 ont par ailleurs montré que le concept de gestion durable des sols est loin d'être clair, et demande singulière-



Un exemple à ne pas suivre

Afocel

Un effort collectif pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt

L'ONF et le Centre technique du bois et de l'ameublement (CTBA) ont conçu un programme intitulé « Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt » avec le soutien et le cofinancement du MAAPR¹. Un comité de pilotage composé de l'INRA², du CTBA³, de l'IDF⁴, de l'Afocel⁵, du DSF⁶, du GIP-ÉCOFOR, de la FNB⁷, du MAAPR, de la FNCOFOR⁸, des exploitants et entrepreneurs de travaux forestiers alsaciens (GSETFA) et de l'ONF discute puis valide les orientations pour la mise en œuvre du programme (2004-2006) qui comprend trois modules.

Module 1 – Effets de l'exploitation forestière sur la qualité des sols

L'objectif est d'établir un bilan des études scientifiques et techniques qui existent à l'échelle internationale sur les conséquences physiques, chimiques et biologiques des impacts au sol occasionnés par les engins forestiers. Ce module a été réalisé en 2004 par l'INRA Nancy (Unité biogéochimie des écosystèmes forestiers dirigée par Jacques Ranger) avec un cofinancement du MAAPR, de l'ONF et de l'INRA. L'étude a été publiée dans son intégralité dans les « dossiers forestiers » n° 15 de janvier 2005 (voir ci-contre) et a fait l'objet d'une large diffusion. Les principales conclusions sont données dans l'article de Jacques Ranger (page 27).

Pilotage : ONF.

Module 2 – Chantiers de démonstration

L'objectif est de montrer aux professionnels (ETF, exploitants forestiers, gestionnaires et propriétaires forestiers, services de l'État, décideurs) des techniques d'exploitation rarement pratiquées en France dont les performances en matière de protection des sols et de la forêt sont connues, maîtrisées à l'étranger et viables sur le plan économique. Quatre chantiers grandeur nature répartis dans l'hexagone sont prévus, deux ont déjà été réalisés : l'un avec le « cheval de fer » en forêt domaniale de Perche-Trappe (Normandie) et l'autre avec le « câble-mât » en forêt domaniale de Mormal (Nord).

Pilotage : CTBA (Didier Pishedda assisté de Michel Bartoli de l'ONF).

Module 3 – Kit de vulgarisation

À l'issue des modules 1 et 2, il est prévu :

- la publication d'un document synthétique de vulgarisation par le CTBA, l'ONF, l'Afocel et l'IDF sur les techniques d'exploitation respectueuses des sols, dont la mise en place et le respect des cloisonnements d'exploitation (Pilotage : ONF) ;
- la production d'un film pédagogique sur le même thème notamment réalisé sur les chantiers de démonstration du module 2 (Pilotage : CTBA).

Cette « boîte à outils » sera cofinancée par l'ensemble des parties prenantes et le MAAPR, la diffusion prévue est large : centres de formation, organisations professionnelles, ONF, forêt privée, services de l'État...

Frédéric MORTIER

ONF, direction technique
responsable du programme

ment à être affiné. Dans ces conditions, un dossier rassemblant des données sur le « tassement » n'en prend que plus d'intérêt.

Sans vouloir apporter des solutions à tous les problèmes liés au tassement des sols, ce dossier aborde différents aspects de cette problématique.

Le tassement des sols, la destruction de la structure et la perte de porosité qui s'ensuivent sont fortement préjudiciables aux arbres en place qui verront leur système racinaire soumis à des conditions de vie difficiles, et aux semis qui auront du mal à s'installer dans de tels milieux. Les conséquences directes de ce tassement sont développées dans l'article de J. Ranger *et al.* (page 27) résumant l'étude bibliographique menée par Mathieu Lamandé *et al.* en 2004. Un cas concret de dépérissement de la hêtraie et du mauvais développement des semis relevé en forêt de Soignes (Belgique) est présenté par S. Loyen (page 44).

On conçoit donc qu'il soit indispensable de bien raisonner les travaux forestiers pour limiter tous ces risques et ceci souvent jusque dans le détail. Ce raisonnement doit porter :

- sur la période d'intervention (une étude est en cours pour essayer de produire des outils de prévision des teneurs en eau, nécessaire à la planification des interventions) ;
- sur le choix des matériels (y compris les pneus), en sachant que l'équipement ancien des entreprises est souvent un facteur limitant ;
- sur la nécessité et l'implantation de cloisonnements d'exploitation ;
- enfin sur le choix de la méthode d'exploitation.

E. Cacot et D. Pishedda développent dans leur article (page 36), et de manière très concrète, les relations existant entre matériel d'exploitation et caractères du sol, et les moyens de prévention et de remédiation qui peuvent être envisagés. Dans ce même esprit, C. Richter et Ph.-E. Durand (page 48) proposent une

¹ ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité

² Institut national de la recherche agronomique

³ Centre technique du bois et de l'ameublement

⁴ Institut pour le développement forestier

⁵ Association forêt-cellulose

⁶ Département de la santé des forêts

⁷ Fédération nationale du bois

⁸ Fédération nationale des communes forestières



Afocef

Les tracks permettent de diminuer la pression au sol

méthode de protection des cloisonnements par utilisation des rémanents d'exploitation.

Si on considère qu'en général, les dégâts au sol sont proportionnels au poids de la machine et donc à la pression exercée au sol même si les adaptations de la taille des pneus ou l'installation de chenilles tendent à minimiser ces impacts, nul n'est besoin de faire passer un rouleau compresseur sur le sol pour obtenir un effet conséquent. Le passage répétitif des machines d'exploitation forestières est souvent suffisant, et l'essentiel des dégâts s'observe généralement dès les premiers passages, ce qui donne une importance particulière à l'organisation des parcours dans la parcelle. Un dossier, à paraître l'année prochaine, sera consacré à l'organisation des chantiers d'exploitation.

De toutes ces études, il ressort que les sols ayant subi de graves atteintes mettront souvent des décennies à s'en remettre, sachant que bien souvent l'exploitation suivante arrivera avant que le sol se soit « refait » et que la remise en état par travail du sol est à la fois difficile

et souvent peu efficace. C'est pourquoi la prévention est primordiale. En effet, la protection des sols dépend certes des caractéristiques des machines utilisées mais aussi des hommes. Une machine parfaitement adaptée à un milieu donné peut donner les pires résultats si elle est utilisée en dehors de ces conditions optimales. La formation et la sensibilisation des forestiers comme des exploitants sont primordiales (Rotaru, 1985, Schaffer, 2004). F. Charnet (page 50) présente les démarches engagées en forêt privée par l'Institut pour le développement forestier (IDF), les centres régionaux de la propriété forestière (CRPF) et d'autres pour sensibiliser les gestionnaires à la fragilité des sols et vulgariser les « bonnes » pratiques de gestion durable et la prévention.

En conclusion, rappelons que la sensibilité des sols au tassement ou, inversement, la « portance » du sol, dépend de nombreux facteurs comme la texture du matériau, sa charge en éléments grossiers, sa teneur en matière organique, son humidité, etc. Ainsi, un sol limoneux sera plus fragile qu'un sol à forte charge en éléments grossiers et ce

d'autant plus qu'il sera saturé d'eau. Jabiol *et al.* (2000) ont publié une clé de classement de ces caractères à laquelle le gestionnaire pourra se référer en attendant la publication d'autres variables de jugement.

Alain BRÊTHES

ONF, DT Centre-Ouest
Boigny-sur-Bionne
alain.brethes@onf.fr

François CHARNET

Institut pour le développement
forestier
Orléans
fcharnet@association-idf.com

Bibliographie

JABIOL B., RANGER J., RICHTER C., 2000. Sol sensible ou résistant ? Éléments simples de diagnostic de la sensibilité à la dégradation chimique ou physique. La Forêt privée, n° 253, pp 30-46

ROTARU C, 1985. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. Revue forestière française, XXXVII-5, pp. 359-370

SCHAFFER H.P., 2004. Les arbres ne doivent pas cacher le sol. Revue Environnement, OFEFP-CH, n°2-2004, pp 30-36

Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème

Présentant la synthèse des connaissances issues d'une étude bibliographique approfondie, les auteurs cherchent à mieux connaître les propriétés des sols qui les prédisposeraient à la dégradation physique, et à évaluer les conséquences des déformations subies par les sols sur les différentes fonctions des écosystèmes.

Le sol est un milieu vivant qui évolue constamment pour atteindre un équilibre avec les caractéristiques de l'environnement. La dynamique naturelle est cependant lente puisque les modifications naturelles du milieu sont en moyenne lentes, ce qui a parfois laissé croire que le sol était peu susceptible d'évoluer. L'homme peut modifier brutalement les équilibres naturels par ses pratiques culturales. La réponse du sol est alors rapide, mais les modifications apparentes qui en résultent varient selon ses caractéristiques.

À l'échelle humaine, le sol est une ressource peu, voire non renouvelable pour tout ou partie de ses caractéristiques ; la perte de matière par érosion physique ou chimique du sol est irréversible.

En système de gestion extensive qui domine pour la forêt française, le sol est donc avant tout une ressource à protéger car par définition, la remédiation (procédés qui visent à la restauration de la qualité du sol dans toutes ses composantes, physique, chimique et biologique) n'est généralement pas pratiquée pour des raisons de coût, et rarement prévue dans les itinéraires sylvicoles. Cette protection intéresse le maintien de toutes les fonctions du sol : la capacité à produire, les fonctions écologiques (biodiversité, paysage) et les fonctions environnementales (qualité de l'air et de l'eau).

L'évolution de la composante chimique de la fertilité des sols forestiers a fait l'objet de nombreuses études (voir

Le contexte des sols forestiers justifie la plus grande attention. Leur histoire indique qu'ils ont été sollicités parfois très intensivement pour le bois énergie, qu'ils ont servi de source de fertilité pour les sols cultivés, et qu'ils n'ont jamais été enrichis artificiellement sauf pour les sols forestiers issus de déprises agricoles. Ceci explique leurs caractéristiques actuelles : en moyenne, ils sont pauvres chimiquement, souvent acides voire très acides et désaturés, ou à l'opposé très carbonatés (Badeau *et al.*, 1999).

L'ensemble des processus de mise à disposition – consommation – recyclage des éléments par les plantes, connu sous le vocable de cycle biologique, conduit à une remarquable performance de l'écosystème. La production est réalisée à partir d'un volant limité d'éléments, rapidement recyclés. La fertilité chimique d'un sol forestier est de ce fait vulnérable. Les différents facteurs de la fertilité physique, chimique et biologique, étant très largement connectés, cet équilibre fragile peut rapidement être dégradé par des pratiques sylvicoles mal adaptées : andainage, brûlage, récolte des rémanents, tassement, dont les conséquences seront d'autant plus marquées que le sol sera pauvre.

encadré), mais ce n'est pas le cas de la composante physique. Les connaissances actuelles analysées à partir de la bibliographie (Lamandé *et al.*, 2005) sont résumées dans cet article.

Les principales questions posées sont les suivantes : quelles sont les propriétés des sols qui prédisposent à la dégradation physique ? Quelles sont les conséquences pour les différentes fonctions de l'écosystème ?

Le constat

La mécanisation des pratiques sylvicoles conduit à l'entrée de plus en plus fréquente en forêt de matériels lourds, potentiellement capables de réaliser « toute opération en toute condition ». Le développement de la mécanisation fait l'objet de nombreuses interroga-

tions quant à la durabilité de la qualité des sols forestiers.

Deux éléments doivent être mis en relation : la contrainte appliquée par les machines et la résistance du sol. La réponse se traduit par une déformation (voir encadré repères p. 29) plus ou moins importante et durable qui dépend des engins et de leur utilisation (puissance, vitesse de déplacement, type de pneumatiques, parcours, nombre de passages) ainsi que du milieu (relief, propriétés du sol, état d'humidité, capacité de restauration). Les types de modifications du sol que peut entraîner la mécanisation du débardage des produits forestiers ont été identifiés depuis plusieurs décennies (Garrison et Rummel, 1951).

Les photos page suivante illustrent les dégâts visibles fréquemment rencontrés localement. Les contraintes appli-



Orniérage, stagnation de l'eau, développement du jonc (Forêt domaniale de Perche -Trappe, 61)



Circulation d'un porteur dans un cloisonnement sur sol en pente (Forêt communale de Taintrux, 88)

fortement (remaniement des horizons organo-minéraux) et que les ornières représentaient 0,2 % de la surface.

La figure 1 empruntée à Cacot et al. (2001) rapporte une carte établie après une éclaircie réalisée par un porteur et un débusqueur dans une futaie régulière de chêne. La surface totale sur laquelle les deux engins se sont déplacés, en dehors des cloisonnements existants, représente 48 % de la parcelle.

Les types de perturbations et leur étendue dépendent fortement des techniques utilisées mais encore plus directement de l'état du sol au moment des opérations, en particulier de son humidité (voir encadré repère ci-contre).

Les éléments importants à prendre en compte

Les constituants du sol, leur nature et leur organisation, jouent chacun un rôle

Le sol possède des caractéristiques physiques propres qui déterminent sa capacité à résister ou à se déformer suite aux contraintes exercées entre autres par les engins réalisant les travaux forestiers. Toute déformation a des conséquences sur les propriétés du sol qui va cependant recouvrer tout ou partie de son comportement initial, après une durée dépendant elle-même de ses caractéristiques (voir figure 2). Le paramètre physique qui intègre totalement les caractéristiques du sol et sa capacité à résister à une contrain-



Orniérage dans la ligne de coupe sur sol brun calcique (Forêt communale de Gondreville, 54)



Orniérage et tassement de sols sur grès (Forêt communale de Voivre, 88)

quées et la distribution spatiale des perturbations doivent être quantifiées. Ces données permettent de caractériser l'impact en termes de parcours, de nombre de passages, de surface concernée, et d'intensité des déformations. Par exemple, McMahon et al. (1999) ont suivi la progression des engins de coupe et de débardage pendant un chantier de cinq semaines sur une parcelle de 20 ha. Les engins ont roulé sur les deux tiers de la surface et sont passés au moins 20 fois sur 20 % de la zone. Les observations visuelles des perturbations ont révélé que 87 % de la surface était perturbée, dont 6 %

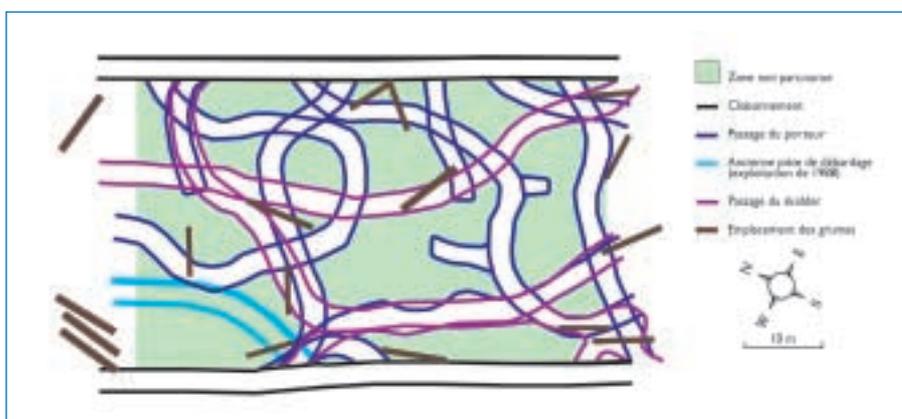


Fig. 1 : carte établie après une éclaircie réalisée par un porteur et un débusqueur dans une futaie régulière de chêne. La surface totale cheminée par les deux engins, en dehors des cloisonnements existants, représente près de la moitié de la parcelle (d'après Cacot, 2001)

te sans déformation irréversible est sa **résistance** (ou compressibilité du matériau en mécanique), qui dépend de nombreux facteurs :

- **la nature des constituants du sol** :
 - la granulométrie totale incluant les éléments grossiers, sables, graviers ou cailloux [plus les particules sont fines moins le matériau est résistant ; de plus, les éléments grossiers renforcent la résistance du sol par un effet armature tel un squelette],
 - la minéralogie des argiles [plus les argiles sont chargées électriquement, plus leur rôle dans l'agrégation du sol est important],
 - les matières organiques et les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium [ces constituants sont des ciments qui lient entre elle les particules grossières];
- **l'organisation de ces constituants dans l'espace** :
 - le degré de cimentation des particules (qui caractérise l'état d'agrégation du sol donc sa structure et sa porosité ; plus un sol est agrégé, mieux il résiste à une contrainte),
 - l'homogénéité verticale et latérale du profil de sol (qui conduit à des discontinuités influençant la transmission des contraintes (Musy et Soutter, 1991)).

L'humidité du sol est un élément majeur de sa résistance

Un facteur essentiel de la résistance du sol est sa dépendance avec la teneur en



Dépêres

Une typologie des déformations du sol conduit habituellement à les classer en trois catégories principales :

- **le scalpage** correspond à un déplacement et souvent un mélange de matériaux suite à des contraintes appliquées majoritairement selon une direction tangentielle à la surface du sol (patinage des roues ou des chenilles, glissement latéral ou dérapage). En termes de mécanique du sol, ce processus est appelé *cisaillement* ;
- **l'orniérage** est un creusement à la surface du sol ; le matériau déplacé peut alors former des bourrelets. C'est un phénomène où les contraintes sont à la fois tangentielles et perpendiculaires à la surface du sol. Il en résulte un déplacement et souvent un mélange de matériaux ainsi qu'un tassement de l'horizon sur lequel repose la roue. L'orniérage est donc la somme de trois processus : le *cisaillement*, le *fluage* qui donne naissance aux bourrelets latéraux de part et d'autre de la surface de contact et le *tassement* en fond d'ornière ;
- **le compactage** est un tassement « excessif » du sol qui correspond à une réduction de volume sans changement de masse : c'est donc la porosité qui est réduite. Le compactage, souvent utilisé comme terme général équivalent au tassement, est un terme de mécanique du sol qui se rapporte à un tassement du sol par application d'une contrainte perpendiculaire à la surface, jusqu'à obtenir une résistance du sol donnée. Le compactage peut se rapporter au processus et le tassement à sa résultante sur l'état du sol. Le point à partir duquel le tassement devient irréversible est nommé point de préconsolidation. Il est caractéristique du matériau et de son histoire, et donc du comportement du sol face à la contrainte.

Ces trois types de déformations correspondent à des réponses différentes, dépendantes de la contrainte appliquée, de l'humidité du sol lors de son application et des propriétés physiques des différents horizons concernés.

eau et le potentiel de l'eau du sol (déterminant l'intensité de la liaison eau - particules). La résistance diminue avec

la teneur en eau par effet lubrifiant : un matériau meuble comme le sol passe de l'état rigide aux faibles teneurs en

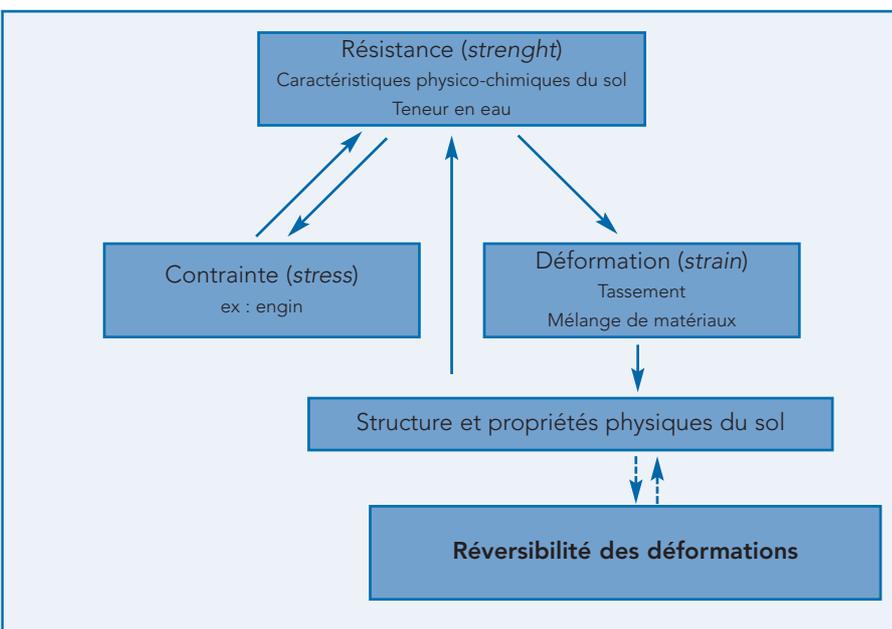


Fig. 2 : relations entre contrainte appliquée, résistance du sol et déformation engendrée. En fonction des contraintes appliquées, la résistance du sol conditionne la déformation engendrée donc les modifications des propriétés physiques. Les modifications des propriétés physiques entraînent un changement de résistance du sol, et par là même la relation entre la résistance et la contrainte. Les déformations physiques sont pour partie réversibles avec le temps ; leur retour vers l'état initial avant la contrainte se répercute sur la résistance du sol

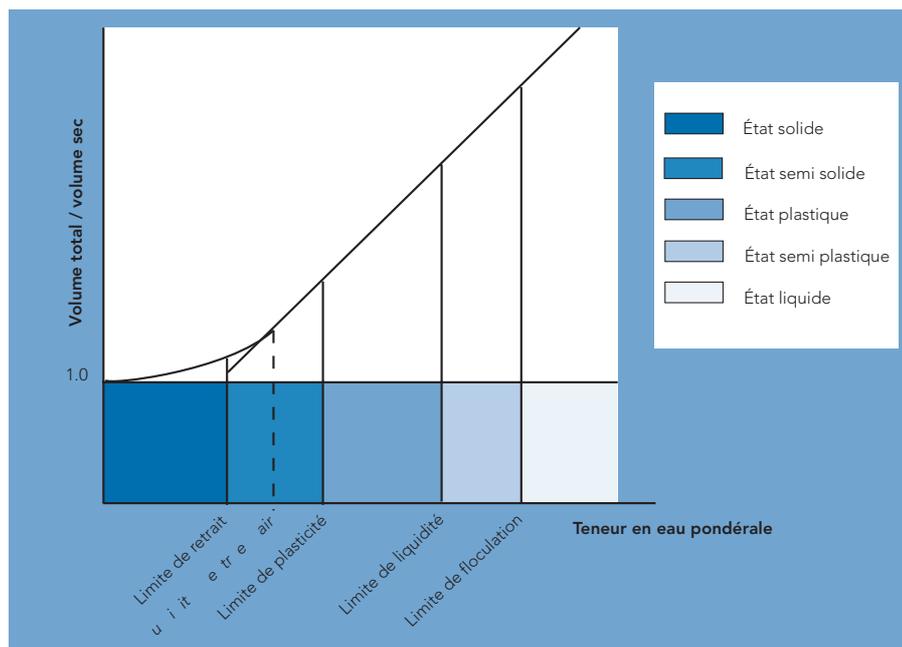


Fig. 3 : évolution de l'état du sol en fonction de l'humidité. Les limites de consistance dites d'Atterberg décrivent les seuils caractéristiques (d'après Musy et Soutter, 1991) :

- limite de floculation : au-delà du seuil, les particules de sol totalement dispersées dans l'eau ont tendance à former des agrégats secondaires en raison de leur charge (cas des matériaux argileux),
- limite de liquidité : au-delà du seuil, le sol s'écoule sous son propre poids comme un liquide,
- limite de plasticité : au-delà du seuil, la déformation du sol nécessite une contrainte, la déformation se fait sans rupture car l'humidité est suffisante pour lubrifier les grains,
- limite de retrait : consistance semi-solide et solide sont séparées par la limite de retrait à partir de laquelle la dessiccation ne s'accompagne plus d'une diminution proportionnelle de volume puisque l'air remplace l'eau.

eau à l'état plastique voire liquide quand la teneur en eau augmente (voir figure 3). La résistance d'un sol non saturé est très sensible aux changements de teneur en eau. La détermination d'un potentiel limite à partir duquel les conséquences de l'application d'une contrainte sur le fonctionnement du sol seraient négligeables est un enjeu important (sur un plan pratique, il permettrait par exemple de déterminer quand rentrer dans une parcelle) ; mais le caractère général d'un tel potentiel limite est peu réaliste car la teneur en eau d'un sol dépend de ses propriétés. Selon les caractéristiques du sol, une même teneur en eau ne conduit pas à la même résistance. En général, la résistance du sol augmente lorsque la teneur en eau diminue ; plus la granulométrie est fine plus ce phéno-

mène est accentué. Par exemple, à environ 15 % d'humidité pondérale, une argile sera sèche (environ au point de flétrissement permanent), alors que le sable sera humide (environ à la capacité au champ) : l'argile sera alors plus résistante que le sable.

La mesure de la résistance d'un sol est réalisable comme pour tout matériau en laboratoire, mais devient beaucoup plus problématique au champ compte tenu de la présence et de la disposition de racines, de cailloux et de cavités, du caractère hétérogène du sol et de l'humidité, très variable en fonction du temps et de l'espace. Compte tenu de la complexité de sa mesure in situ, la résistance du sol est alors souvent appréciée indirectement par des mesures de déformations, à partir par

exemple de la densité apparente. Ces deux paramètres ne sont cependant pas équivalents.

Qu'entend-on par contraintes et déformation pour un sol ?

Les **contraintes** sont d'origine naturelle ou anthropique.

■ Les contraintes naturelles correspondent à la force exercée par la masse des peuplements et par le bras de levier que constitue l'arbre résistant au vent. Les arbres eux-mêmes jouent un rôle sur le tassement du sol en profondeur.

■ Les contraintes anthropiques directes dépendent des engins et de leurs conditions d'utilisation pour réaliser les travaux forestiers. Elles se traduisent directement par les déformations décrites précédemment (scalpage, orniérage, tassement de surface et en profondeur).

■ Les contraintes anthropiques indirectes correspondent à toute pratique tendant à diminuer la stabilité de la structure du sol (dégradation de l'activité biologique, désaturation et acidification des sols). Ces contraintes jouent sur la sensibilité du sol à la déformation.

Les contraintes physiques issues des engins forestiers ont des composantes verticale (masse des engins répartie par essieu et par roue), tangentielle (efforts tangents dus à l'entraînement et au déplacement des roues motrices), et vibratoire (fonctionnement du moteur). La contrainte dépend de la masse des engins, de sa répartition et de la surface de contact avec le sol : plus cette surface est grande, plus le volume de sol concerné est important, mais moins la contrainte unitaire est forte (voir figure 4). Pour plus de précisions voir l'article de E. Cacot et D. Pishedda p. 36.

Les **déformations du sol** résultant de l'application d'une contrainte correspondent à une modification plus ou moins importante de l'organisation spatiale des particules et par conséquent de la porosité du sol. Le comportement du sol dépend de son taux d'humidité (Koolen, 1994). La déformation est dite élastique si les structures retournent à leur état initial après arrêt de l'application de la

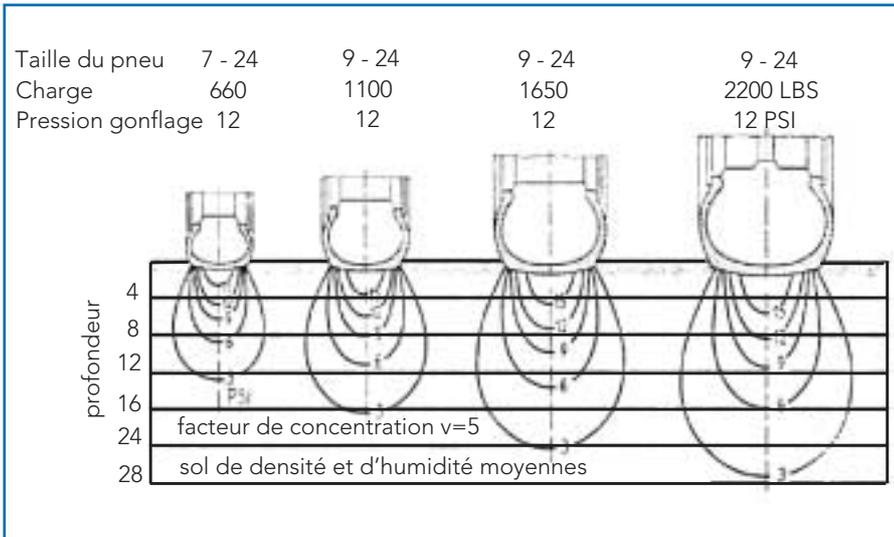


Fig. 4 : courbes d'égalité de contrainte calculées pour quatre engins de poids et de pneumatiques différents sur le même sol de densité apparente et teneur en eau moyenne (d'après Söhne, 1958).

Cette figure illustre le fait que l'augmentation du poids des engins et par conséquent de la taille des pneus, augmente le volume de sol concerné par la déformation, mais également l'intensité de la contrainte. Par exemple pour un poids de 660 livres la contrainte à 8 cm de profondeur est 6 Psi alors qu'elle est deux fois plus élevée à la même profondeur pour un poids de 2 200 livres. Présentés autrement, les résultats montrent que la contrainte de 3 Psi s'arrête à 12 cm de profondeur pour une charge de 660 livres alors qu'elle atteint 24 cm de profondeur pour une charge de 2 200 livres.

Cette figure reste toutefois assez théorique car issue d'un matériau parfaitement homogène, caractère le plus souvent assez éloigné de la réalité du sol en place où les horizons ont des propriétés très différentes et où sont présents des éléments grossiers et des racines qui constituent un squelette résistant.

$$1 \text{ LBS} = 1 \text{ PSI} = 0,07 \text{ bar}$$

$$1 \text{ IN} = 2,54 \text{ cm}$$

contrainte, et plastique dans le cas contraire. Dans le cas des déformations plastiques, soit la forme du sol est modifiée mais pas son volume (fluage), soit le volume du sol est réduit sans que la masse ne change, diminuant par conséquent sa porosité (compression). Généralement, dans le cas de l'orniérage les deux phénomènes se produisent simultanément. Les indicateurs en sont la masse volumique (ou la densité apparente), le ratio entre pores grossiers (où l'eau circule par gravité) et pores fins (où l'eau est soumise aux forces capillaires), l'état de la structure (taille et stabilité des agrégats ; taille, forme et connexion des pores observées à différentes échelles), le point de préconsolidation du matériau.

Interactions entre contrainte, résistance du sol et déformation

Interaction contrainte – résistance du sol

La contrainte est définie comme une force appliquée par unité de surface. Pour un engin roulant sur un sol, la contrainte théorique est égale au poids total de l'engin rapporté au nombre de roues et à la surface de contact de chaque roue. Le poids à vide est connu et la charge peut être appréciée assez facilement. En revanche, il est plus difficile d'avoir accès à la surface de contact (cf. article de E. Cacot et D. Pischedda p. 36). Cette surface dépend des propriétés mécaniques du pneu (profil, armature, pression), des pro-

priétés mécaniques du sol déterminant sa résistance, et de l'équilibre de l'application des masses en terrain hétérogène jamais parfaitement plat. Dans le cas d'un pneu résistant sur un sol résistant, la surface de contact sera petite et la contrainte appliquée au sol sera forte mais localisée. Un pneu moins résistant (moins gonflé et/ou à armature moins rigide) se déformera sur un sol résistant, la surface de contact sera plus grande donc la contrainte sera moins intense mais le volume de sol concerné plus important. L'utilisation des chenilles ou tracks relève du même concept, en augmentant la surface théorique de contact. En fait, les plaques individuelles des chenilles situées au contact du sol peuvent appliquer de fortes contraintes en sol irrégulier.

La résistance du sol dépend de paramètres tels que l'agrégation et la porosité. Ces derniers étant modifiés par la déformation à chaque passage de l'engin, la résistance du sol est elle-même modifiée. Par conséquent, l'effet des passages successifs d'un même engin au même endroit ne sera pas strictement identique.

Une question importante est celle du cumul des contraintes sur la déformation du sol. L'expérience de McNabb et al. (2001) montre que la déformation la plus forte apparaît lors des premiers passages autrement dit que l'intensité de la déformation diminue avec le numéro d'ordre du passage. L'essentiel des modifications des propriétés physiques du sol se produit après les trois premiers cycles de passage dans le cas de cette expérience (sol humide).

Interaction humidité – déformation du sol

La résistance du sol diminuant avec son état d'humidité, à contrainte égale, la déformation sera donc d'autant plus forte que l'humidité du sol sera élevée (voir figure 5). Il faut en conclure que le passage d'engin sur un sol sec se traduit par une déformation, même si elle est limitée, et qu'un seul passage sur un sol humide aura des conséquences plus importantes que plusieurs passages sur un sol sec. McNabb et al. (2001) rapportent qu'un seul passage

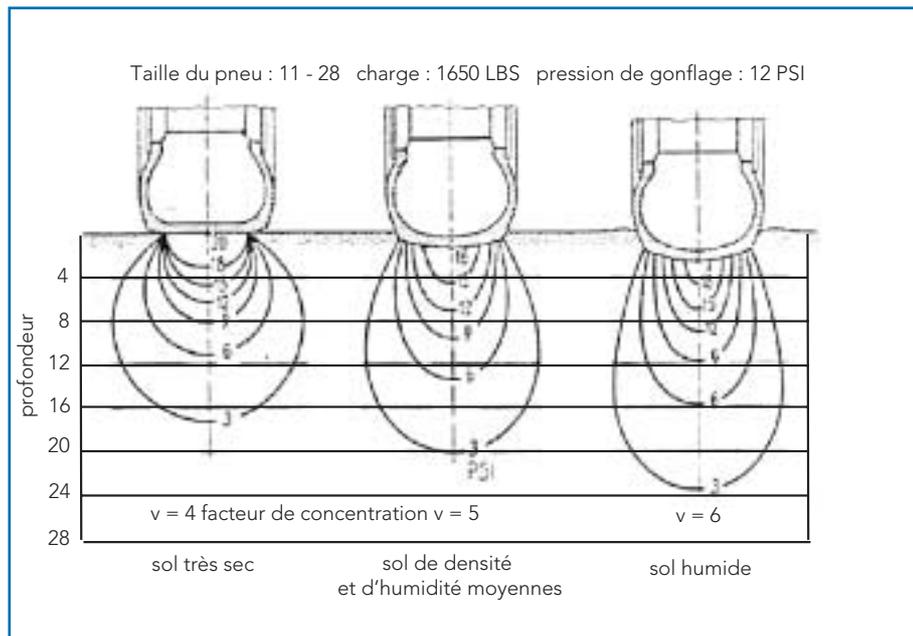


Fig. 5 : courbes d'égalité de contrainte calculées pour différentes humidités (sec à gauche, très humide à droite, intermédiaire au centre) sous le même engin (d'après Söhne, 1958).

Cette figure illustre le fait que pour une charge constante et des pneumatiques identiques, l'enfoncement dans le sol augmente avec l'humidité du fait de la diminution de la résistance du sol. La propagation des courbes d'égalité de contrainte est plus profonde et la forme du bulbe devient de plus en plus elliptique avec la déformation même de la carcasse du pneumatique. De même que pour la figure précédente, cette courbe reste théorique

sur un sol saturé d'eau peut entraîner un tassement supérieur à celui observé après 10 passages sur le même sol sec !

Conséquences des déformations sur le fonctionnement du sol à court et long terme

Les trois types de déformations des sols forestiers (scalpage, orniérage et tassement) se traduisent par une modification plus ou moins accentuée de la disposition des particules et de la porosité.

Dans le **cas du tassement**, le volume poral est réduit et son organisation est modifiée. La microporosité située entre les particules solides élémentaires (dite texturale) à l'intérieur des agrégats, est peu affectée par le tassement sauf dans le cas des structures grossières où elle peut augmenter. La porosité la plus affectée est la macroporosité résultant de l'assemblage des particules élé-

mentaires en agrégats (dite structurale). De plus, par la déformation ou la destruction des pores structuraux, c'est la continuité de l'espace poral qui est rompue par le tassement. Cette discontinuité est un paramètre essentiel vis-à-vis du fonctionnement physique (transfert liquide et gazeux), avec des conséquences significatives sur le fonctionnement chimique (stabilité des composés en milieu réducteur) et biologique (prospection et absorption racinaire).

Les conséquences des déformations liées au **scalpage** (déformation issue de contraintes tangentielles) sont plus complexes. S'il y a glissement des particules solides les unes par rapport aux autres, leur cohésion augmente (par une augmentation de la surface de contact), créant une structure lamellaire horizontale, qui forme un obstacle pour les racines ou les transferts liquides et gazeux.

L'**orniérage** a des conséquences qui correspondent à un fort scalpage et à un tassement local, auquel s'ajoute la création de dépressions perturbant la circulation naturelle de l'eau : soit ralentissement du drainage latéral en terrain plat, soit canalisation du ruissellement dans les pentes où peut s'initier une érosion significative.

À court terme

Les modifications des caractéristiques du sol résultant de l'application des contraintes sont les suivantes :

- une augmentation de la capacité de rétention en eau du sol (réserve disponible pour la végétation) principalement dans les textures sableuses, celle-ci étant liée au nombre de pores fins (capillaires),
- une diminution de la perméabilité par réduction de la macroporosité et par conséquent du drainage rapide du sol,
- une augmentation de la capacité de transfert de l'eau pour des saturations moins fortes après drainage rapide du sol, correspondant à la circulation de l'eau dans la porosité fine.
- une diminution de l'aération du sol, c'est-à-dire des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère.

Par conséquent, l'augmentation de la rétention en eau n'est favorable que pour les sols très sableux. Les modifications de la perméabilité montrent que le ressuyage du sol (élimination rapide de l'eau après la pluie) est altéré par le tassement alors que le transfert capillaire (circulation lente) est plutôt augmenté : le risque d'engorgement s'accroît.

La réduction de l'aération du sol diminue les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, que ce soit l'oxygène, indispensable aux organismes, qui doit entrer dans le sol, ou le gaz carbonique, produit par la respiration des organismes, qui doit être éliminé. Le risque d'anoxie est accru. Les conséquences sont directes sur l'activité biologique qui ne tolère en général pas le déficit d'oxygène, et indirectes sur le fonctionnement biogéochimique qui évolue vers des processus spécifiques (ralentissement de la biodégradation

des matières organiques, apparition de la dénitrification, apparition de composés minéraux ou organiques réduits souvent plus mobiles qu'à l'état oxydé, à l'extrême, apparition de composés issus de fermentation anaérobies tel le méthane).

Long terme et restauration naturelle

La persistance des déformations et de leur réversibilité n'est pas connue. Des études ponctuelles apportent des données qui sont le plus souvent impossibles à rattacher à des variables parfaitement contrôlées, donc impossibles à généraliser.

La restauration naturelle d'un sol dépend de paramètres physiques (présence de minéraux argileux gonflants provoquant des mouvements internes favorables à l'agrégation, cycles humectation – dessiccation et cycles gel – dégel créant la fissuration), chimiques (teneur en calcium flocculant les particules fines), et biologiques (action directe des fongisseurs et des racines par la création de galeries, action indirecte des racines par la fissuration qu'elles produisent en desséchant le milieu par absorption d'eau).

Par conséquent, plus le sol est riche sur le plan chimique, plus l'agrégation sera stable et le milieu drainant, plus il sera biologiquement actif et plus la restauration sera rapide après une contrainte.

Les facteurs anthropiques peuvent défavoriser la restauration. Toute action qui va altérer les paramètres chimiques et biologiques va diminuer le potentiel de restauration naturelle des sols :

- la dégradation qualitative et quantitative des matières organiques (brûlage, andainage, introduction d'essences acidifiantes inadaptée à la station),
- l'érosion mécanique qui élimine les particules fines essentielles à la stabilité structurale (maintien du sol nu dans les zones à relief),
- la perte de cations basiques stabilisant la structure et catalysant l'activité biologique (exportations trop élevées, brûlage ou récolte des rémanents),
- la dégradation des banques de graines.

Il est de plus évident que plus la contrainte sera limitée plus la restauration sera aisée.

Des exemples montrent que pour les voies de débardage, des durées de 40 ans seraient nécessaires pour voir disparaître la déformation en comparaison avec des durées de 5 à 15 ans pour les parterres débardés (Greacen et Sands, 1980).

Conséquences pour la végétation

L'altération de la qualité physique des sols a des conséquences sur le développement des arbres par l'intermédiaire de leurs racines.

Le développement racinaire est perturbé, à l'extrême arrêté, par l'augmentation de la résistance à la pénétration physique des racines et par la diminution des échanges gazeux. Toutefois, la définition d'un seuil de résistance à partir duquel la restriction de la pénétration racinaire deviendrait limitante pour la nutrition des arbres et pour leur ancrage, est actuellement impossible. La résistance à la pénétration des racines est en effet difficile à quantifier car elle nécessite de prendre en compte de multiples paramètres : la résis-

tance intrinsèque du sol, la fissuration créant des voies préférentielles de pénétration, les caractéristiques des agrégats et la continuité des macropores, la disponibilité en oxygène.

Il faut prendre en compte ces caractéristiques sur l'ensemble du profil de sol, en incluant les horizons profonds car les discontinuités structurales influencent notablement le développement des racines. Un profil de sol n'est pas homogène verticalement : les horizons profonds sont naturellement plus denses que les horizons de surface (moins de matière organique, activité biologique plus faible) et subissent des compactations liées à la charge axiale des engins. Cette hétérogénéité a des conséquences importantes pour la prospection racinaire qui est plus sensible à l'augmentation relative de la résistance d'un horizon à l'autre qu'à la valeur absolue de la résistance de chaque horizon.

À l'effet physique direct du tassement s'ajoutent fréquemment les conséquences d'un engorgement qui va créer un milieu anoxique. Certaines essences forestières sont capables de se développer même si l'aération du sol est faible, en mettant en place des structures adaptées. Il s'agit d'une mul-

Le tassement du sol a le plus souvent des conséquences néfastes sur la végétation forestière.

En phase de régénération :

- importante modification de la dynamique naturelle au profit d'essences pionnières saule, bouleau, chêne pédonculé,
- difficulté de levée, de survie et croissance des semis de hêtre, chêne sessile, chêne rouge en présence d'une nappe superficielle (Lévy et Lefèvre, 2001),
- influence néfaste d'une flore invasive (molinie, carex, jonc) sur la croissance des semis concurrence pour la lumière, alimentation en eau et en éléments, risque allélopathique, (Becker et Lévy, 1983).

Remarque : le scalpage peut augmenter la densité de semis sur des humus brut par effet de crochetage.

Sur peuplement adulte :

- perte de croissance : dans leur synthèse bibliographique portant sur des peuplements tempérés, Greacen et Sands (1980) ont identifié, sur un total de 142 sites affectés par le tassement du sol, un effet dépressif sur la croissance dans 82 % des cas,
- dépérissement : des mortalités de hêtre suite à leur fragilisation par le passage d'engin sont fréquemment observées (DSF, 2004),
- diminution de la stabilité des peuplements : la dégradation du système racinaire superficiel et de sa possibilité de régénération sont citées comme un facteur aggravant de la sensibilité au vent (Drénou, 2005).

tiplication des racines subhorizontales et obliques dans la partie non engorgée, d'une hypertrophie des lenticelles à la base des tiges et de l'augmentation de la porosité des racines superficielles (formation d'espace aëri-fère élargi). Ces adaptations facilitent le transport interne d'oxygène vers des parties de la plante soumises à une forte hypoxie. Ceci explique la bonne résistance à l'engorgement des chênes pédonculés ou des pins, et au contraire, la sensibilité des essences comme le hêtre, pour lesquelles aucune adaptation racinaire n'est observée. Une typologie de la résistance des essences à l'anoxie a été définie (Lévy et Lefèvre, 2001). Certaines espèces végétales autres que les arbres (joncs, molinie)

peuvent également s'adapter par des structures particulières (aérenchymes) et/ou par un métabolisme adapté (activité enzymatique spécifique). Les conséquences du développement superficiel des racines qui résulte de ces contraintes sont en général graves. Un système racinaire superficiel limite le volume de sol intéressant l'alimentation en eau et en éléments nutritifs, sensibilisant les peuplements aux stress édaphiques, et diminue l'ancrage physique, les rendant plus sensibles aux stress mécaniques. Seules quelques essences comme l'aulne glutineux, le chêne pédonculé, le sapin, le pin sylvestre, le tremble (citées par Kreutzer, 1961) sont capables de pros- pecter des horizons ou la densité appa-

rente est élevée. Potentiellement, ces espèces peuvent donc s'adapter à des conditions d'aération et de résistance mécanique peu favorables, et peut-être participer à la régénération de la structure du sol (Kenk, 2002). En outre la diminution de l'activité de la macrofaune du sol, consécutive aux modifications de structure et de propriétés physiques, peut être préjudiciable pour les arbres puisque des fonctions importantes telles la minéralisation de la matière organique, la fragmentation et l'agrégation du sol sont ralenties.

Conclusion

L'étude bibliographique réalisée montre que des connaissances exis-

Type de sol	Roche-mère	Charge en éléments grossiers minéraux	Stabilité de la structure	Régime hydrique	Sensibilité (Sol à la capacité au champ)
Rendzine brunifiée	Calcaire superficiel	Forte	Forte	Ressuyage rapide	Faible
Sol brun calcique ou eutrophe	Limon ou terra fusca sur calcaire	Forte en profondeur	Moyenne	Ressuyage rapide	Moyenne
Pélosol	Marnes	Faible	Forte	Ressuyage rapide si pente	Faible
Pélosol-pseudogley	Limon sur marnes	Faible	Faible en surface	Engorgement fréquent	Forte
Sol lessivé	Limons épais (apport éolien ou alluvial)	Faible	Faible si sol acide	Ressuyage lent	Moyenne
Pseudogley acide	Limons dégradés	Faible	Faible	Engorgement fréquent	Forte
Sol brun acide	Grès, Granite	Moyenne	Moyenne	Ressuyage rapide	Faible
Podzol*	Sables, Grès quartzeux, Granite leucocrate	Moyenne	Faible (particulaire)	Ressuyage rapide	Faible
Podzol* hydromorphe	Sables	Moyenne	Faible (particulaire)	Engorgement fréquent	Moyenne
Tourbe	Aucune	Nulle	Moyenne	Engorgement permanent	Forte

Fig. 6 : abaque permettant d'évaluer la sensibilité d'un certain nombre de sols, dans différentes conditions. La sensibilité est définie en trois classes : faible, moyenne, forte.

Les sols sont caractérisés par leur substrat, leur charge en éléments grossiers minéraux, leur richesse en éléments chimiques flocculants (stabilité de la structure) et leur régime hydrique. Les différentes conditions, auxquelles correspondent des facteurs aggravants, sont prises en compte :

- si le sol est à une humidité supérieure à la capacité au champ sa sensibilité augmente d'une classe ; [l'humidité à la capacité au champ correspond à la saturation complète de la porosité capillaire alors que la macroporosité est occupée par l'air] ;
- si le sol est à une humidité nettement inférieure à la capacité au champ sa sensibilité diminue d'une classe ;
- si le sol est gelé sur plus de 15 cm sa sensibilité diminue d'une classe

tent, mais qu'elles sont disparates et difficiles à relier à des situations précises. Il n'est en effet pas facile de prévoir le comportement d'un sol à un état d'humidité donné, face à une contrainte connue.

Des abaques comme celui présenté à la figure 6 permettent de prévoir grossièrement les risques en fonction des types de sols. De même des systèmes experts d'aide à la décision sont proposés (logiciel Profor, Ziesak, 2003).

De plus, quand une déformation a été constatée, en particulier un tassement important avec ornierage, il est impossible à l'heure actuelle de prévoir la durée nécessaire à la restauration de la qualité physique du sol qui va dépendre de paramètres physiques (cycles humectation dessiccation, voire gel – dégel), chimiques (état de saturation du sol) et biologique (capacité de colonisation des racines et des animaux fouisseurs).

Il est donc important de développer des simulateurs capables de prévoir les risques. Pour ce faire, il faut associer à cette démarche, des observations réalisées dans des dispositifs expérimentaux suivis sur le long terme. Ces dispositifs testeront également la remédiation assistée, en particulier dans les sols les plus acides (travail approprié du sol et amendement calcaire pour améliorer la stabilité structurale du sol et redynamiser l'activité biologique).

Jacques RANGER

INRA Centre de Nancy
Unité biogéochimie des écosystèmes forestiers
ranger@nancy.inra.fr

Mathieu LAMANDÉ

actuellement en stage post-doctoral
au Danish Institute of Agricultural
Sciences, Tjele Danemark
mathieu.lamande@agrsci.dk

Yves LEFÈVRE

INRA Centre de Nancy
Unité écologie et écophysologie
forestière
lefevre@nancy.inra.fr

Bibliographie

BADEAU V., DAMBRINE E., WALTER C., 1999. Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. Étude et gestion des Sols, vol. 6, n° 3, pp. 165-180

BECKER M., LÉVY G., 1983. Installation et dynamique d'une population de semis de chêne en milieu hydromorphe sous l'influence de divers facteurs (lumière, régime hydrique, compétition herbacée). Acta Oecologica, vol. 4 (18), n° 3, pp. 299-317

CACOT E., 2001. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? Informations-Forêt, n° 4, fiche n° 637, 6 p. – en ligne : <http://www.afocel.fr/Publications/FIF/FIF637.pdf>
Département de la santé des forêts, 2003. La santé des forêts : bilan annuel 2002. Les cahiers du DSF, n° 1, 104 p.

DRÉNOU C., 2005. L'ancrage racinaire et le sol. Communication orale, colloque « Forêt, vent et risque », GIP-Écofor, 16-17 mars 2005, Paris, pp. 5-21

GARRISON G.A., RUMMEL R.S., 1951. First-year effects of logging on Ponderosa Pine forest range lands of Oregon and Washington. Journal of Forestry, vol. 49, n° 10, pp. 708-713

GREACEN E.L., SANDS R., 1980. Compaction of forest soils : a review. Australian Journal of Soil Research, vol. 18, pp. 163-189

GREACEN E.L., BARLEY K.P., FARRELL D.A., 1969. The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. In : Whittington, W.J. : Root Growth. Londres : Butterworths, pp. 256-268 (cité in : Bengough and Mullins, 1990)

KENK G., 2002. Rôle de la végétation dans la reconstitution de la forêt après tempête : l'exemple allemand

(Bade-Wurtemberg). Revue forestière française, vol. 54, n° 6, pp. 547-558

KOOLEN A.J., 1994. Mechanics of soil compaction. Chapter 2, pp. 23-44. In : Soil compaction in crop production, Soane B.D. and Van Ouwerkerk C, Amsterdam : Elsevier, Developments in agricultural Engineering n° 11, 662 p.

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

LÉVY G., LEFÈVRE Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. Contraintes subies, choix des essences, interventions et gestion durable. Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. 223 p.

MCMAHON S., SIMCOCK R., DANDO J., ROSS C., 1999. A fresh look at operational soil compaction. New Zealand Journal of Forestry, pp. 33-37

MCNABB D.H., STARTSEV A.D., NGUYEN H., 2001. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. Soil Science Society of America Journal, vol. 65, n° 4, pp. 1238-1247

MUSY A., SOUTTER M., 1991. Physique du sol. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. Coll. Gérer l'environnement, vol. 6. 335 p.

SÖHNE W., 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. (Pressure distribution in the soil and soil deformation under tractor tyres). Grundlagen Landtechnik, n° 5, pp. 373-400 (in German)

ZIESAK M., 2003. Avoiding soil damages caused by forest machines. 3, 11. In : 2nd Forest Engineering Conference Proceedings ; Chapter Techniques and Methods, Iwarsson M. and Baryd B., Uppsala : Skogforsk, Arbetsrapport

Récolte des bois et respect du sol : un dialogue à développer entre les acteurs

La prise en compte des sols, et plus largement de l'environnement, lors des opérations d'exploitation forestière est une préoccupation grandissante, tant de la part des propriétaires – gestionnaires que des constructeurs, des exploitants et des entrepreneurs de travaux forestiers (impliqués dans des démarches environnementales type ISO 14 000 ou PEFC ou certification de services). L'Afocel¹ et le CTBA² se sont depuis longtemps penchés sur cette question afin d'apporter des réponses pratiques aux professionnels. L'article présenté ici reprend les principales techniques et méthodes, permettant de limiter les impacts potentiels de l'exploitation forestière au niveau des sols, testées et validées lors d'études et de recherches. Mais il convient tout d'abord de préciser les risques potentiels liés aux opérations d'exploitation forestière, ainsi que les facteurs de sensibilité des sols. Ces deux points constituent en effet un préalable à la définition des moyens de prévention.

Les interactions entre les machines et les sols forestiers

Le déplacement des machines en conditions forestières

Les machines forestières travaillent dans des conditions particulières par rapport aux machines agricoles ou de travaux publics en raison de facteurs comme la pente, la faible portance des sols et la présence d'un grand nombre d'obstacles tels que les fossés, les rochers ainsi qu'une végétation parfois importante qu'il s'agit de contourner pour ne pas la blesser.

Du fait de leurs conditions de travail, les machines forestières se doivent d'être robustes et maniables pour se mouvoir sur un terrain très inégal, tout en restant productives. À vide, un débusqueur pèse 8 à 11 tonnes, une

abatteuse 8 à 18 tonnes et un porteur moyen 14 à 16 tonnes. Ce dernier peut transporter une charge équivalente à son poids à vide. Ces machines sont le plus souvent articulées avec des dimensions de 2,50 m à 3 m de largeur pour une longueur de 6 à 9 m. La masse totale de l'engin est répartie sur le sol sur 4, 6 ou 8 roues et d'une façon non uniforme car :

- la masse n'est pas répartie régulièrement sur l'engin ; selon sa conception et selon qu'il est vide ou chargé, l'avant et l'arrière supportent des masses différentes,
- la pente et les irrégularités du terrain font que les efforts sur chaque roue sont différents.

Les débusqueurs ont toujours 4 roues que l'on gonfle à des pressions de 1,7 à 2,3 bars. Les porteurs récents sont

des 8 x 8 dans plus de 60 % des cas ou des 6 x 6 (40 % des cas). Les 4 x 4, nettement majoritaires il y a une vingtaine d'années, ont fortement régressé et pratiquement disparu du marché. Les machines sont équipées de pneus larges et leurs pressions de gonflage se situent entre 1,5 et 3 bars alors qu'elles atteignaient fréquemment 3 à 4 bars autrefois. Il existe des pneus très larges permettant de descendre à des pressions inférieures à 1 bar. Mais ils sont chers et surtout vulnérables (risque d'éclatement sur les souches) donc peu utilisés. Il n'est pas possible de recourir à des roues jumelées, comme le font les agriculteurs faute d'espace suffisant. Ces évolutions montrent bien que les constructeurs ont pour axe de développement la construction d'engins de plus en plus respectueux de l'environnement.

¹ Afocel : Association forêt cellulose

² CTBA : Centre technique du bois de l'ameublement

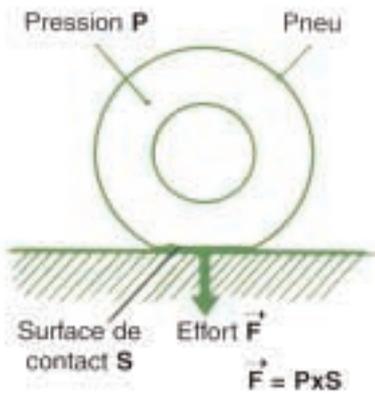


Fig. 1 : effort au sol sous une roue

Si l'on regarde d'un peu plus près ce qui se passe au niveau des pneus, la **pression de gonflage** sert à transmettre au sol l'effort vertical **F** exercé par la roue, en le répartissant sur une certaine surface **S**. Lorsque la charge d'un engin augmente, l'effort transmis à la roue augmente également. Mais la pression à l'intérieur du pneu n'augmente que de quelques pourcents. En revanche, la surface de contact sol/pneu s'accroît pour supporter un effort supérieur et ceci de deux façons :

- **le pneu se déforme**, en particulier sur sols durs,
- **le pneu s'enfonce**, en particulier sur terrains peu portants.

Le sol résiste à la pression du pneu par sa portance ou « pouvoir porteur ». Celui-ci s'exprime dans les mêmes unités qu'une pression : le Pascal Pa (N/m²) ou plus couramment le bar (kg/cm² ; 1 bar correspond à la pression exercée par un poids de

Exemple pratique : enfoncement du pneu en fonction de la portance du sol

Soit un porteur 8 x 8 moyen, pesant 20 tonnes en charge et équipé de pneus 600 – 26,5*.

Chaque roue supporte : 20 tonnes/8 roues = 2,5 tonnes.

Les pneus sont gonflés à une pression de 1,5 bars ; c'est la pression que ces roues vont exercer sur le sol.

Sur un sol présentant une portance supérieure à 1,5 bars, la roue a besoin d'une surface au sol de : masse/portance du sol = 2 500 kg/1,5 bars = 1 670 cm², soit 60 cm (largeur du boudin) x 28 cm (longueur en appui sur le sol) pour encaisser l'effort subi.

Si le pouvoir porteur du sol n'est que de 1 bar, le pneu va s'enfoncer jusqu'à ce que sa surface de contact avec le sol atteigne : 2 500 kg/1 bar = 2 500 cm², soit sur une longueur de 42 cm.

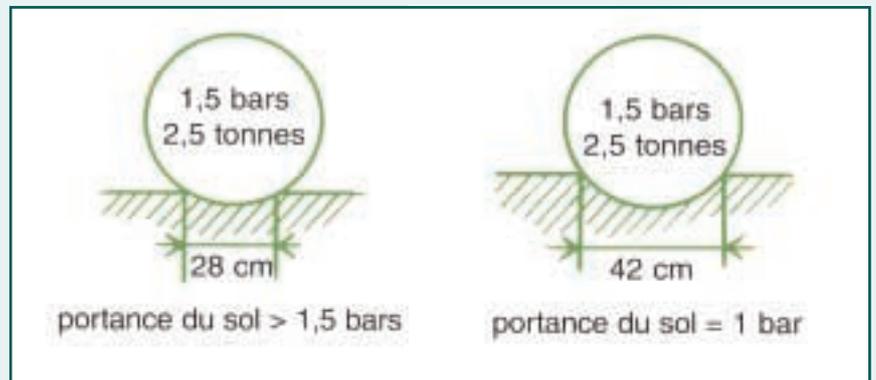


Fig. 2 : selon la portance du sol, le pneu réagit différemment

(*) Rappel sur l'identification des pneus :

- 1^{er} chiffre = largeur du boudin en mm ou en pouces
- 2^e chiffre = diamètre à la jante en pouces.

Le pneu 600 - 26,5 mesure 60 cm de large avec un diamètre de la jante de 26,5 pouces.

1 kg sur une surface de 1 cm²). Sa valeur varie considérablement selon les types de sols, leur granulométrie, leur humidité comme le montre le

tableau 1 ci-dessous d'après Terrängmaskinen (1981). Selon son état (sec/humide/détrémpé) et son tassement ou non, le

TAB 1 : POURVOIR PORTEUR PAR TYPE DE SOL

Type de sol	Pouvoir porteur (en bars)	Type de sol	Pouvoir porteur (en bars)
Neige fraîche	0,1 – 0,3	Gravier	3 – 8
Marais	0,1 – 0,4	Neige tassée	4 – 8
Limons détremés	0,2 – 0,6	Argile sèche	4 – 12
Argile molle	0,5 – 1,5	Roche compacte	125
Sable tassé	1,5 – 2,5		

même sol limoneux ou argileux présente un pouvoir porteur qui peut varier dans un rapport de 1 à 10.

Dans de telles conditions, l'observation des conditions d'humidité du sol (en lien avec la météo) devient alors primordiale !

Accessoires existants

Il existe des accessoires pouvant être montés sur les engins forestiers pour augmenter l'adhérence ou baisser la pression au sol.

■ Les chaînes

Un engin n'avance que si l'adhérence est suffisante. Dans le cas contraire, il patine. Lorsqu'ils sont détremés, certains terrains (en particulier argileux) voient leur adhérence chuter. Les engins, même dotés de bons pneus, s'y comportent comme de véritables luges. Si on les équipe de chaînes, leur adhérence peut remonter et permettre un passage sans difficulté. En revanche, les chaînes sont agressives pour les racines, le pied des arbres, les pistes et elles sont interdites sur routes. Il suffit souvent de monter les chaînes sur un seul des ponts moteurs : on assure ainsi une bonne motricité à l'engin sans rendre l'ensemble des roues agressives.

■ Les tracks

Ces semi-chenilles métalliques sont montées sur les roues d'un bogie (ensemble de deux roues montées sur un balancier). Par rapport aux pneus, elles augmentent la surface de contact au sol grâce à la présence des maillons entre les 2 roues. Les « éco-tracks » présentent des maillons plus larges que le pneu, au profil peu agressif, et au coefficient de roulement réduit. Ainsi, sur un porteur de capacité 12 tonnes, chargé, équipé de pneus 600 x 26,5, la pression au sol passe de 1,1 bar pour les pneus seuls à 0,6 pour des pneus équipés de tracks.

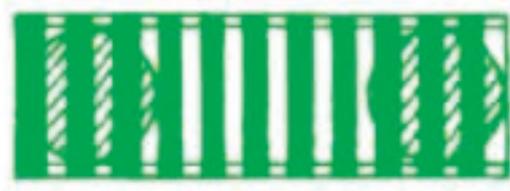
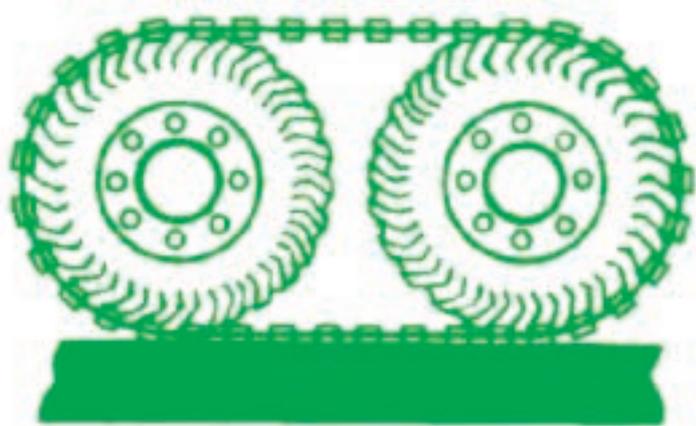


Fig. 3 : les tracks

■ Les engins à chenilles

Il existe quelques engins forestiers à chenilles permettant d'atteindre des pressions au sol encore plus faibles : 0,3 à 0,4 bar avec des chenilles pouvant mesurer jusqu'à 80 cm de large. De telles machines ne peuvent être dirigées qu'en donnant des vitesses différentes à leurs chenilles ce qui provoque un certain ripage, d'où quelques dégradations du sol et surtout des pistes ou des routes forestières. Les dégâts peuvent être limités en évitant de brusques changements de direction. À l'intérieur de la parcelle, le risque principal est de couper les racines et d'écorcer le pied des arbres.

Les impacts au sol causés par le déplacement des machines

Les impacts au sol prennent différents aspects suivant le type de sol, l'humidité de ce dernier et la masse de la

machine qui l'a parcouru, et ont différentes répercussions sur le long terme. Les forestiers spécialistes de l'exploitation forestière se sont intéressés à ces problématiques dès le début des années 1980 avec entre autres Cicéron Rotaru qui présenta une typologie pour le Congrès forestier mondial de Mexico en 1985 et qui fait toujours référence (voir l'article de J. Ranger et al., page 27).

Ainsi les causes principales de ces impacts sont de deux types :

- les pneus ou autres organes de roulement des machines de bûcheronnage et particulièrement ceux des machines de débardage vu leur masse en charge, par l'effort de compression (tassement, compactage et orniépage), et par l'effort de traction (scalpage),
- les bois déplacés dans le peuplement par treuillage puis manipulés et stockés bord de route (tassement,



développement végétal. L'amendement est un investissement à moyen et long terme, qui permet de redynamiser toutes les composantes du fonctionnement du sol. Ainsi, l'apport de calcium améliore la structure du sol directement, et indirectement par le développement des lombriciens ; la porosité, les capacités en air et eau sont améliorées, l'enracinement est meilleur. Mais là aussi, cette remédiation a un coût non négligeable, d'autant plus que pour être efficaces les doses préconisées sont aux alentours de 2 à 3 tonnes de carbonate de calcium (CaCO₃) par hectare (Ranger, communication personnelle).

En résumé, les moyens de remédiation existent mais, du fait de leur coût et de leur efficacité limitée, il vaut mieux leur préférer la prévention. « **Mieux vaut prévenir que guérir** » comme le dit le dicton populaire.

Une prévention à réaliser bien en amont de l'exploitation forestière

La première des préventions est à réaliser par le propriétaire et le gestionnaire forestier. Elle consiste en l'aménagement des massifs forestiers avec l'ouverture et l'entretien d'accès aux parcelles. Ce réseau de routes, pistes ou chemins, ouvert à la circulation des camions, doit être suffisamment dense pour éviter de longs déplacements sur coupe des engins de débardage. Il doit bien évidemment être créé dans les règles de l'art (création de passages busés, ouverture de fossés, rigoles « coupe-eau »...) afin d'éviter les phénomènes d'érosion qui sont eux aussi préjudiciables aux sols.

L'accès aux parcelles depuis les pistes est primordial :

- si les fossés sont profonds, aménager des passages busés pour que les engins puissent les traverser pour passer de la coupe à la piste,
- éviter les grands talus infranchissables en surplomb ou en contrebas des pistes, s'ils sont inévitables

raclage des couches superficielles), et ceux-ci peuvent être localisés avec une densité croissante plus l'on se rapproche de la place de dépôt.

Les moyens de prévention et de remédiation

Prévention ou remédiation ?

La remédiation mécanique est techniquement possible sur les fossés, les accotements, les chemins de terre avec les outils de travaux publics (tracto-pelles, pelles mécaniques). Elle est plus problématique lorsqu'il s'agit de réparer d'éventuels dégâts sur le parterre de la coupe.

En effet, autant en milieu agricole, certains impacts au sol comme des ornières peuvent être corrigés grâce à un travail du sol (labour, discage, sous-solage), autant en milieu forestier de tels travaux de remédiation sont coûteux et de surcroît peu efficaces : le travail d'un sol forestier ne permet jamais de reconstituer à l'identique sa structure initiale, le travail reste au mieux très grossier.

La remédiation chimique des impacts au sol, par fertilisation ou amendement, est également envisageable. La fertilisation est destinée avant tout à pallier des carences nutritives, et engendre un meilleur



Afocel

Quel sera le coût d'une remise en état de ce sol forestier ?

tacles naturels... Quelques grands principes peuvent cependant être énoncés pour ces cloisonnements :

- pas forcément rectilignes, mais éviter les angles aigus,

- suffisamment rapprochés, pour que les engins n'aient pas à en sortir (pas plus de 15-20 m en éclaircies, jusqu'à 30-40 m en amélioration ou jardinage),

- de largeur minimum 4 m, pour que les engins d'une largeur de 2,50 à 3 m n'accrochent pas les arbres de part et d'autre (figure 4),

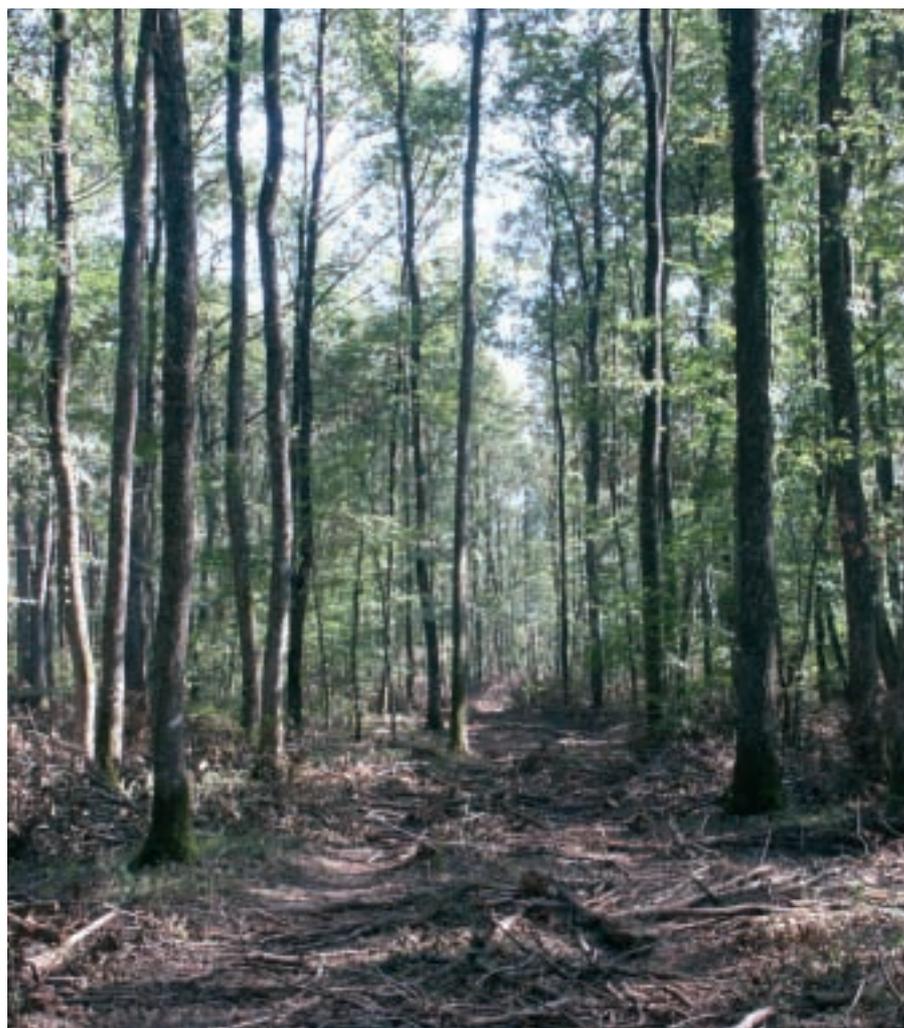
- orientés dans le sens de la pente, ce qui est favorable au déplacement des engins,

- communicants entre eux, sans angles aigus avec les pistes et routes.

compte tenu du relief, aménager des entrées en pente douce.

L'ouverture de cloisonnements d'exploitation par le gestionnaire permet ensuite de limiter la surface potentiellement tassée en concentrant la circulation des engins sur une surface réduite et en évitant la circulation des engins dans les interbandes (voir encadré « Le cheminement des engins de débardage sur coupe » p. 42). En effet, le tassement du sol a lieu essentiellement lors des tout premiers passages d'engin. Des études ont ainsi montré que, dès le premier passage, 62 % du tassement se produisaient à 10 cm de profondeur et 80 à 95 % du tassement à 30 cm de profondeur. L'autre avantage des cloisonnements est de réduire globalement le nombre d'arbres blessés lors des opérations de débardage.

Si l'ouverture de cloisonnements d'exploitation est à préconiser dans tous les types de peuplements, celle-ci ne doit pas se faire aveuglément en appliquant partout le même schéma. **Il convient avant tout de réfléchir l'implantation des cloisonnements d'exploitation au cas par cas en fonction de la topographie de la parcelle, du réseau de fossés existants, des obs-**



Afocel

Laisser un arbre au milieu du cloisonnement, c'est le condamner à une blessure certaine, ainsi que d'autres arbres voisins

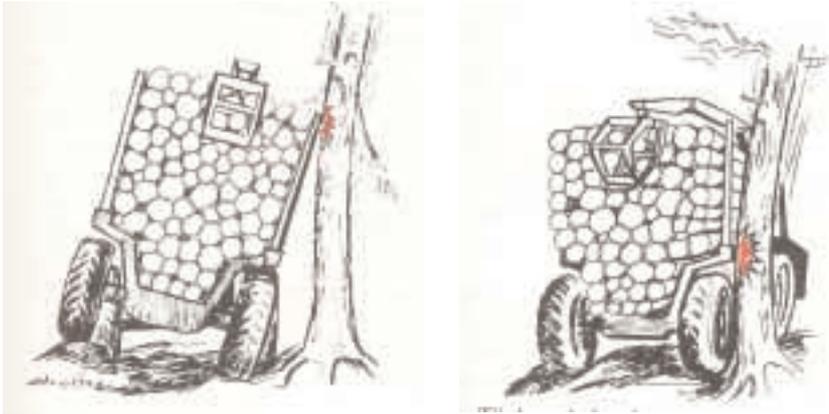


Fig. 4 : le cloisonnement doit être adapté (d'après Terrängmaskinen, 1981)

Il existe d'autres préconisations pour la réalisation de ces cloisonnements afin de les intégrer au mieux dans le paysage (Breman, 2004).

L'usage réfléchi de ces cloisonnements, en concertation avec les opérateurs de l'exploitation forestière, permettra de les conserver en bon état :

- éviter l'exploitation à certaines périodes en cas de terrains particulièrement sensibles,
- étaler les rémanents sur les cloisonnements (voir l'article de C. Richter et Ph.-E. Durand, page 48), la couche de branches ainsi constituée doit être suffisamment épaisse et composée de préférence de branches fines pour avoir un rôle de tapis portant.

La prévention par l'organisation et le savoir-faire des opérateurs en exploitation forestière

Le premier travail de l'exploitant est de définir le système d'exploitation (bois court ou long...), en tenant compte bien évidemment des matériels existants à disposition et du cahier des charges des bois commandés par ses clients. En cas de terrain mouilleux, parsemés d'obstacles et de ruptures de pente, il vaut mieux opter pour le système bois longs avec treuillage depuis les pistes et couloirs.

Ensuite, il faut choisir l'engin adapté au terrain. Par exemple, le choix se portera sur un engin petit et maniable pour les espacements étroits et les parcours sinueux. Sur cet engin, en fonction des conditions de terrain et des éléments détaillés précédemment, il sera possible de monter des chaînes (pour augmenter l'adhérence) ou des tracks (pour augmenter la portance) ou des pneus larges basse pression. Mais attention ! Le pneu le plus large et au profil le moins agressif n'est pas toujours la meilleure solution. S'il n'évacue par correctement la terre qui s'accumule entre ses barrettes, il se met rapidement à patiner. L'engin à vide

ne parvient pas à monter les pentes même faibles. Chaînes et tracks sont des outils performants à condition qu'ils soient installés avant l'apparition de profondes ornières. Et même s'ils permettent de continuer à travailler dans des conditions peu favorables (terrain détrempé), il faut parfois arrêter les opérations en cours au risque de créer des dégâts irrémediables.

Le choix d'un système d'exploitation ou d'un type d'engin peut être orienté du fait **des clauses particulières liées au chantier**. Ces dernières sont définies pour garantir le respect du sol, du peuplement et de tout autre élément devant être pris en compte. Mais elles doivent être fixées une fois de plus en concertation avec les acteurs opérant en exploitation forestière, afin de ne pas fixer des clauses irréalisables (obligation de ne pas circuler entre les cloisonnements alors qu'ils sont espacés de plus de 50 m par exemple).

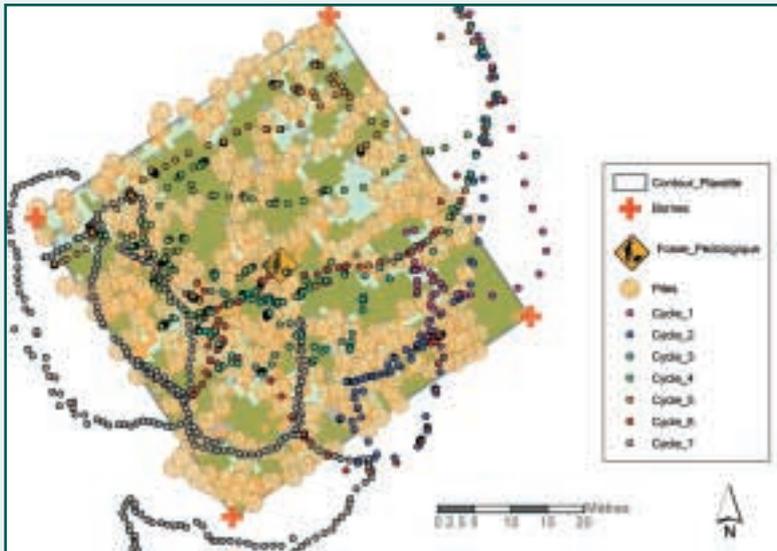
La prévention des impacts au sol repose enfin sur l'organisation des chantiers et le savoir-faire des opérateurs de terrain (bûcherons, chauffeurs d'abatteuse, débardeurs). La planification des travaux en fonction des risques terrain/météo est essentielle. Autrement dit, il faut



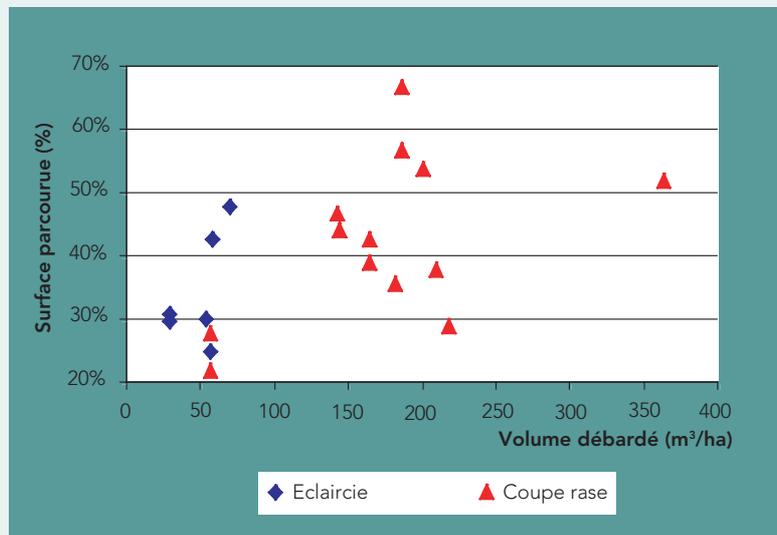
Pneus larges et basse pression, tracks sur le bogie arrière : une solution pour limiter les ornières sur des terrains plats et peu portants

Le cheminement des engins de débardage sur coupe

De 1999 à 2002, l'Afocel a mené un projet de recherche sur les impacts de l'exploitation forestière sur l'environnement. Des mesures de tassement du sol, à l'aide d'un pénétromètre, ont été réalisées. Sur tous les chantiers suivis, et quelle que soit la nature du sol, des tassements ont été relevés sur les passages d'engins. Parallèlement, la surface parcourue par les engins de débardage (porteur et débusqueur) sur le parterre de la coupe a été mesurée pour quantifier les phénomènes de tassement du sol à l'échelle de la parcelle.



Lors d'un deuxième projet, ces déplacements et l'organisation générale du débardage (par rapport aux piles de bois, à la topographie...) ont pu être suivis de façon plus précise en équipant des porteurs d'un GPS de précision submétrique. Le schéma ci-contre détaille pour un chantier le cheminement du porteur cycle par cycle (cycle de débardage = ensemble des phases de travail pour effectuer un chargement du porteur puis son déchargement).



Ces résultats soulignent l'importance d'ouvrir des cloisonnements pour éviter le cheminement des engins de débardage partout dans le peuplement, donc pour limiter les risques de tassement du sol et de blessures au peuplement.

NB : ces deux projets de recherche ont bénéficié du soutien financier du ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité.

La surface parcourue par les engins de débardage sur les chantiers étudiés peut couvrir jusqu'à deux tiers du parterre de la coupe pour une seule coupe. Le problème se cumule au fur et à mesure des rotations

réserver certaines parcelles dont on connaît la difficulté d'accès ou la fragilité en cas de pluie, de neige... pour des périodes *a priori* favorables. Au sein d'un même chantier, il peut exister des zones plus ou moins

sensibles que l'on traitera en fonction des conditions de terrain. La coordination abattage-débardage est également primordiale pour garantir une bonne organisation du chantier et du débardage.

Pour les zones sensibles, il existe différentes techniques simples pour réduire les impacts au sol :

- charger moins lorsque le sol résiste mal et avant l'apparition des ornières,

■ dégonfler les pneus tout en restant dans la fourchette définie par le constructeur (attention cependant sur terrain « agressif » avec des rochers ou des souches hautes),

■ déposer des branchages sur les voies de pénétration lorsque le sol est peu portant (le prévoir à l'avance pour donner des consignes aux bûcherons afin qu'ils effectuent un abattage dirigé),

■ avec un débusqueur en charge qui patine lors du franchissement d'un obstacle, débrayer le câble, avancer de quelques mètres, puis treuiller la charge...

Conclusion

La prévention est dans le domaine de la récolte de bois et des impacts qui en résultent beaucoup plus efficace que toutes les techniques de remédiation. Le plus souvent pour des raisons de coût mais aussi parce que leurs effets positifs sur le sol sont loin d'être sûrs. Ainsi cette prévention repose sur quelques mesures simples qui impliquent l'ensemble des acteurs et qui ne sont pas uniquement du ressort de l'exploitant ou de l'entrepreneur de travaux forestiers. Une bonne compréhension des contraintes des uns et des autres est nécessaire pour une meilleure organisation. Un premier pas dans ce sens a été la réalisation de la plaquette « Laissez une bonne impression » par l'ensemble des acteurs de la récolte. La méthode est d'identifier de façon visuelle et avec les exploitants les attentes des forestiers avant toute intervention.

Le CTBA et l'Afocel viendront compléter les résultats des études antérieures par deux projets menés conjointement :

■ un projet coordonné par l'ONF « Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt » qui, après l'état de l'art fait par l'INRA, organisera des démonstrations de techniques de débardage alternatives sur sols sensibles pour lancer les débats sur ce sujet³,

■ un observatoire environnemental des chantiers d'exploitation forestière. Sur une cinquantaine de chantiers, mettant en œuvre différentes techniques d'exploitation forestière (grande ou courte longueur, éclaircie ou coupe rase, abattage manuel ou mécanisé...), tous les impacts seront mesurés : blessures au peuplement restant, perturbations de la surface du sol et tassement... Parallèlement, toutes les données de chantiers seront relevées : conditions lors de la réalisation du chantier, matériels utilisés, méthodes de travail... Cet observatoire permettra d'une part de dresser un état des lieux des impacts en exploitation forestière et d'autre part de mettre en évidence des bonnes pratiques dans la conduite des chantiers d'exploitation forestière.

Emmanuel CACOT

Afocel station Centre-Ouest
Verneuil-sur-Vienne (87)
emmanuel.cacot@afocel.fr
Web : www.afocel.fr

Didier PISCHEDDA

CTBA
Paris
didier.pischedda@ctba.fr
Web : www.ctba.fr

Bibliographie

ARMEF, CTBA, IDF, 1993. Manuel d'exploitation forestière. Tome 1. Fontainebleau : ARMEF, Paris : CTBA. 442 p.

BREMAN P., 2004. Les lisières forestières. Le pourquoi et le comment des interventions en faveur du paysage. Rendez-vous techniques de l'ONF, n° 4, pp. 57-64

CACOT E., 2001. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? Fiche Informations-Forêt, fiche n° 637, 6 p. – en ligne : <http://www.afocel.fr/Publications/FIF/IF637.pdf>

CACOT E. et al., 2003. Laissez une bonne impression ! Guide de gestion environnementale des chantiers forestiers. Afocel, MAAPAR, CTBA, ONF, Entrepreneurs des Territoires, FNCOFOR, FNB.

LAURIER J.-P. et al., 2001. Exploitation forestière et environnement. Classeur pédagogique n° 4. Nangis : Afocel. 179 p.

LEWIN F., PEUCH D., 2004. Qualifier le cheminement des porteurs pour réduire les impacts sur l'environnement grâce à la technologie GPS. Fiche Informations-Forêt, fiche n° 697, 6 p. – en ligne : <http://www.afocel.fr/Publications/FIF/IF697.pdf>

PISCHEDDA D., CONSTANTIN E., 1997. Pratiques de l'exploitation forestière considérant les contraintes environnementales et économiques : Actes du colloque. Action Concertée AIR3-CT94-2097.

PISCHEDDA D., CHAGNON J.-L., 2001. Contraintes environnementales en exploitation forestière : essai d'analyse. Paris : CTBA.

ROTARU C., 1983. Tassement du sol forestier et récolte mécanisée du bois. Courrier de l'exploitant et du scieur, étude n° 1, 12 p.

ROTARU C., 1985. Problèmes des interactions exploitation forestière et sylviculture-environnement en France. Communication présentée au X^{ième} Congrès Forestier Mondial, Mexico.

TERRÄNGMASKINEN Del 2, 1981. Forskningsstiftelsen Skogarbeten. ISBN 91-7614-012-1.

³ Au moment où paraît cet article, deux chantiers de démonstration (un utilisant la petite mécanisation et un câble téléphérique) ont déjà eu lieu.

Régénération naturelle du hêtre en forêt de Soignes : impact de la compaction des sols

Prestigieuse hêtraie située au cœur de Bruxelles, la forêt de Soignes est confrontée depuis plus de 50 ans à l'échec de toute tentative de régénération naturelle, malgré des fructifications favorables. Un programme de recherche pulvi-disciplinaire a mis en évidence, entre autres, l'importance de la compaction des sols dans ce phénomène, et a permis de mettre au point des modalités pratiques de travaux pour obtenir une régénération naturelle satisfaisante.

La forêt de Soignes fut implantée au cœur de Bruxelles à la fin du 18^e siècle. Il s'agit d'une hêtraie à plus de 90 %, sur une surface d'un peu plus de 4 500 hectares, qui, outre la qualité exceptionnelle de sa production de bois, a une vocation récréative très intensive. Celle-ci est établie sur un sol limoneux d'une épaisseur moyenne de plus de dix mètres qui, jusqu'à présent, n'a encore jamais été remanié par des actions humaines. Il s'agit d'un sol ressuyé caractérisé par des cryoturbations datant de la dernière glaciation. Se trouve en effet à cinquante centimètres de profondeur une structure polygonale à unités structurales de section hexagonale, très dures, séparées par des zones meubles où les racines peuvent se développer. Depuis les années 1950, plus aucune régénération naturelle n'est observée. Quelle en est la cause ?

Une étude approfondie a été réalisée afin de mettre en évidence les raisons de l'absence de régénération naturelle en forêt de Soignes. Différents aspects ont été envisagés : la quantité de faines produites par

les semenciers, le pouvoir de germination des faines, la lumière au niveau des semis, l'acidité des sols, la présence de mycotoxines, la prédation des faines par les animaux, ainsi que la compaction des sols. Lors de la dernière fainée, un ensemencement de plus de 1 000 faines au mètre carré a été observé, avec un pouvoir de germination pour plus de soixante pour-cent d'entre elles. Après éclaircie, le problème de la luminosité a été résolu. Aucune influence importante de l'acidité du sol ni de la présence de mycotoxines n'a été observée. Les deux facteurs importants sont la prédation animale des faines ainsi que la compaction en surface des sols due essentiellement à la vocation récréative de la forêt.

Dans le cadre de cet article, nous allons nous concentrer sur l'étude de la compaction et des différentes modalités de travail du sol testées pour remédier à ces tassements. Les essais initiés en 2000 se sont achevés en décembre 2004. Après la présentation de la problématique, le matériel utilisé et l'état des lieux des sols seront détaillés. Les différentes solutions seront par après présentées avec

leurs résultats en termes de compacité du sol et de levée des semis.

Matériel et méthode

Afin de caractériser la forêt, des placettes représentatives ont été sélectionnées en fonction de leur position topographique et des caractères édaphiques. La couverture du sol a aussi son importance, c'est ainsi que des parcelles sur sol nu mais également recouvertes d'un tapis de feuilles, de houlques, de ronces et de fougères ont été sélectionnées. Au total, plus de 350 profils pénétrométriques ont été réalisés sur la base de plus de 7 000 mesures pénétrométriques ponctuelles.

Le pénétromètre (figure 1) est constitué d'une tige au bout de laquelle est fixé un cône. L'effort appliqué pour enfoncer la tige est rapporté à la section de la base du cône. Le résultat obtenu est exprimé sous forme d'une pression et communément appelé « indice de cône ». En représentant cet indice de cône par rapport à la profondeur, on obtient une courbe qui indique l'état de compacité du sol à différents niveaux.

Le capteur d'effort, placé sur la partie supérieure de la tige, mesure la résistance à l'enfoncement, tandis que la position verticale est déterminée à l'aide d'un potentiomètre linéaire. Un vérin électrique commandé par un moteur pas à pas garantit une vitesse de pénétration constante (33 millimètres par seconde) sur soixante centimètres de profondeur quelle que soit la résistance du sol. Un second vérin électrique assure le déplacement horizontal sur un mètre de large. Les déplacements et l'acquisition des données sont gérés par un ordinateur industriel, ce qui rend le système entièrement automatique.

La teneur en eau du sol a une grande influence sur la résistance à la pénétration et il est nécessaire d'en réaliser la mesure lors de chaque essai. Les résultats donnent des valeurs d'indice de cône pour une humidité équivalente à celle du sol ressuyé. Les graphiques présentent sur un mètre de large et soixante centimètres de profondeur les valeurs d'indice de cône définies par l'échelle de couleur. La surface du sol est délimitée par la ligne où les premières pressions sont mesurées.



S. Loyer, CRA -W

Fig. 1 : le pénétromètre conçu au département génie rural du CRA-W

Pour réaliser l'interprétation, il faut savoir que **pour un indice de cône supérieur à trente bars, il est impossible à toute racine de pénétrer dans le sol**. Il faut également noter que ces graphiques ne représentent que des images instantanées d'un phénomène dynamique. Après un épisode pluvieux, lorsque l'humidité du sol est plus importante, les

niveaux de compaction diminuent et le sol s'ouvre alors à la pénétration des racines, mais ceci pour une durée limitée dans le temps. Les graphes présentés ci-dessous définissent les valeurs mesurées lorsque le sol est ressuyé, les zones accessibles présentées par les graphiques proposés le sont tout au long de l'année.

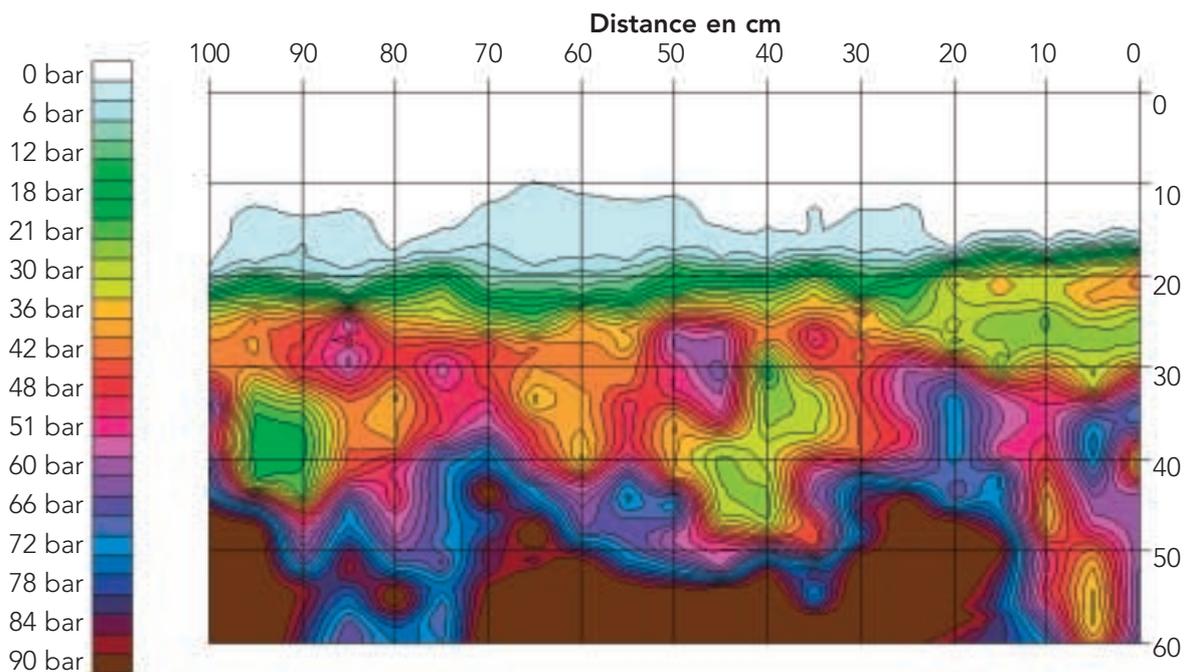


Fig. 2 : état initial du sol

État des lieux

Le sol en forêt de Soignes présente un état fort compacté (figure 2) avec, de plus, une hétérogénéité très grande. Pour des mesures réalisées à quelques mètres de distance, les résultats peuvent varier du tout au tout, mais la plupart des graphes sont semblables à celui présenté dans la figure 2. À deux ou trois centimètres de la surface du sol, un indice de cône d'une valeur de trente bars est déjà atteint, ce qui correspond au jaune dans l'échelle de couleur. Il n'est donc pas étonnant que sur un tel sol, les faines germées trouvent un substrat ne permettant pas à leurs racicules de rentrer dans le sol et de puiser les ressources nécessaires au développement de la plantule. Sur la base de ces observations, différentes modalités de travail du sol ont été envisagées afin d'ameublir le sol et d'aider la régénération naturelle du hêtre à s'installer. Deux d'entre elles ont donné des résultats satisfaisants, il s'agit du travail à la fraise et au cover-crop. Le passage d'un rouleau après fainée n'a eu aucune influence sur la levée et la viabilité des semis. Les essais ont été réalisés avant et après fainée afin de définir le moment le plus opportun pour réaliser les travaux.

Modalité de travail à la fraise

Les travaux ont été réalisés sur des bandes de 2 mètres de large, à une profondeur moyenne d'une trentaine de centimètres avec une fraise à lames.

Hormis une zone située entre les abscisses soixante-dix et cent, la fraise a réalisé un travail uniforme sur trente centimètres de profondeur (figure 3). Le niveau moyen de compaction après travail est de l'ordre de vingt bars ce qui est favorable au développement des racines dans le sol. La couche de sol sous-jacente à la partie travaillée présente un niveau de compaction important.

Lorsque le sol est plus humide, ces zones se montrent moins compactes et permettent alors le passage des racines et la colonisation des horizons à structure polygonale sous-jacents. Les plantes profitent de ces périodes pour réaliser leur croissance racinaire. De manière effective, une bonne levée des semis est observée et ceux-ci ont pour la plupart donné vie à de jeunes plantules, pour autant qu'ils aient été protégés de la prédation animale (gibier, ramiers et pigeon de ville). En final, un tapis diffus d'environ quinze jeunes hêtres par mètre carré prêts à prendre la relève de leurs géniteurs couvre le sol de la forêt. Après quatre années, les plants sont toujours en place, il n'est pas possible à l'heure actuelle de certifier leur viabilité à long terme, mais nous sommes confiants. Si l'on avait réalisé des plantations en ces endroits, le même problème de compaction en profondeur serait présent et les plantations en forêt de Soignes réussissent généralement très bien. D'autres résultats ont été obtenus après le travail du sol au cover-crop.

Modalité de travail au cover-crop

Les travaux ont été réalisés sur des bandes de 2 mètres de large, à une profondeur moyenne d'une vingtaine

de centimètres avec un cover-crop muni de deux fois quatre disques.

Le travail réalisé avec le cover-crop présente un profil différent (figure 4). Le disque pénètre dans le sol à une profondeur de vingt centimètres et ameublisse le sol sur dix centimètres de large pour atteindre un indice de cône de vingt bars. En dehors de cette zone, les vibrations des disques dans le sol ont également un impact ameublissant, mais avec moins d'influence, car une compaction résiduelle d'un indice de cône de trente bars est observée. Un semis dense a levé au niveau des sillons tracés par le disque, alors que seulement quelques plantules clairsemées ont pris naissance en dehors. Ce qui, en observant le graphe pénétrométrique, paraît logique car seul le sillon se montre favorable. Le résultat général de cette pratique se présente comme si un semis en ligne avait été opéré mécaniquement. Bien que ces deux techniques offrent des résultats positifs, ils se montrent qualitativement différents. Laquelle choisir ?

Conclusions

Bien que la levée soit plus dense pour le travail réalisé à l'aide de la fraise, les risques de prédation animale sont plus importants. En effet,

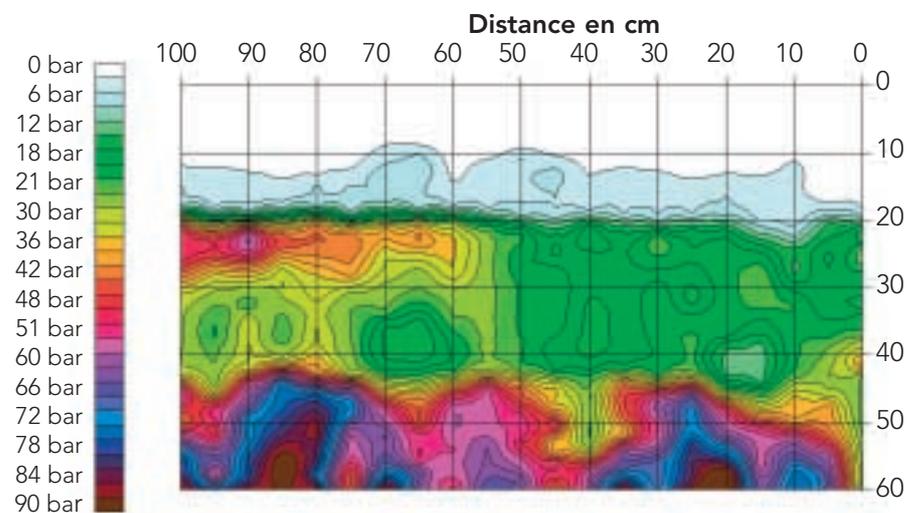


Fig. 3 : parcelle travaillée à la fraise

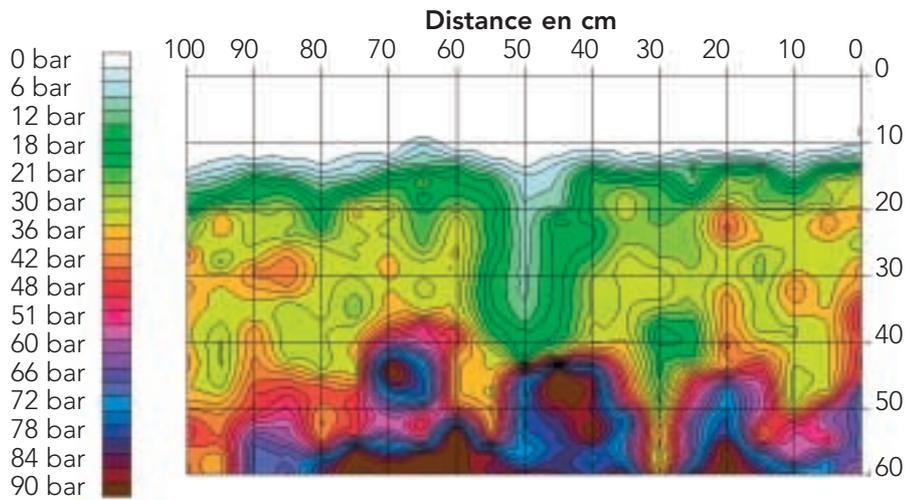


Fig. 4 : parcelle travaillée au cover-crop : on distingue nettement au centre du graphique la trace du sillon d'un disque

la surface du sol est homogène et lisse, alors que celle après passage du cover-crop est plus rugueuse et fort échançrée au niveau du sillon. Dans le deuxième cas de figure, les faines qui tombent à l'intérieur du sillon sont bien protégées, les prédateurs préférant s'enquérir des faines présentes en abondance à la surface du sol.

De plus, les faines situées dans l'échançrure sont en contact avec le sol en plusieurs points, le milieu est bien aéré et la rosée matinale assure une humidité suffisante. La levée est presque assurée pour chacune des faines qui s'y trouvent. La surface du sol après fraisage présente un micro-relief favorable à la germination, car le milieu se trouve bien aéré ; il y a également plusieurs points de contact entre le sol et la faine, mais les conditions d'humidité peuvent ne pas être présentes si l'on se trouve dans des conditions météorologiques sèches.

Dans l'option d'une gestion forestière mécanisée, la seconde alternative présente l'avantage d'avoir le semis de base déjà implanté en bande espacées. Par contre, si l'on souhaite obtenir une forêt d'aspect plus « naturelle », avec une implantation diffuse, la première option semble favorable.

Au niveau des coûts de mise en œuvre, le cover-crop consomme moins d'énergie que la fraise et est plus rapide. En ce qui concerne les systèmes de protection des semis, ceux-ci ne sont pas nécessaires pour le cover-crop, mais sont indispensables pour la fraise.

Quelles que soient les modalités choisies, les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque les travaux ont été réalisés avant ensemencement. En effet, dans le cas de la fraise, l'énergie mise en œuvre est telle que les faines peuvent être abîmées et également se retrouver à trente cen-

timètres de profondeur ce qui n'est pas favorable à la germination. Dans le cas du cover-crop, le sillon étant réalisé après l'ensemencement, il est plus difficile pour les faines de tomber dedans par gravité, il ne reste plus que l'action du vent pour les y emmener.

À l'heure actuelle, les études réalisées ne donnent pas lieu à des modalités définies et réglementées. Mais celles-ci ont été réalisées en collaboration avec les différents gestionnaires forestiers qui ont pu suivre l'avancée des travaux et juger par eux-mêmes de la pertinence de ceux-ci. Ils ont la liberté, en connaissance de cause, de choisir les options qui leur semblent les plus favorables.

En ce qui concerne le maintien et la croissance des peuplements, la forêt de Soignes est une forêt qui est caractérisée par un bon rendement de production. Les mesures proposées pour obtenir une régénération naturelle ne modifient en rien les conditions de croissance des arbres. Une fois le petit coup de pousse donné au démarrage, la forêt de Soignes pourra poursuivre son développement tel qu'elle l'a réalisé depuis toujours.

Stéphane LOYEN

Ministère de l'Agriculture
Centre de recherches agronomiques
Département génie rural
Gembloux (Belgique)
loyen@cra.wallonie.be

Les cloisonnements d'exploitation : pourquoi et comment les protéger ?

Si l'on veut pouvoir limiter au maximum les dégâts aux sols au cours des exploitations forestières, il est indispensable de rationaliser les déplacements des engins pour éviter tout débardage anarchique préjudiciable tant au sol qu'au peuplement. Les cloisonnements d'exploitation sont devenus désormais des dispositifs quasi incontournables pour l'exploitation et l'extraction des produits forestiers. Outre les avantages qu'ils présentent en matière de sécurisation des travaux, ils permettent d'optimiser l'organisation et le déroulement des chantiers, et de préserver la qualité du peuplement en place, en limitant les risques de blessures aux arbres, comme l'avenir forestier de la parcelle, en protégeant les semis et les sols de dégâts bien souvent irrémédiables.

Leur implantation nécessite toutefois une analyse préalable approfondie, car si pratiquement tous les types de peuplements justifient un tel réseau, des précautions s'imposent en fonction, d'une part des caractéristiques de la parcelle et de sa desserte (voir l'article de E. Cacot et D. Pischedda p. 36), et d'autre part des conditions de milieu et en particulier des types de sols. C'est ce dernier point qui sera développé dans cet article, grâce entre autres aux résultats acquis lors d'une expérimentation menée par la section technique interrégionale Nord-Est à la fin des années 1990.

Quels problèmes en sols sensibles ?

Eu égard aux caractéristiques propres des sols, deux éléments majeurs doivent être pris en compte pour décider des modalités d'ouverture de cloisonnements d'exploitation et de leur utilisation : la portance des sols et la libre circulation latérale de l'eau dans la parcelle.

Il faut en effet veiller à préserver le sol des cloisonnements pour :

- maintenir dans le temps une bonne

praticabilité, et éviter ainsi que les engins soient conduits à utiliser d'autres cheminements en contournant les passages dégradés,

- éviter que les effets de passages répétés sur les cloisonnements n'en viennent à compartimer la parcelle et ainsi perturber profondément voire bloquer la libre circulation de l'eau.

Circulation de l'eau

Les diverses études présentées dans ce dossier montrent que le passage répété des engins d'exploitation conduit à une perte de porosité des sols et à la limitation de leur capacité de ressuyage.

Certes, la pénétration limitée aux cloisonnements évite une perturbation généralisée des parcelles, mais outre le défaut d'infiltration verticale de l'eau dans le cloisonnement, celui-ci fortement compacté crée « un barrage » à l'écoulement latéral de l'eau dans les horizons supérieurs du sol. Ce « barrage » peut alors entraîner l'inondation d'une partie de la parcelle en amont de ce cloisonnement. Ce phénomène peut avoir des conséquences tout aussi néfastes alors qu'il n'y a pas eu passage d'engin.

Ainsi, en l'absence de risque d'érosion et en s'assurant de la réelle possibilité de circulation des engins en sol pentu, les cloisonnements devraient être disposés perpendiculairement aux courbes de niveau ou, si l'on préfère, dans le sens de la plus grande pente et cela même sur des sols à faible pente (quelques ‰). Ainsi, ils ne s'opposent pas à la circulation latérale de l'eau. Cette disposition peut même, avec le risque de voir apparaître des phénomènes d'érosion, favoriser l'écoulement de l'eau dans le cloisonnement lui-même. Les phénomènes d'érosion pourront être contenus par la création de petits terrassements (saignées) permettant la sortie de l'eau des cloisonnements.

Portance des sols

La portance d'un sol dépend de sa texture, de son taux d'humidité et de la stabilité de sa structure. Comme cela a déjà été dit, les sols à texture fine sont les plus sensibles aux phénomènes de tassement (et de façon irréversible dans le cas des textures riches en limons) et ce d'autant plus que leur teneur en eau est élevée. Les cloisonnements sur de tels sols deviennent très rapidement inutilisables,



Porteur circulant sur un cloisonnement protégé avec des rémanents feuillus

S. Ruffieux, ONF

p r o t o c o l e

dès lors que le sol n'est pas convenablement ressuyé au moment du débardage. Après quelques passages, en raison de problèmes de portance et de phénomènes d'orniérage, les engins de débardage contournent progressivement l'itinéraire, élargissant le cloisonnement ou en créant un deuxième parallèle au premier qui lui-même devient rapidement inutilisable, etc. : l'effet préventif du dispositif devient alors totalement illusoire.

Ce n'est donc pas parce que la parcelle a été parfaitement cloisonnée que l'on peut autoriser les débardages en toutes saisons et toutes conditions climatiques. Si l'on veut pouvoir conserver des cloisonnements utilisables, il y a lieu de limiter, dans ce cas également, les périodes de pénétration en forêt.

Dans les stations les plus difficiles (en particulier à drainage lent et/ou sol très sensible), les caractéristiques édaphiques doivent conduire à envisager une solution alternative comme le câblage (ce point sera développé dans un dossier ultérieur des *Rendez-vous techniques*), mais la protection physique des cloisonnements peut également permettre de pallier cette difficulté.

Les rémanents d'exploitation : un moyen efficace de protection des sols des cloisonnements

Des expériences menées en Allemagne en peuplements résineux ont montré que le compactage des sols sur les cloisonnements est significativement moindre lorsque les engins roulent sur les couches de branches résineuses. Mais l'intérêt et la faisabilité d'une telle méthode en peuplements feuillus restaient à étudier. En effet, leur branchaison plus hétérogène ne permet pas la réalisation d'un tapis aussi régulier, et risque d'augmenter les phénomènes de poinçonnement du sol (par enfouissement des branches et tasse-

Réalisation d'un dispositif d'étude en peuplement feuillu

Un dispositif expérimental a été implanté en forêt d'Orient (Champagne humide), dans une coupe de taillis de tilleul et de charme d'un TSF, sur un sol limono-sableux à engorgement temporaire, particulièrement sensible aux tassements. L'exploitation a eu lieu en mars-avril, en fin de période sèche : bien que les conditions d'exploitation aient été exceptionnellement bonnes, le sol était frais à 20 cm, et l'eau était présente à environ 1 m de profondeur. Les rémanents, de diamètre maximum d'environ 8 cm, ont été disposés en couches de plus de 75 cm de hauteur sur 3 à 4 m de large. Le débardage a été effectué par un porteur doté de 8 roues motrices, équipé de pneus larges (600 mm) à sculptures peu agressives pour le sol.

Les caractéristiques du sol (densité apparente mesurée à 10 cm, et à 25-35 cm de profondeur) ont été étudiées dans des zones ayant subi les traitements suivants :

- sol non protégé, cinq passages du porteur en charge
- sol protégé avec rémanents, cinq passages du porteur en charge
- témoin = sol non protégé, aucun passage de porteur.

ment localisé), mais aussi les difficultés de circulation des engins.

Un effet protecteur des rémanents de feuillus

Dans les conditions de l'expérience, il ressort que les rémanents feuillus ont un intérêt tout aussi grand que ceux des résineux.

Visuellement après débardage, les branchages ont eu un effet positif sur la surface du sol. Les mesures de densité apparente (tableau ci-dessous) montrent que le niveau de compactage du sol protégé avec des rémanents est intermédiaire à 10 cm de profondeur. En outre, l'effet protecteur des branches est avéré à 30 cm de profondeur, où les densités apparentes du témoin et du sol protégé diffèrent significativement de celle du sol non protégé.

Recommandations pratiques

La mise en place des rémanents de feuillus sur les cloisonnements d'exploitation peut être une technique efficace pour protéger les sols, particulièrement les sols sensibles aux tassements, de faible portance, où une solution alternative par câblage ne se justifie pas. À l'instar des peuplements résineux, la mise en

œuvre en peuplements feuillus nécessite cependant un certain nombre de précautions et contraintes :

- tirer les rémanents suffisamment fins : diamètre 8 cm maximum,
 - disposer en couches d'au moins 75 cm (voire plus, l'engin n'a été mis en difficulté que pour une hauteur d'environ 2 m à franchir).
- Ainsi, la mise en œuvre nécessite une organisation particulière du chantier :
- réaliser un abattage directionnel des houppiers vers les cloisonnements, et le façonnage de ces houppiers en premier lieu pour constituer le lit de rémanents fins,
 - récolter d'abord les bois d'industrie et bois de feu pour disposer de rémanents fins pour les cloisonnements, et n'opérer la sortie du bois d'œuvre qu'ultérieurement.

De par ces contraintes et le peu de parcelles feuillues mécanisées à ce jour, la protection des cloisonnements d'exploitation par des rémanents s'avère essentiellement adaptée aux premières éclaircies.

Claudine RICHTER
Philippe-Éric DURAND

ONF, DT Lorraine
service patrimonial
Nancy
claudine.richter@onf.fr
philippe-eric.durand@onf.fr

	Densité apparente	
	0-10 cm	25-35 cm
Sol non protégé	1,29	1,60
Sol avec rémanents	1,20	1,52*
Témoin (sans rémanent sans passage)	1,07	1,49*

* Différences non significatives au seuil de 1/1 000

La protection des sols : sensibilisation et études en forêt privée

En forêt privée, comme du reste dans l'ensemble des forêts (hormis les milieux montagnards soumis à des aléas drastiques), la protection des sols est une préoccupation relativement récente. Dans cette courte note, on livre quelques jalons chronologiques et les cheminements intellectuels qui ont amené à s'intéresser à cette vaste question, notamment à l'IDF (Institut pour le développement forestier).

Dans les forêts de plaine pas ou peu soumises à l'érosion, c'est la mécanisation de l'exploitation qui a fait apparaître – plus spécialement sur les sols fragiles – les problèmes de dégradation des sols. Dans les forêts privées, le défaut d'investissement dans les fondations du réseau de desserte s'accompagnait de symptômes visuels tels que l'orniérage qui ne laissaient présager rien de bon quant à l'état des sols correspondants dans les parcelles. Sans doute aussi, quelques reboisements de l'après-guerre, financés par le FFN (Fonds forestier national) et conduits avec des techniques lourdes (bulldozers avec lames de terrassement, andainage des bois... et du sol décapé) avaient laissé des parcelles, 20 ou 30 ans après, dans un état qui justifiait la réprobation générale. Mais au-delà de la perception confuse d'une altération du « capital sol », les techniciens forestiers ne disposaient ni des méthodes, ni des connaissances théoriques pour étudier de plus près ce problème et aller plus loin que quelques recommandations très générales. De plus, par tradition, les caractères physiques du sol – d'ailleurs pas ou peu étudiés – n'étaient pas considérés comme une composante de la fertilité.

Études sur les perturbations du sol

Les études sur les perturbations du sol sont peu nombreuses et remontent aux

années quatre-vingt (études du CTBA, Centre technique du bois et de l'ameublement) ; elles sont longtemps restées les seules références sur le sujet. Plus récemment, après la tempête de 1999, des études de cas (évaluation des chantiers d'exploitation, méthodes de diagnostic visuel) ont été menées, notamment par l'Afocel (Association forêt cellulose). L'observatoire post-tempête a aussi apporté et rassemblé de nombreux éléments d'information sur ce sujet, aussi bien sur les facteurs de sensibilité que sur la conduite des travaux et les mesures de restauration.

Il est certain que la compaction des sols a un effet sur l'enracinement des arbres ; ainsi parmi le lot d'études engagées à la suite de la tempête, l'IDF a participé, avec le laboratoire de rhéologie du bois de Bordeaux et le laboratoire de mécanique des solides de Poitiers, à une étude financée par le GIP-ÉCOFOR sur l'ancrage racinaire du peuplier (Dupuy *et al.*, 2003), qui comprenait un volet sur

le comportement mécanique du sol (Charnet, 2003) et son influence sur l'enracinement. Bien qu'issue d'une problématique inverse (influence des facteurs physiques du sol sur le peuplement), la plus grande partie de l'expertise instrumentale réalisée dans le cadre de cette étude reste pertinente pour l'étude de la compaction des sols et de l'érosion. En effet, des investigations exploratoires ont été menées pour comparer économiquement et techniquement les diverses méthodes d'étude ou prestations analytiques disponibles sur le marché : les méthodes simples de mesure *in situ*, comme la pénétrométrie et la scissométrie, couplées avec la mesure des densités apparentes, ont finalement été jugées plus adaptées que les tests de laboratoire sur échantillons ou « éprouvettes », pratiqués en génie civil, comme les essais tri-axiaux, trop coûteux compte tenu du nombre de répétitions nécessaire, et réalisés dans des conditions éloignées de la réalité de terrain.



L'établissement de profils de résistance mécanique des sols permet d'expliquer une grande part de l'enracinement. Ici, tests au pénétromètre sur un sol alluvial de la Garonne, dans le cadre d'une étude IDF sur l'ancrage du peuplier

F. Charnet, IDF

Le problème lié au tassement ne concerne pas que la forêt au sens strict ; ainsi quelques comparaisons ont été faites dans des systèmes bocagers de Bretagne (programme de recherches inter-instituts sur le pâturage hivernal), où les talus de haies et les abords dans les parcelles sont tassés par le piétinement des animaux circulant d'une parcelle à l'autre par des ouvertures : ce piétinement et le tassement qui en résulte sont une cause de régression des haies et empêchent notamment la régénération. Des problèmes identiques se retrouvent dans les pratiques sylvopastorales de forêt paysanne, où l'impact des animaux en parcours dans les forêts comprend les dégâts directs par abrouissements, mais aussi le piétinement du sol et des semis.

Vulgarisation et développement

Dans ce domaine, on peut signaler les réflexions et concertations sur la gestion « durable », commencées à l'IDF et poursuivies au CNPPF (Centre national professionnel de la propriété forestière), en relation avec les ingénieurs spécialisés en environnement des CRPF (centres régionaux de la propriété forestière). On doit ici remarquer que le catalogue des indicateurs de gestion durable, dans sa version 2000, ne mentionnait pas la protection des sols : ce thème figure dans la version actuelle en cours de révision, mais plus sous l'angle de l'aléa érosion que celui du tassement. Les rédacteurs se heurtent en effet à la difficulté de traduire les résultats des recherches sur la dégradation des sols sous la forme d'indicateurs robustes et faciles à noter. Dans ce domaine, les échanges et la réflexion doivent être poursuivis.

Quant au développement de la gestion et la sylviculture durable sous la rubrique du « Management environnemental », et les changements de pratiques qui à terme en résultent pour assurer la protection des sols, il prend une forme différente selon les acteurs de la forêt privée. Les CRPF, organismes de développement et d'agrément

n'engageant pas de travaux forestiers en propre, sont engagés dans une politique environnementale selon la norme internationale de certification ISO 14 001, qui est fondée sur la formation de leur personnel technique, et participent au niveau régional aux séances de travail des agences régionales de PFEC (programme européen des forêts certifiées) afin d'affiner les critères nationaux. À titre d'exemple, on signalera la tenue récente par l'IDF d'une session de formation spécifique sur la « Protection des sols et des eaux » pour le compte du CRPF de Normandie, dont le premier volet (correspondant au 5^e critère d'Helsinki) aborde des sujets tels que l'impact des travaux forestiers sur les propriétés physiques du sol, la lutte contre l'érosion, le point sur les « bonnes pratiques » à préconiser pour préserver les qualités du sol, etc. En marge de ces actions de formation, des études de cas et des actions de recherche destinées à augmenter une base de connaissances encore lacunaire sont prévues, et devraient se développer avec l'intégration prochaine de l'IDF en tant que service d'utilité forestière du CNPPF. L'élaboration de grilles ou de clefs régionales de prévision des risques de compactage en fonction des types de sols, par exemple, apparaît comme une des priorités.

Spécificités du développement des bonnes pratiques en forêt privée

La restauration des sols étant incertaine et coûteuse, c'est la prévention des dégâts qui apparaît comme la meilleure voie pour améliorer la situation. Au-delà des différences fortes qui peuvent exister entre régions forestières, selon les contraintes pédoclimatiques, la structure de la propriété, les modèles de sylviculture et la mobilisation des produits, quelques constatations gardent une portée générale. Chez les petits propriétaires, le développement des cloisonnements est une mesure qui est encore à développer. Mais les clefs du problème sont pour l'essentiel entre les mains des entrepreneurs de

travaux, sans qu'aucune amélioration n'est envisageable. Or, dans beaucoup de régions, il s'agit d'entreprises à effectifs réduits, avec du matériel ancien (tracteurs et débardeurs) et des méthodes de travail où la rentabilité prime sur la limitation des impacts. Les progrès techniques récents en matière de machinisme contribuent donc peu, dans ces situations, à la protection des sols, où le développement doit s'attacher en revanche à l'information et la formation d'un public professionnel peu disponible. Compte tenu de l'ampleur du problème, la certification des entreprises de travaux, qui va pourtant dans le bon sens, jouera encore longtemps à la marge.

Au terme de ce tableau nuancé et parfois circonspect, on prend conscience que beaucoup reste à faire ou à comprendre. Toutefois, la direction est prise, et la plupart des forestiers partagent désormais, après les agronomes, le jugement en forme d'avertissement formulé par le pédologue Jean Boulaïne à l'occasion de son jubilé : « le sol est une ressource non renouvelable ».

François CHARNET

Institut pour le développement forestier
Antenne d'Orléans
Responsable du thème « Qualité des sols et qualité de l'eau » à l'IDF
FCharnet@association-idf.com

Bibliographie

DUPUY L., DRÉNOU C., FOURCAUD Th., 2003. Sols, racines et ancrage des arbres forestiers. Forêt entreprise, n° 153, pp. 39-43

CHARNET F., 2003. L'enracinement des arbres et les propriétés physiques des sols. Forêt-Entreprise, n° 154, pp. 37-43

Conséquences de la sécheresse et de la canicule 2003 : bilan pour les plantations des forêts publiques en 2004

La direction technique de l'ONF (cellule « sécheresse ») en collaboration avec les directions territoriales a lancé en 2004 une enquête nationale sur les jeunes plantations pour faire une première évaluation des conséquences de l'aléa climatique de l'été 2003. Une synthèse des principaux résultats est présentée ici. Chaque direction territoriale a obtenu en retour la base de données et les résultats la concernant.

Tous les personnels de l'Office qui ont contribué à cette investigation sont très vivement remerciés.

Été 2003 : des températures hors du commun



Cet été, le plus chaud que la France ait connu ces cinquantes dernières années, a été significativement plus chaud encore que les records précédents de 1994, 1983 et 1976. Tout le territoire a été concerné à l'exception du Nord-Pas-de-Calais, de la Bretagne, de l'Ouest de la Normandie et du cœur des grands massifs montagneux : Massif central, Alpes, Pyrénées. Une canicule exceptionnelle s'est en outre abattue la première quinzaine d'août dépassant de très loin, par son intensité et sa longueur, ce que la France avait connu depuis 1873.

Un déficit hydrique marqué durant la saison de végétation mais pas exceptionnel sauf dans le Sud-Est et le Nord-Est

Entre le 1^{er} février et le 18 août 2003, la France a présenté un déficit de précipitation sur la quasi-totalité de son territoire avec des précipitations souvent comprise entre 50 à

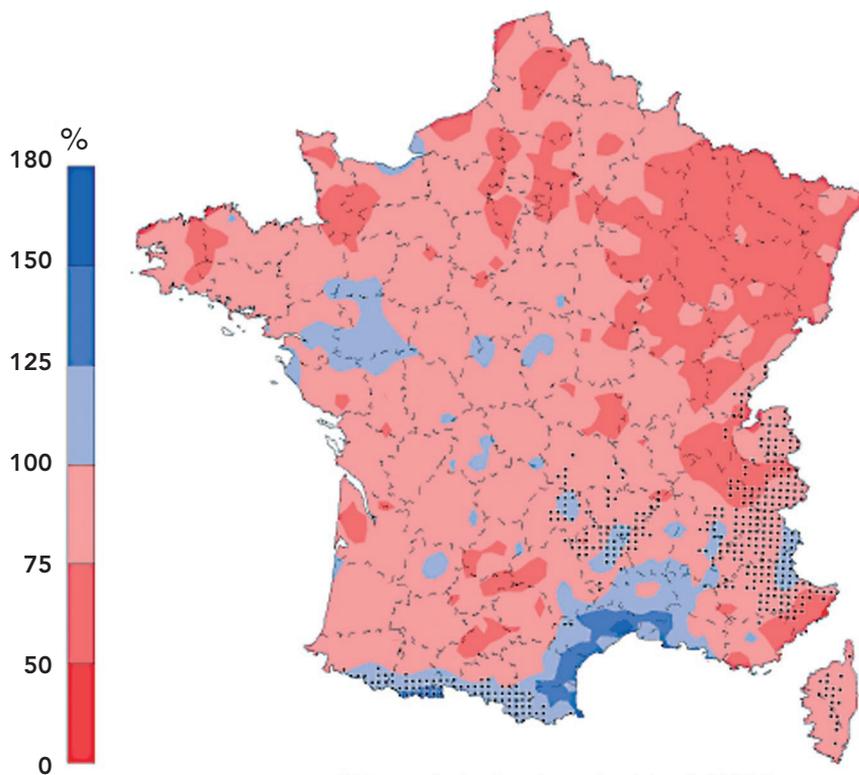


Fig. 1 : comparaison des précipitations aux valeurs normales ; valeurs de l'année 2003 comparées aux normales 1971-2000 (source Météo-France)

80 % des normales, et seulement 30 à 50 % des normales dans le Sud-Est. Mais cet épisode a fait suite à un hiver 2002-2003 bien arrosé, notamment sur la moitié Nord du pays, ce qui n'avait pas été le cas en 1976.

En conclusion, une particularité de l'année climatique 2003 aura été le cumul et l'interaction d'un déficit hydrique significatif et de températures estivales exceptionnelles avec un effet évident sur les forêts mais qui reste à quantifier (Bréda *et al.*, 2004).

Quels ont été les effets de l'été 2003 sur les écosystèmes forestiers ?

Une enquête nationale dans les forêts publiques

Dès la première saison de végétation succédant à cet aléa climatique, les forestiers ont conduit une enquête sur la vitalité des plantations réalisées dans les forêts publiques entre l'automne 1999 et le printemps 2003 (note de service ONF 04-D-254 du 23/04/04). Ces jeunes plantations ont été choisies pour deux raisons :

- elles constituent un indicateur de réaction aux stress climatiques car les plants mis en terre ont un système racinaire peu développé et peu de réserves, contrairement aux semis naturels de même âge et, bien sûr, aux arbres adultes ;
- elles permettent de localiser et d'estimer l'effort de replantations et de regarnis à fournir.

Cette étude est aussi une contribution de l'ONF à l'expertise collective internationale « drought-heat 2003 » (« sécheresse-canicule 2003 ») pilotée en France par le GIP-ÉCOFOR (groupement d'intérêt public pour les écosystèmes forestiers) qui rassemble une plate-forme de chercheurs européens et de gestionnaires forestiers. La « cellule sécheresse » de l'ONF a collaboré avec le DSF (département de la santé des forêts du ministère de l'Agriculture), l'INRA Centre de recherche forestière de Nancy, le GIP-ÉCOFOR et Météo-France.

Sur recommandations de l'INRA et du DSF, les observations ont été faites entre le 15 mai et le 15 juillet 2004. Chaque plantation a fait l'objet d'un diagnostic

quantitatif par sondage. Les plants ont été notés vivants (Nv), morts ou absents (Nm). Le résultat, exprimé en « taux de reprise » (TDR), représente la proportion de surfaces plantées indemnes (plants vivants) :

$$TDR = Nv \times 100 / (Nv + Nm)$$

Ce travail s'est traduit par l'examen d'un échantillon de 2 299 plantations, soit 2 940 ha de forêt domaniale et 4 126 ha de forêt des collectivités, et au total 7 066 ha ; cela représente 44 % de l'effort de plantation de l'ONF entre l'automne 1999 et le printemps 2003.

Résultats de l'enquête nationale

Les résultats présentés ci-après sont issus de l'enquête nationale réalisée par les agents de l'ONF de mai à juillet 2004 en forêt domaniale et en forêt des collectivités, sur les plantations faites entre l'automne 1999 et le printemps 2003.

Répartition des surfaces plantées par direction territoriale

L'examen de la figure 2 permet de mettre en évidence les éléments suivants :

- trois territoires représentent à eux seuls 55 % des surfaces plantées :

Bourgogne-Champagne-Ardenne, Lorraine et Centre-Ouest ;

■ quatre territoires, représentant 37 % des surfaces plantées, montrent des taux de reprise supérieurs à 85 % : Centre-Ouest, Sud-Ouest, Auvergne-Limousin et Rhône-Alpes ;

■ quatre territoires, représentant 58 % des surfaces plantées, ont des taux de reprise compris entre 64 % et 73 % : Bourgogne - Champagne-Ardenne, Lorraine, Alsace et Méditerranée ;

■ la Franche-Comté (5 % des surfaces plantées) affiche un taux de reprise faible de 54 %.

Un taux de reprise très variable dans l'espace

Le taux de reprise moyen à l'échelle nationale est de 76 %, mais cette moyenne masque une grande disparité territoriale : ce taux varie de 95 % sur 45 % des surfaces plantées (3 190 ha) à 13 % sur 5 % des surfaces plantées (350 ha) (voir figure 3).

La proportion de plantations considérées comme indemnes (TDR > 75 %) est de 63 %, celle des plantations partiellement affectées (TDR entre 50 et 75 %) de 22 % (1 580 ha), et celle des plantations endommagées (TDR < 50 %) de 15 % (1 060 ha) comme le montre la figure 3. À noter que les surfaces où le

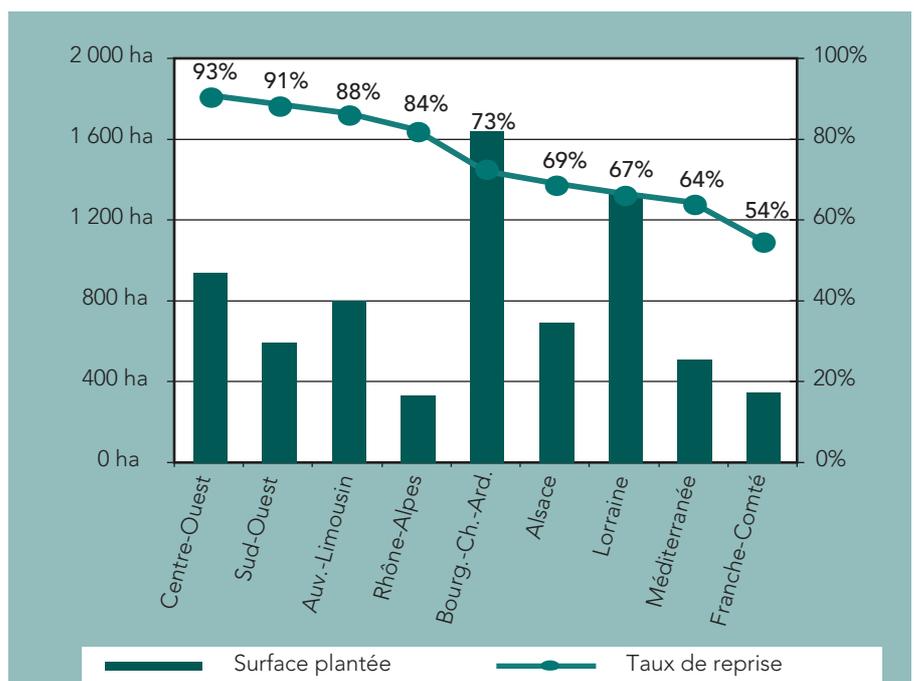


Fig. 2 : surfaces plantées et TDR moyen par direction territoriale de l'ONF

TDR est supérieur ou égal à 80 % représentent 55 % des surfaces plantées et que celles où le TDR est supérieur ou égal à 60 % représentent 66 %.

Enfin, les dégâts de gibier sont signalés comme un problème croissant et très prégnant.

La figure 4 met en outre en évidence :
 ■ un gradient de continentalité : la moitié Ouest de la France est presque indemne de dégâts (TDR moyens supérieurs à 85 %), alors que la moitié Est, à l'exception des Alpes, affiche des TDR moyens compris entre 25 et 74 % ;

■ une veine de dégâts très prononcés autour d'un axe Meurthe et Moselle – Jura (TDR moyen de 41 %), situation proche de celle de cinq départements de la direction territoriale Méditerranée (Alpes-Maritimes, Bouches-du-Rhône, Vaucluse, Lozère, Aude), pour une surface totale de 1 060 ha. Autour, une zone présente un TDR moyen de 65 % pour 1 580 ha principalement en Alsace, Lorraine, Bourgogne - Champagne - Ardenne sans omettre la région Méditerranée (figure 3).

Ces résultats sont à rapprocher du déficit de pluviosité et du déficit hydrologique dans les sols constatés par rapport aux valeurs normales (voir figures 4 et 5). Les territoires déjà en fort déficit en eau dans le sol au 1^{er} juin ont subi une sécheresse très précoce couplée à un fort ensoleillement, et une

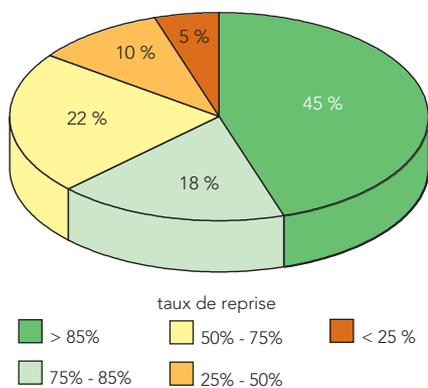


Fig. 3 (à gauche) : répartition des surfaces plantées selon le taux moyen de reprise

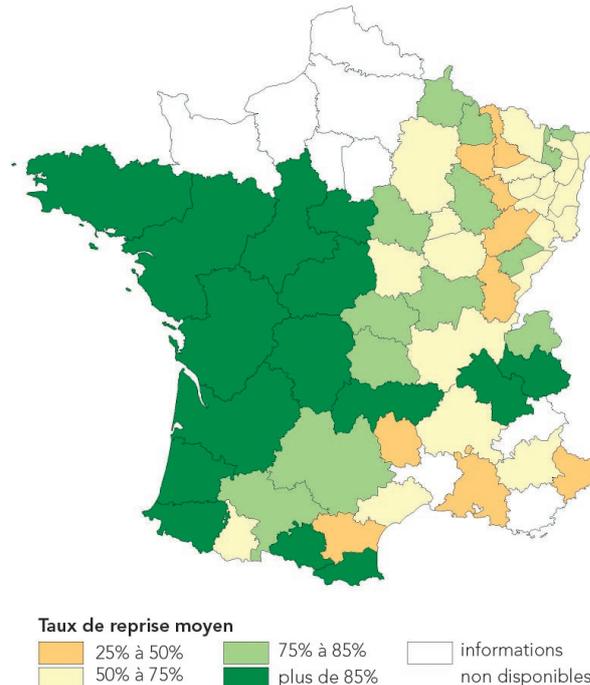


Fig. 4 : taux moyen de reprise par département

évapotranspiration (ETP) élevée au printemps. Ce phénomène est assez peu fréquemment observé à l'échelle nationale.

Bréda *et al.* (2004) ont montré qu'en Lorraine la sécheresse édaphique a été la plus sévère enregistrée au cours des 54 dernières années pour les feuillus. En Alsace, cette sécheresse a été plus forte que celle de 1976.

Sur l'ensemble des plantations prospectées, l'effort total de regarni estimé après une saison de végétation est de 1 900 ha (700 ha en forêt domaniale et 1 200 ha en forêt des collectivités) ; le coût estimé de ces regarnis est d'environ 2 millions d'euros pour la forêt publique.

Comportement des essences

Une variabilité existe entre essences au sein d'une même région. En Alsace, par exemple alors que le TDR moyen est de 69 %, les trois principales essences plantées le douglas, le sapin pectiné, et le pin sylvestre n'affichent qu'un taux de 60 %. Il est intéressant de rappeler que les résineux consomment plus tôt de l'eau que les feuillus, ce qui peut les conduire à des stress hydriques plus graves (Bréda *et al.*, 2004).

Cette variabilité est aussi observée pour des essences semblables dans des régions différentes, même peu éloignées. Pour le chêne sessile, par exemple, le TDR est de 93 % en Centre-Ouest alors qu'il n'est que de 74 % en Bourgogne-Champagne-Ardenne. La situation géographique avec l'intensité de la sécheresse subie est bien sûr un facteur déterminant.

À l'échelle nationale, le taux moyen de reprise par essence (figure 7) varie de façon modérée. Pour le hêtre sensible à la sécheresse et à l'insolation, le TDR est de 68 % alors que pour le pin sylvestre réputé pour sa résistance et sa rusticité le TDR est de 91 %. Ainsi, les résultats reflètent les grands traits de l'autécologie des essences. Les pins, les chênes thermophiles et les autres feuillus (tilleuls, sorbiers...) affichent des TDR compris entre 75 et 92 % alors que le hêtre, le chêne pédonculé, le sapin pectiné et les autres résineux (sapin de Vancouver...) atteignent 52 à 72 %. Quant au peuplier il est un cas particulier, il est installé en plaine uniquement dans les sols profonds très bien alimentés en eau (nappe aquifère proche), il sera donc parmi les dernières essences à

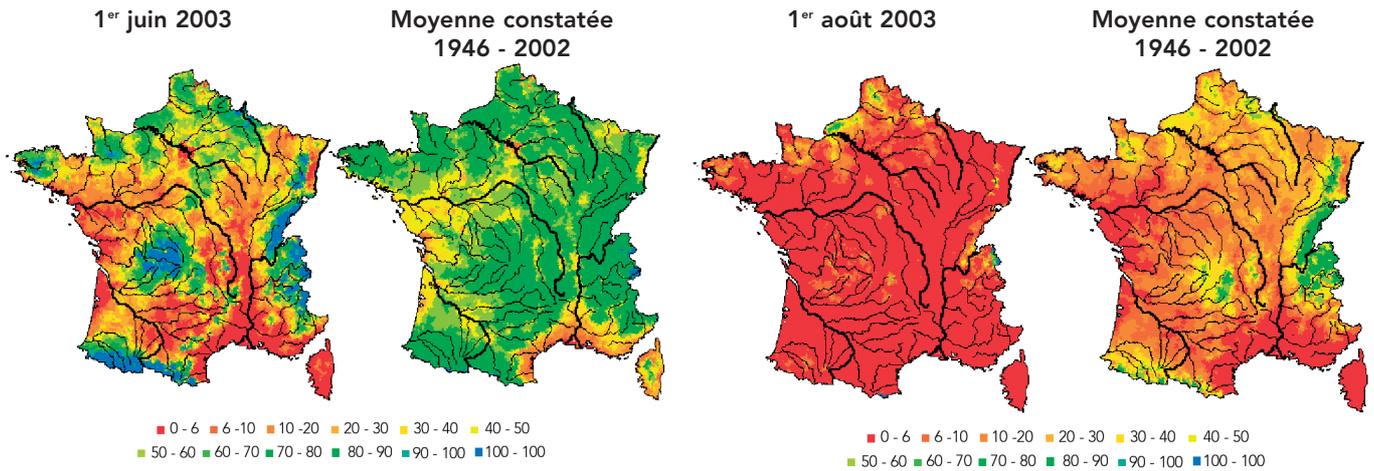


Fig 5 et 6 : état hydrologique des sols au cours de l'été 2003 comparé à la normale constatée entre 1946- 2002 (RNDE, 2003)

L'assèchement des sols est très net par rapport à la moyenne observée depuis 1946 et ce dès le début du mois de juin, en particulier dans les plaines et collines du quart Nord-Est, dans la vallée du Rhône et dans le Sud-Est de la France

souffrir de la sécheresse malgré ses exigences en eau élevées.

Effet de l'époque de plantation

Plus la plantation est récente, et donc proche de l'aléa climatique, plus le TDR diminue. Autrement dit, plus le plant a développé son système racinaire et ses réserves, mais aussi plus il a amélioré son équilibre entre la surface racinaire et la surface foliaire, plus il est résistant à la sécheresse (figure 8).

Il n'y a pas de différence significative entre les plantations d'automne (TDR = 77 %) et les plantations de printemps (TDR = 76 %) sauf en Rhône-Alpes, Franche-Comté et Méditerranée

où l'avantage est clairement aux plantations d'automne. La Méditerranée, qui n'a reçu que 30 à 50 % de ses précipitations habituelles de février à août, a particulièrement été touchée par la sécheresse et la canicule en 2003. La Franche-Comté a connu une sécheresse importante, et les plantations ont concerné de façon privilégiée les stations les plus contraignantes sur le plan édaphique.

Enfin, le taux de reprise est identique entre les surfaces reconstituées après tempêtes par plantation et les surfaces plantées dans le cadre normal de la gestion forestière (TDR moyen = 76 %).

Conclusion

Le taux de reprise (TDR) moyen des plantations faites entre l'automne 1999 et le printemps 2003 est de 76 % au niveau national. On admet, en année normale, qu'une plantation est totalement réussie quand son TDR est supérieur ou égal à 80 % : ces surfaces représentent plus de la moitié de l'effort de plantation considéré. Si les dégâts par mortalité de plants sont bien réels et très sérieux pour 15 % des surfaces plantées, et partiels pour 22 %, il n'y a pas eu de mortalité et de dépérissement généralisés des jeunes plantations dans les forêts publiques à cause de la sécheresse et de la canicule de 2003. Bien sûr, des pertes de vitalité voire de nouvelles mortalités pourront être observées, car l'arbre est un organisme enregistreur qui accumule des stress et réagit de façon différée. Mais il a aussi une capacité surprenante à résister à la sécheresse par des stratégies d'évitement : régulation stomatique pour limiter son évapotranspiration, perte précoce de feuillage par embolie du xylème pour stopper la demande physiologique en eau notamment, efficacité d'utilisation de l'eau qui permet à un arbre de maintenir un certain seuil de photosynthèse, et donc de production de produits glucidiques, alors qu'il a réduit au strict minimum son évapotranspiration...

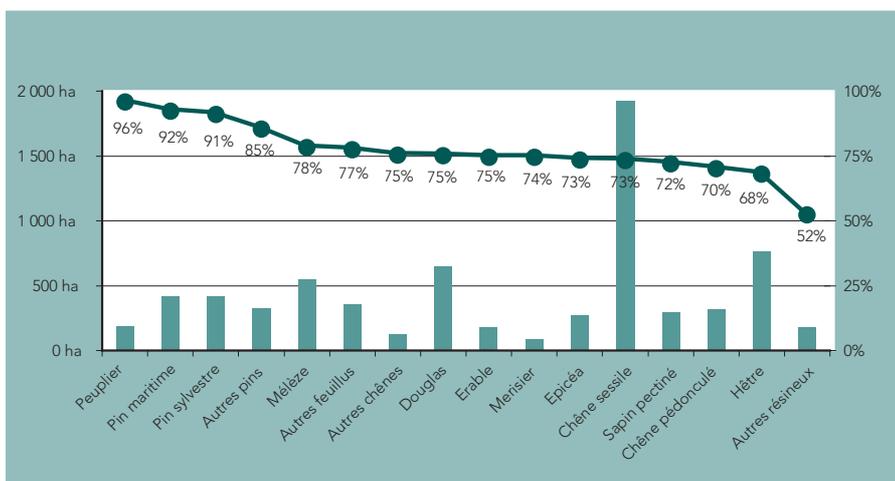


Fig. 7 : TDR moyen des principales essences et surfaces plantées

Les caractéristiques climatiques des prochaines années seront donc déterminantes pour connaître la réponse complète de ces plantations.

Un facteur est prédominant dans la réaction des jeunes plantations au stress : leur âge au moment de l'aléa. Plus elles sont récentes, moins les plants ont développé leurs racines, moins ils peuvent prospecter les ressources hydriques du sol et moins ils ont de réserves glucidiques pour faire face au stress.

L'aléa de l'été 2003 nous rappelle à nouveau à quel point la forêt est dépendante des facteurs climatiques et oblige le forestier à une très grande rigueur et à ne pas transiger sur les principes fondamentaux :

- faire le bon choix des essences selon les stations – le bon arbre au bon endroit – et dans la perspective de nouveaux aléas et des changements climatiques, cela conduit à installer les essences dans l'optimum de leurs conditions écologiques. Dans les stations à alimentation en eau limitée, favoriser les essences tolérantes au stress hydrique.

- Choisir la région de provenance adéquate, si possible locale. Surseoier à la plantation si les graines ou les plants ne sont pas de la provenance adaptée.

- Utiliser des plants de qualité. L'établissement de contrats de culture a l'avantage de fixer clairement les conditions techniques tant sur les caractéristiques du matériel végétal que sur les conditions d'élevage. Privilégier l'utilisation de plants jeunes, les protéger au cours de leur transport, les mettre en terre le plus rapidement possible après réception ou les mettre en jauge. Les protéger du dessèchement sur le chantier de plantation.

- Éviter la plantation en fente. Préférer le potet travaillé qui permet une bonne installation des racines et une reprise de croissance supérieure.

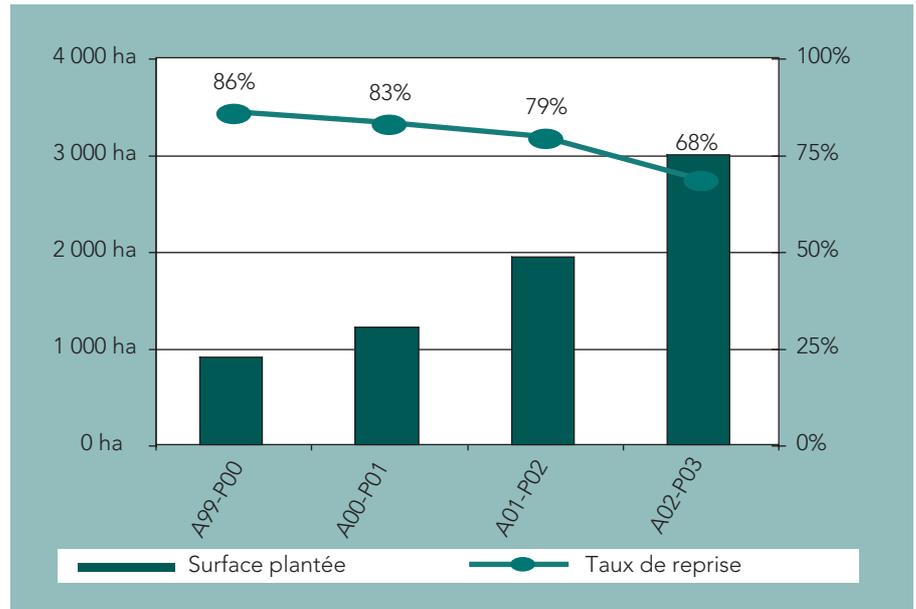


Fig. 8 : TDR et surfaces plantées par campagne, automne (A) - printemps (P) entre 1999 et 2003

Le programme de recherche « post-tempêtes » (2001-2005) piloté par le GIP-ÉCOFOR a conclu à la supériorité des plantations en potet et en godet.

La végétation accompagnatrice peut être favorable (ombrage, appétence pour les ongulés...) ou défavorable aux semis et plants forestiers en particulier à cause de la forte consommation en eau de la végétation herbacée concurrente. Cela doit conduire le forestier à contrôler cette végétation herbacée soit à titre préventif par la sylviculture (bonne gestion de la lumière arrivant au sol) et des exploitations soignées (éviter le tassement du sol), soit par un traitement mécanique voire chimique s'il n'y a pas d'autre solution opérante.

Quant à la réaction des peuplements adultes à la sécheresse et à la canicule de 2003, elle sera analysée après quelques années de recul par les réseaux de surveillance, comme le réseau européen d'observation de la santé des forêts (placettes disposées selon un maillage systématique de 16 x 16 km) et le dispositif RENE-COFOR (réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers). En effet, la réaction des arbres

adultes aux stress climatiques importants ne se fait, par exemple, qu'après 2 ou 3 ans pour le hêtre et le sapin ou 5 à 6 ans pour les chênes.

Frédéric MORTIER
Jean-Claude CHOPART
Thierry SARDIN
 ONF, direction technique

Vifs remerciements à Nathalie Bréda (INRA), Jean-Luc Flot (DSF), Jean-Marie Michon (ONF), Robert de Garidel (ONF) et Erwin Ulrich (ONF) pour leur précieuse collaboration.

Bibliographie

BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. Revue forestière française LVI, 2-2004, pp. 109-131, Nancy

Cartographie au GPS des routes forestières en Alsace : un projet au service de la filière bois

Dans le contexte post-tempête, et au vu des difficultés rencontrées en matière de commercialisation des chablis, la direction régionale de l'agriculture et de la forêt d'Alsace a souhaité disposer d'un inventaire exhaustif des routes forestières alsaciennes pour le transmettre à tous les acteurs de la filière bois, notamment ceux de la première transformation, scieurs, transporteurs et entreprises de travaux forestiers. Ce levé du réseau de desserte devait être global, exhaustif, précis, réalisé directement par GPS, et intégré sous forme numérisée dans une base de données de système d'information géographique (SIG).

Contexte, but et étendue du projet

La forêt avec ses 312 000 ha représente 38 % du territoire alsacien et produit en moyenne 1 500 000 m³ de bois par an. Elle est majoritairement publique (79 %) et relève du régime forestier pour 246 000 ha. La tempête du 26 décembre 1999 a touché significativement 17 000 ha en Alsace (dont 14 700 ha en forêt publique) et occasionné 6,6 millions de m³ de chablis (soit plus de quatre récoltes annuelles). Alors que la difficile récolte des bois renversés et cassés était en cours, le besoin d'une bonne connaissance du réseau de desserte s'est fait sentir. Dans la dynamique budgétaire ouverte par le plan chablis, il a été décidé d'inventorier l'ensemble des routes forestières de la région Alsace pour mettre à la disposition de la filière bois une cartographie numérisée obéissant à une typologie fonctionnelle orientée essentiellement vers l'optimisation du transport des bois.

Les données antérieures étaient connues essentiellement par les aménagements forestiers qui don-

naient pour chaque forêt la longueur des routes, et éventuellement des pistes, sans distinctions typologiques précises. Hormis le fonds cartographique IGN, il n'y avait pas dans le SIG de couche différenciée des routes forestières. D'autre part, aucune agrégation cohérente n'était possible entre les données des aménagements.

L'évaluation du réseau de desserte forestière ne pouvant être qu'approximative, le projet prévoyait initialement une longueur totale de 8 000 km de routes forestières dont 80 % en forêt publique. En outre, il n'y avait aucune connaissance quantitative des liaisons entre les forêts et le réseau des routes publiques.

Technique et moyens adaptés au cahier des charges

Le cahier des charges du projet a exigé que les levés linéaires des routes et des attributs descriptifs ponctuels soient effectués au moyen du GPS. Les données numériques devaient être intégrées dans une base de données de SIG.

Cadre du projet

Partenaires

- Le ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales (MAAPAR), représenté par le service régional de la forêt, du bois et de la chasse (SRFBC),
- l'Office national des forêts,
- l'association Forêt privée d'Alsace (FPA) qui a confié la réalisation en forêt privée à COSYLVAL et BOIS ET FORÊTS 67,
- l'interprofession de la filière bois d'Alsace (FIBOIS).

Financement

L'opération a été inscrite dans le programme cadre régional cofinancé par l'État et le conseil régional d'Alsace. Une convention établie entre l'État (MAAPAR), et respectivement l'ONF et FPA, a défini les conditions de financement suivantes :

- montant du projet : 533 571 € ; soit 455 347 € pour l'ONF et 76 224 € pour FPA,
- subventions : 80 % ; soit 426 856 € pour l'ONF et 60 979 € pour FPA,
- autofinancement de 20 % pour l'ONF et FPA.

Le GPS

L'instrument à choisir devait offrir plusieurs fonctionnalités :

- une précision moyenne métrique dans des conditions courantes d'utilisation. Cette précision paraissait *a priori* possible techniquement et était supérieure aux références cartographiques jusqu'alors utilisées (BD CARTO® *, orthophotoplan *). Il s'agissait donc d'obtenir la meilleure précision possible dans des conditions opérationnelles et économiques acceptables ;
 - la possibilité d'effectuer une correction différentielle par rapport à une station de référence ;
 - la capacité de lever des objets linéaires et ponctuels ;
 - la possibilité d'ajouter un carnet de terrain (figure 1) permettant d'enregistrer les positions et les attributs associés grâce à un dictionnaire de données structurées selon la typologie analysée ;
 - la fixation de seuils de qualité de réception (nombre minimum de satellites, PDOP, et rapport signal/bruit) ;
 - une antenne externe montable sur le toit d'un véhicule grâce à une embase magnétique.
- C'est le modèle PATHFINDER POWER de TRIMBLE qui a été retenu. Il a pleinement répondu aux exigences requises.



Fig. 1 : carnet de terrain du GPS Trimble

Les paramètres de réception du GPS ont été fixés comme suit :

- un minimum de 4 satellites de hauteur supérieure à 15° au-dessus de l'horizon ;
- une fréquence de 1 enregistrement par seconde ;
- un minimum de 15 enregistrements sur une position fixe ;

Repères

- **GPS** (Global Positioning System) : système de positionnement géographique par satellites.
- **PDOP** (Position Dilution Of Precision). Ce paramètre très important du GPS indique la qualité de la répartition des satellites. Un PDOP bas (< 6) indique une bonne répartition. Un PDOP élevé (> 8) est dû à des satellites très regroupés ou trop alignés.
- **Fenêtre satellitaire** : période où les valeurs du PDOP sont favorables aux levés.
- **SIG** : système d'information géographique. Logiciel permettant d'exploiter des bases de données géoréférencées.
- **Orthophotoplan** : image aérienne numérique orthonormée, c'est-à-dire corrigée de toutes les déformations géométriques dues aux conditions de prise de vue et au relief du sol.
- **BD CARTO®** : base de données cartographiques de l'IGN décrivant l'ensemble des informations présentes sur le territoire. L'échelle utilisée dans cette étude est celle de 1/50 000.

- un PDOP maximum à 7.

Ce réglage, associé à la correction différentielle, a permis d'obtenir une précision métrique, tout en offrant des fenêtres satellitaires de durées suffisantes pour les levés.

Le SIG

Les données levées au GPS ont été transférées vers deux stations SIG de l'ONF et de COSYLVAL, équipées des logiciels ARC VIEW et PATHFINDER OFFICE.

PATHFINDER OFFICE, application spécialement dédiée aux GPS Trimble, a été utilisé pour :

- la correction différentielle des données (figure 2) ;
- le filtrage des données selon leur qualité de précision ;
- l'exportation au format utilisé par le SIG.

ARC VIEW, logiciel de SIG couramment utilisé à l'ONF, a servi pour :

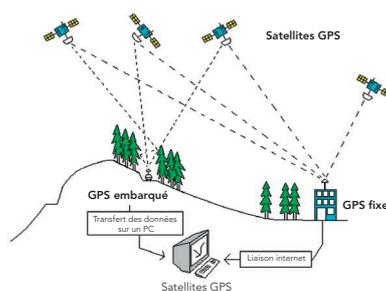


Fig. 2 : schéma de principe de la correction différentielle

- le contrôle de cohérence et de complétude des relevés ;
- la densification et le lissage des tracés linéaires (figure 3) ;
- le traitement des intersections.

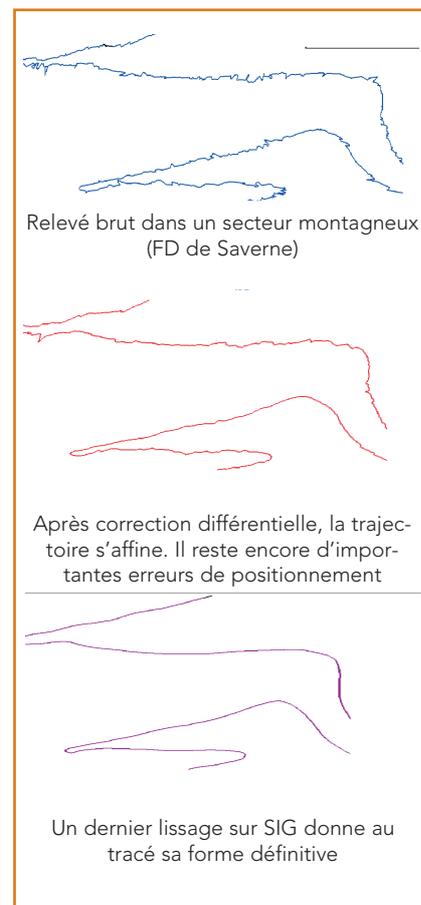


Fig. 3 : lissage des levés linéaires

Le SIG a permis aussi de fournir des fonds de cartes de préparation des levés de terrain (pré-identification manuelle des types de routes et de certaines contraintes comme les barrières), de traiter les résultats et de les intégrer dans une base de données.

Une analyse typologique des données

Les données ont été levées sous deux modes et formats : linéaire pour les routes, et ponctuel pour les attributs descriptifs complémentaires (places et contraintes).

Les routes forestières carrossables

Elles ont été classées en deux types principaux, selon des critères pragmatiques et fonctionnels :

- les routes non accessibles aux grumiers, mais accessibles aux véhicules légers (on pourrait les qualifier de chemins carrossables) ;
- les routes accessibles aux grumiers, avec trois sous-types :
 - revêtues d'enrobé,
 - non revêtues et accessibles par tout temps,
 - non revêtues mais accessibles seulement par temps sec.

Les données ponctuelles

Associées aux routes accessibles aux grumiers, elles informent les usagers sur les facilités de chargement et les contraintes de circulation :

- pour le chargement : place de dépôt, de retournement et mixte ;
- les obstacles et contraintes : barrière ; hauteur, largeur et tonnage limités ; virage serré ; forte pente ; voie sans issue ;
- les intersections de routes ont également été levées afin d'indiquer les jonctions effectives. Elles ont aussi assuré régulièrement des positions plus précises (car issues d'au moins 15 enregistrements) permettant ainsi la détection d'erreurs de positionnement et d'éventuels recalages.

La structure des données est schématisée sur la figure 4.

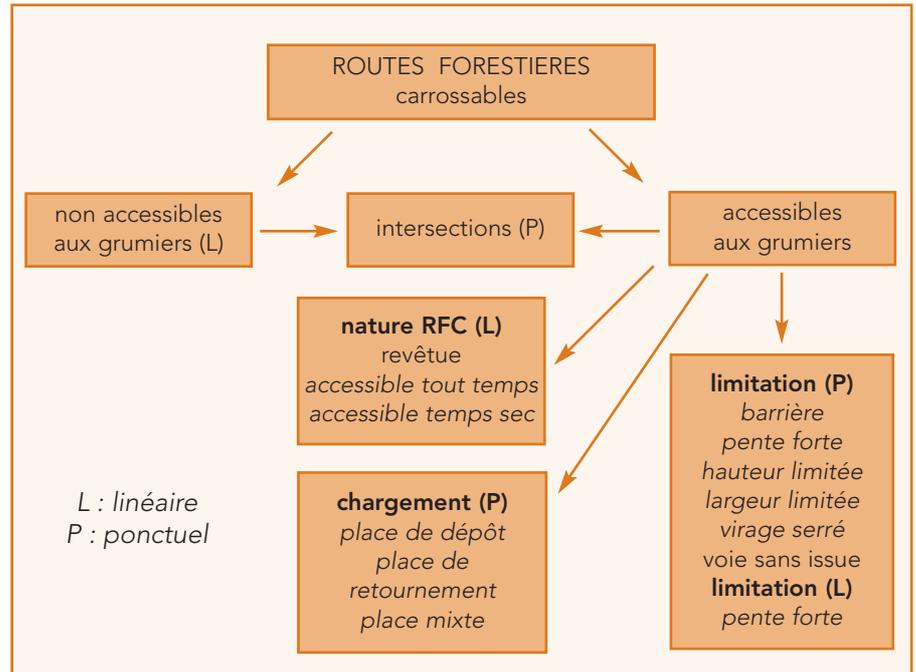


Fig. 4 : diagramme typologique des données

Organisation et moyens opérationnels

Le pilotage

Une équipe de pilotage, regroupant des représentants des partenaires et les responsables du projet était chargée de l'analyse, de la méthode, de l'organisation et du suivi global de la mission.

Tous les travaux (analyse, levés GPS, traitement des données) ont été réalisés en commun entre les acteurs publics et privés, selon l'importance de leurs domaines respectifs. Cette coopération à tous les niveaux dans une organisation unique a permis d'intégrer les données dans une base commune.

Les acteurs opérationnels

Les levés et les traitements de données ont été organisés selon plusieurs niveaux de responsabilités et d'extension géographique :

- 5 techniciens coordinateurs, chacun pour une aire géographique déterminée, étaient chargés de la planification et du suivi des levés, ainsi que de l'appui continu aux opérateurs ;
- 34 opérateurs, spécialement formés au GPS ont effectué les levés ;
- l'ensemble des forestiers de terrain a été impliqué dans la préparation des levés (qualification des routes sur fonds

de cartes géographiques) et l'accompagnement au moins partiel des opérateurs ;

- deux techniciens (des domaines public et privé) spécialistes du SIG et des GPS ont été dédiés au traitement des données du GPS, à leur intégration dans le SIG, et à la production des résultats.

Tous ces acteurs ont été impliqués, par information et formation, dans une vision globale de la mission, et sensibilisés aux enjeux. C'était une condition fondamentale pour la motivation, la rigueur des opérations et donc pour la fiabilité des résultats.

L'ordonnement et le suivi des opérations

Pour assurer une progression et un suivi efficaces des levés, le territoire alsacien a été partagé en 74 secteurs selon des critères topographiques. La programmation a été menée par les coordinateurs, secteur par secteur.

Les opérations ont été ordonnancées comme suit :

- préparation des levés avec les forestiers de terrain, sur fonds de cartes ;
- lever au GPS par les opérateurs. Les levés ont été effectués au moyen des GPS embarqués sur véhicules légers, avec l'antenne fixée sur le toit.

- transfert des données du GPS vers la station SIG ;
- traitement des données sur le SIG, et édition de cartes provisoires des levés ;
- vérification des cartes par le terrain ; corrections des erreurs et levés complémentaires éventuels ;
- retour des corrections et finition sur le SIG ;
- traitement des résultats ; analyse et synthèse ; édition des résultats.

Journée type d'un lever GPS

Rendez-vous sur place entre l'opérateur GPS et le forestier local. Revue d'ensemble de la zone à lever sur la carte de préparation où les routes ont été identifiées selon le modèle typologique.

Établissement d'un programme des levés, pour la journée, en fonction des caractéristiques locales et des éphémérides satellitaires, en cherchant à concilier deux aspects :

- optimiser les trajets pour gagner en temps et en distances ;
- effectuer les trajets difficiles (fort relief et couverts denses) aux périodes les plus favorables du point de vue satellitaire. Si possible, effectuer les tronçons à forte pente en descendant.

Les conditions opérationnelles des levés

En plaine, les conditions satellitaires sont généralement bonnes. Les levés ont pu se faire sans réels problèmes d'attentes ou d'interruptions.

En montagne la tâche est plus ardue. Le relief masque fréquemment plusieurs satellites. Cela produit un effet sur le PDOP qui peut subir des fluctuations importantes sur de courtes distances, dépassant fréquemment le seuil préfixé de 7.

Ainsi les levés ont exigé des opérateurs des qualités certaines de patience et la capacité de planifier efficacement les sorties. Selon les conditions de configuration satellitaires, les opérateurs ont pu lever durant 2 à 10 heures dans une journée. En moyenne, la durée quotidienne des sorties a été de 5,5 heures en plaine et de 4,5 heures en montagne.

Dans certaines zones où les conditions de réception étaient trop difficiles (vallées encaissées et versants exposés au Nord, avec peuplements denses de bois moyens à gros), il a fallu abandonner les levés au GPS sur des tronçons généralement courts (quelques dizaines à quelques centaines de mètres). Les segments manquants ont été raccordés en se basant sur les tracés de la carte de l'Institut géographique national (IGN). En tout, cela n'a concerné que 175 segments totalisant 80 km, soit 0,56 % des routes levées.

Les moyens engagés

Sept GPS Trimble ont été utilisés dans le cadre du projet.

La réalisation a nécessité 1 500 journées, dont 15 % pour le pilotage (analyse, organisation et suivi), 65 % pour les levés de terrain, et 20 % pour le traitement des données.

Pour 14 200 km de routes levées au GPS, les 35 opérateurs ont parcouru effectivement 70 000 km (soit 5 fois

plus) en effectuant plus de 1 100 sorties.

Le traitement des données sur SIG a représenté une part très importante du travail : 1 120 fichiers ont été recueillis ; il a fallu manipuler 26 000 segments de routes (de 550 mètres de longueur moyenne) et plus de 20 000 points (places, contraintes et intersections).

Une connaissance approfondie du réseau alsacien

Consistance du réseau de desserte forestière

Sur le territoire de l'Alsace, le réseau de desserte forestière représente 14 200 km de routes (voir tableau 1), dont 65 % en forêts publiques, 16 % en forêts privées, et 19 % de liaisons hors forêt vers le réseau des routes publiques.

Cet ensemble se répartit entre 11 500 km (81 %) de routes accessibles aux grumiers, et 2 700 km (19 %) de routes non accessibles aux grumiers (mais accessibles aux véhicules légers). Le domaine forestier proprement dit est desservi par 11 400 km de voies carrossables, dont 9 000 km (79 %) de routes accessibles aux grumiers, et 2 400 km (21 %) de routes accessibles seulement aux voitures.

L'ensemble des 14 200 km de routes levées constitue un réseau important en termes de desserte forestière et de coût de gestion. Il est intéressant de le comparer à l'ensemble des routes départementales, nationales, et des autoroutes non concédées totalisant une longueur de 6 500 km en Alsace.

TAB. 1 : LONGUEURS DES ROUTES LEVÉES

Longueurs en km	Total des routes	%	Total	Accessible aux grumiers		accessible aux grumiers	
				Accessible revêtue	Accessible tout temps	Accessible temps sec	Total
Forêts publiques	9 290	65	7 510	850	6 150	510	1 780
Forêts privées	2 320	16	1 710	360	1 210	140	610
Liaison hors forêts	2 620	19	2 300	1 120	8 450	90	320
Total	14 230		11 520	2 330	8 450	740	2 710
%			81	16	60	5	19

La figure 5 visualise un extrait de la cartographie obtenue.

Densités des routes en forêt

Les densités moyennes (voir tableau 2) varient selon les domaines forestiers (public ou privé) et le relief (plaine ou montagne).

Routes accessibles aux grumiers : les densités moyennes sont nettement moins fortes dans les forêts privées (1,6 km / 100 ha) que publiques (3,0 km / 100 ha). Mais la densité dans les forêts à plan simple de gestion est légèrement plus élevée, en moyenne de 2,0 km / 100 ha.

Routes non accessibles aux grumiers : pour l'ensemble des forêts, la densité est de 0,7 km / 100 ha (0,5 en plaine ; 0,8 en montagne). Elle est à peu près la même sur les domaines publics et privés.

En termes d'infrastructure, la densité globale de routes forestières accessibles aux grumiers apparaît relativement satisfaisante avec une moyenne de 2,7 km / 100 ha. Mais ce résultat cache des disparités sensibles, aussi bien localement que globalement, entre propriétaires publiques et privés. Ces derniers sont généralement moins équipés en routes. Globalement, la densité des routes est plus forte de 30 % en montagne qu'en plaine, ce qui est adapté aux contraintes du relief.

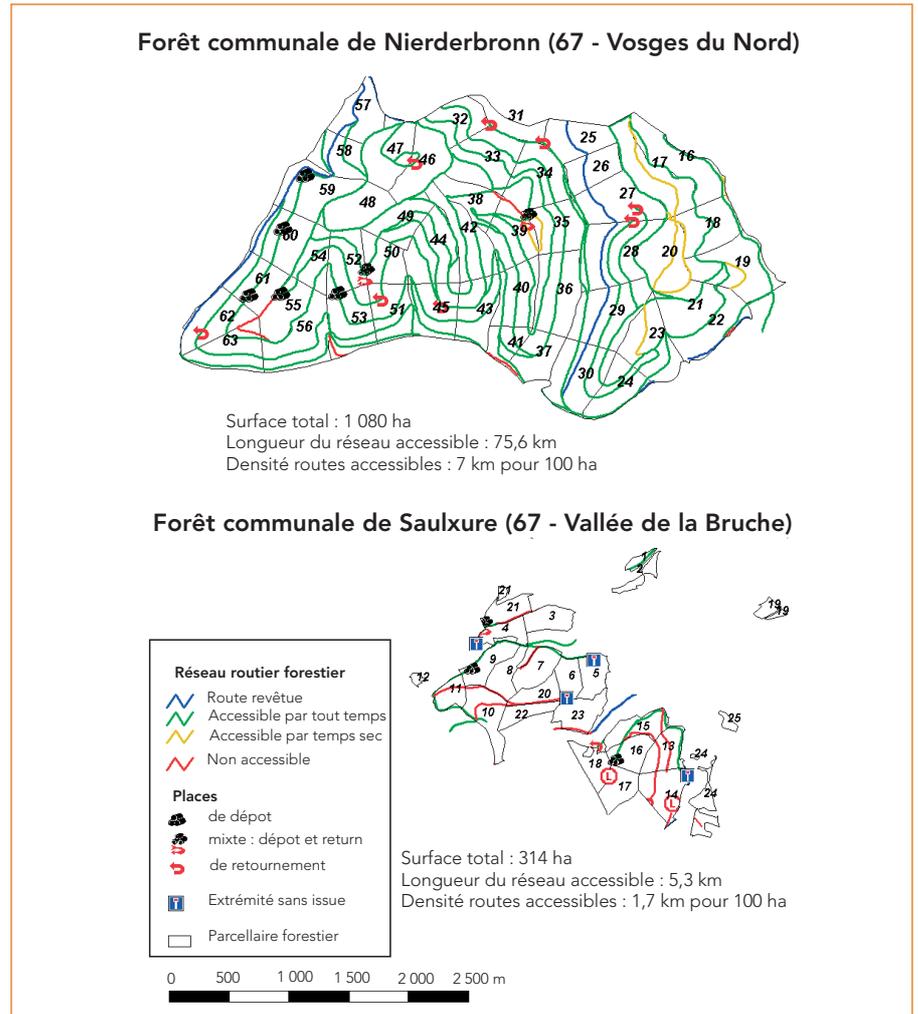


Fig. 5 : extraits de la cartographie des routes au GPS

TAB. 2 : DENSITÉS DES ROUTES EN FORÊT

Densité en km / ha		Toutes forêts	Forêts publiques	Forêts privées
	moyenne	2,6	3	1,6
Accessible grumier	en plaine	2	2,3	1,3
	en montagne	3	3,4	1,8
Non accessible grumier	moyenne	0,7	0,7	0,6

Facilités de stockage et de chargement sur les routes accessibles aux grumiers

Ce sont les places de dépôt, de retournement et mixtes (tableau 3).

Les possibilités de stockage de bois apparaissent insuffisantes en nombre et en taille. La plus grande part des bois reste donc stockée le long des routes forestières sur des quais de taille modeste.

Contraintes et obstacles sur les routes accessibles aux grumiers

Ce travail a montré que le lever des contraintes de transport est assez important et qu'il faut en tenir compte dans l'évaluation de futurs projets similaires (tableau 4). Dans le cas présent, cela représente en moyenne 1 point pour 3 km de route levée.

La présence de ces contraintes est normale en milieu forestier. La plupart des barrières ne sont pas fermées par une serrure et matérialisent simplement une interdiction de circuler conformément au code forestier. Pour les autres, la fermeture doit être mentionnée dans le descriptif des lots de bois.

TAB. 3 : NOMBRES ET SURFACES DE PLACES LEVÉES

	Dépôt	Dépôt et retournement	Retournement	Total
nombre	1 329	1 260	1 813	4 402
surfaces moyennes	5,4 ares	7,1 ares	4,1 ares	5,3 ares

TAB. 4 : NOMBRES DE CONTRAINTES ET OBSTACLES

barrière	hauteur limitée	largeur limitée	tonnage limité	virage serré	voie sans issue	forte pente	total contraintes
1 593	40	39	111	92	2 700	339	4 575

Précision des levés

Des mesures d'écart entre les levés au GPS et d'autres référentiels ont été effectuées (tableau 5).

L'orthophotoplan est la référence la plus fiable pour la comparaison avec les

levés GPS. En zone de montagne, pour 510 échantillons sur 57 km de route, l'écart moyen mesuré est de 1,29 mètre. En plaine, où les conditions satellitaires sont presque toujours bonnes, la précision moyenne doit sensiblement meilleure (en dessous du mètre).

La comparaison avec la BD CARTO® d'IGN traduit une précision moindre de cette dernière et pose le problème de la superposition de cette nouvelle couche de routes forestières, à précision métrique, sur un fond cartographique de précision plutôt décamétrique.

TAB. 5 : ÉCARTS DE MESURES AVEC D'AUTRES RÉFÉRENTIELS

	Nombre de points	Longueur route	Moyenne écarts	Minimum écart (m)	Maximum écart (m)	Écart type (m)	Variance
Orthophoto **	510	57 Km	1,29 m	0,01 m	13,97 m	1,29 m	1,66 m
Cadastre **	194	21,5 Km	2,53 m	0,13 m	26,06 m	2,96	8,70 m
IGN *	2683		6,05 m	0 m	30 m	5,4 m	

* Service SIG de la direction territoriale d'Alsace

** Philippe Herbuvaux, 2002. Valorisation du schéma régional de desserte forestière en Alsace. Mémoire SRFBC

La précision moyenne métrique, qui était visée, a été obtenue.

Les seuils fixés pour les paramètres de réception des GPS, et les traitements de correction différentielle ont permis ce résultat. Ils étaient aussi compatibles avec des durées journalières de levés suffisantes.

Perspectives

La cartographie numérique des routes forestières d'Alsace constitue une base de données exhaustives, précises et typées. Les pouvoirs publics et la filière bois en Alsace disposent à présent d'un outil précieux dont les perspectives d'utilisation concrète se situent dans plusieurs domaines.

L'optimisation de la gestion des flux de bois entre l'amont et l'aval

La mise à disposition des acteurs de la filière bois d'une information exhaustive sur le réseau de routes forestières accessibles aux grumiers doit permettre une mobilisation de la ressource bois dans des conditions optimales.

L'État, au-delà du travail de relevé et de caractérisation de la desserte forestière, a soutenu plusieurs actions destinées à promouvoir les modalités de mise à disposition aux acteurs de la filière bois de la base de données des routes forestières en Alsace.

■ Une maquette d'optimisation de la collecte du bois a été développée par la coopérative COSYLVAL. Elle a été testée en vraie grandeur pendant un an. Deux entreprises de transport de bois ronds (grumes et bois courts) ont été équipées d'un ordinateur portable embarqué dans le camion. La configuration comprenait un GPS fixé sur le toit du camion et connecté au PC, et un logiciel permettant la visualisation du réseau routier sur un fonds cartographique repérant (IGN au 1/25 000). Le protocole de travail est le suivant :

- le donneur d'ordre (gestionnaire forestier, exploitant, scieur) communique au transporteur les positions des lots de bois devant être livrés ;
- cette information est transmise selon différentes modalités : coordonnées Lambert, fichier de positions, etc. Le transporteur, après une brève formation, est en mesure d'intégrer les positions des lots dans le logiciel. Il peut alors visualiser simultanément sa position donnée par le GPS et la position du lot de bois à charger. Les informations sur le réseau routier (type de route, voie sans issue, place de retournement, etc.) lui permettent une navigation assistée vers les lots. Cet ensemble aide efficacement le chauffeur dans son cheminement vers les dépôts de bois ;
- à l'issue de cette expérimentation, la région Alsace a décidé de soutenir finan-

cièrement les transporteurs qui s'équiperont d'une configuration de ce type. Une première tranche d'équipement de 10 camions sera financée en 2005.

■ Mise en place d'un serveur cartographique : FIBOIS ALSACE a été chargé de mettre à la disposition des acteurs de la filière bois les informations relevées dans ce projet de schéma régional de la desserte forestière en ALSACE. Le principe d'un serveur Web a été retenu. Il permettra une consultation en ligne du réseau routier forestier avec un fonds repérant adapté (limite des forêts, parcelles forestières, etc.). Ce serveur devrait permettre à terme à l'ONF et aux gestionnaires privés de publier en ligne les positions des lots de bois mis en vente. Avec ces données, complétées par les informations contenues dans les catalogues de vente, il sera possible, grâce à un moteur de recherche simple, de visualiser la position des lots répondant à des requêtes simples (essence, volumes totaux et moyens, etc.). Cela facilitera la visite des lots. Il est envisagé, dans un deuxième temps, que cette information puisse être transmise aux transporteurs et intégrée dans leur système d'aide à la navigation (figure 6).

La gestion du réseau routier forestier

L'inventaire complet du réseau de routes accessibles aux véhicules légers et aux poids lourds, permet d'envisager une

gestion globale du réseau routier forestier en termes d'amélioration et d'entretien. Une mise à jour régulière doit être prévue pour conserver une base de données opérationnelle et actualisée.

Un cadre pour une amélioration de la desserte au niveau local

Au niveau de petites régions ou de certains massifs forestiers encore déficients en routes, une analyse fine de l'amélioration de la desserte forestière pourra être conduite en s'appuyant sur cette base de données. Elle doit se traduire par l'élaboration de schémas directeurs de desserte forestière qui constitueront le cadre des futurs projets d'équipement routier. Les orientations régionales forestières prévoient la réalisation de dix schémas directeurs en Alsace principalement dans les zones à forte proportion de forêts privées où il y a un déficit d'équipement ; quatre sont déjà réalisés.

L'amélioration de la sécurité

Les forces de secours, de police et d'intervention contre le feu devraient trouver un grand intérêt à disposer de cette base de données du réseau routier forestier. Dans ce domaine aussi, le calcul d'itinéraires optimisés devrait aider, à terme, à porter secours aux victimes et à intervenir contre les sinistres.

Un outil pour le tourisme régional

La mise à disposition, sous une forme à définir, d'une carte du réseau de routes et chemins forestiers accessibles au grand public viendra compléter celles qui sont déjà disponibles pour le réseau des sentiers balisés du Club vosgien. Les acteurs du tourisme disposent là aussi d'un atout pour le développement de l'accueil du public en milieu naturel. Ainsi, le produit de ce projet constitue une trame structurante pour une mise en valeur raisonnée du milieu forestier.

Conclusions

La réalisation de ce projet a apporté une connaissance précise du réseau routier forestier en Alsace dans les massifs publics et privés, et hors forêts pour les liaisons au réseau public.

La technique et le matériel choisis se sont révélés adaptés à l'objectif et aux exi-

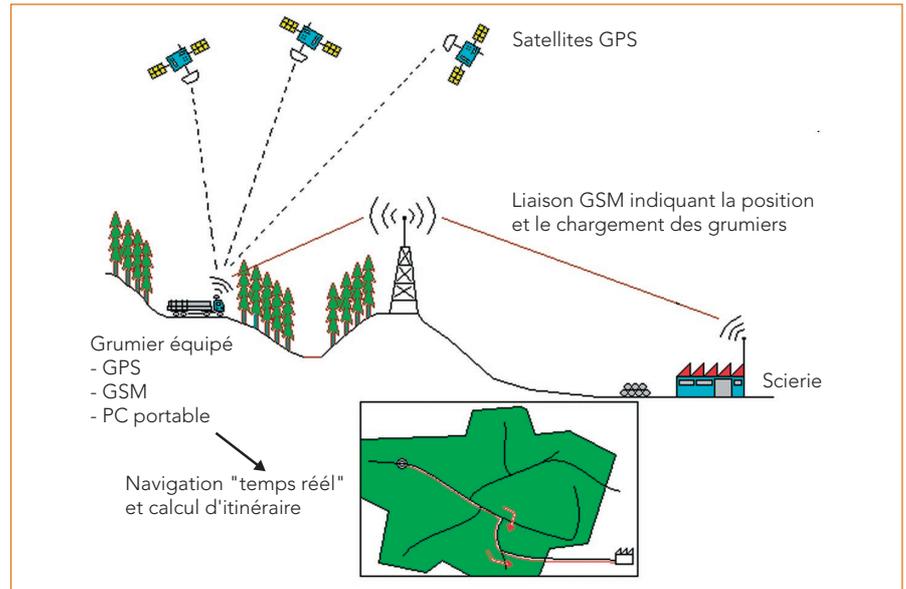


Fig. 6 : schéma de principe de la navigation d'un grumier par GPS

gences du cahier des charges. La précision obtenue, d'ordre métrique, devrait répondre durablement aux besoins de géopositionnement tant pour la gestion des routes que pour l'accès aux forêts des professionnels du bois, des services de secours et d'incendie, ou d'autres usagers. La donnée obtenue est considérée aujourd'hui comme un référentiel pour les autres couches d'informations forestières. Ainsi, lors des révisions d'aménagements, les parcellaires sont recalés sur ce réseau routier. Le classement fonctionnel des routes et le relevé des places de dépôts de bois devraient permettre à terme de faciliter les opérations de logistique. Le relevé complémentaire des chemins secondaires et des liaisons avec le réseau routier public permettra d'utiliser des logiciels de calcul d'itinéraire depuis la scierie jusqu'à la pile de grumes. On peut même imaginer un catalogue des ventes informatisé présentant pour chaque lot, la ou les positions GPS des piles de grumes. Quelques transporteurs travaillent déjà avec un GPS et un ordinateur portable embarqués dans la cabine du grumier, permettant un gain de temps appréciable pour le conducteur. Ce projet a également exigé des forestiers qu'ils élargissent leur champ de vision au-delà des limites de leurs circonscriptions territoriales habituelles, et à situer les problèmes de desserte à une échelle régionale. L'arrivée du GPS et l'apprentissage de son maniement ont constitué un enjeu annexe, mais impor-

tant. Plus d'une trentaine d'opérateurs ont été formés à l'utilisation de cet instrument. La grande majorité des forestiers de terrain ont été, lors des levers, sensibilisés voire initiés à son usage. Depuis, l'outil GPS a intégré un grand nombre de domaines d'activités : aménagements forestiers, opérations foncières, dossiers de financements et de travaux, projets conventionnels très divers, etc. Enfin, et ce n'est pas le moindre intérêt de cette expérience, la collaboration permanente entre les acteurs des forêts publiques et privées a été garante de la cohérence du projet et de l'homogénéité de la qualité des résultats. Elle a montré qu'il y avait bien une communauté d'intérêt et de préoccupations qui s'est exprimée dans une collaboration exemplaire.

Gérard PATZELT

ONF, direction territoriale Alsace
service d'appui technique
chef de projet pour l'ONF
gerard.patzelt@onf.fr

Jean-Louis BESSON

Directeur de la Coopérative forestière COSYVAL et de Bois et forêts 67
chef de projet pour la forêt privée
bois.forêts.67@wanadoo.fr

Laurent GAUTIER Pierre GELDREICH

ONF, direction territoriale Alsace
service d'appui technique

Plantation en milieu acide hydromorphe. Quelles méthodes ? Quels résultats ? Quel avenir ?

La plantation en milieu acide hydromorphe est une opération délicate, du fait des contraintes liées à l'engorgement. Un ensemble de trois essais, visant à améliorer les techniques de préparation du terrain, a montré l'effet prépondérant d'un traitement herbicide sur la croissance des plants par rapport aux techniques de travail du sol.

Le contexte et les motivations des essais de techniques de préparation de sol

Le contexte stationnel

La plantation en milieu acide hydromorphe est une opération délicate. En effet, les sols sont souvent détrempés lors de la mise en place des plants, et la végétation herbacée, à base de molinie notamment, est très concurrentielle, surtout vis-à-vis de l'eau : lors de l'enracinement du jeune plant de chêne ou de pin, la prospection se fait dans le même horizon que la graminée, et le jeune plant peut très vite dépérir lors d'un printemps ou un été sec, ce qui n'est pas rare dans notre secteur ligérien (voir encadré ci-contre).

Le contexte historique et technique

Jusqu'à une époque relativement récente (1990 environ), les méthodes de plantation et plus généralement de gestion forestière sur ces stations acides étaient lourdes et coûteuses. La préparation du sol consistait souvent en un traitement herbicide suivi d'un labour croisé, parfois accompagné d'un billonnage permettant aux racines des jeunes plants d'être « au sec ». Nous ne nous attarderons pas sur la multitude d'autres travaux éventuels, comme l'assainissement, l'engrillagement, sans oublier le dessouchage.

La question se posait donc de savoir si de tels travaux étaient indispensables pour obtenir une reprise et une croissance des régénérations satisfaisantes, ou si des interventions plus limitées, moins perturbantes et moins coûteuses, n'étaient pas suffisantes.

Tel était le but de ces essais installés en forêts d'Orléans et de Vierzon.

Les caractéristiques des trois essais

L'implantation des dispositifs expérimentaux

Deux des trois essais ont été installés en forêt d'Orléans. L'un concerne le chêne sessile, l'autre, le pin laricio. Les modalités de préparation du sol testées sont les suivantes :

- travail du sol à plat : labour croisé au cover-crop lourd (modalité L) ;
- travail du sol à plat, avec application préalable d'un herbicide contre la molinie : débroussaillage en juillet 1988 au glyphosate, complété en mars 1989 par un traitement antigerminatif de simazine et d'atrazine (précisons que ces deux dernières substances actives sont maintenant interdites en forêt) (modalité LP) ;
- billonnage au cover-crop lourd, avec application préalable d'un herbicide telle que précédemment (modalité BP).

Chaque modalité a été répétée au moins deux fois dans des conditions stationnelles équivalentes, grâce au système de « blocs ».

Le troisième essai, situé en forêt de Vierzon et implanté quelques années plus tard, concerne le chêne sessile uniquement, avec des modalités de préparation de terrain légèrement différentes. En particulier, l'application d'un herbicide seul a été testée, car elle semblait expliquer en grande partie les différences de croissance constatées sur les deux essais précédents. Quatre modalités ont ainsi été testées :

- application d'un herbicide uniquement : traitement en plein de la molinie au glyphosate (modalité P) ;
- application de l'herbicide telle que précédemment et labour en plein au cover-crop lourd (modalité PL) ;
- même préparation, mais avec billonnage (modalité PLB) ;
- technique traditionnelle (de l'époque !), qualifiée de « locale » : préparation complète du terrain (application d'un herbicide, labour, billonnage, dessouchage à la pelle Becker) (modalité PLBD).

Chaque modalité est répétée quatre fois afin de contrôler la variabilité stationnelle. En outre, pour chacune des modalités, un placeau non planté est conservé pour observer l'évolution naturelle de la

Les stations en forêt d'Orléans (45)

Elles sont définies et décrites dans le catalogue des stations forestières de l'Orléanais (A. Brêthes, 1993). Les substrats sont majoritairement constitués de sables surmontant des formations argileuses. Les principaux facteurs influençant la croissance des essences sont la profondeur d'apparition du plancher argileux, la nature de ces argiles et leur état de structuration, et l'intensité et la profondeur d'apparition de l'hydromorphie. Dans ce contexte, la microtopographie a de fortes incidences sur la fertilité et modère une mosaïque de stations très variées.

Les stations de la zone d'implantation des essais sont de type SC ou SE, ce qui correspond respectivement à des niveaux argileux se situant entre 40 et 70 cm de profondeur ou à plus de 70 cm, et à des niveaux d'engorgement limités. La végétation est dominée par la fougère-aigle et la molinie, cette dernière pouvant être très abondante dans les peuplements ouverts.

Dans tous les cas, ces caractères ne constituent pas une contrainte forte pour la croissance du pin laricio de Corse et du chêne sessile, ce qui justifie le choix de ces essences comme essences-objectif. En revanche, l'installation des plants pose un réel problème.

Les stations en forêt de Vierzon (18)

Elles sont définies et décrites dans le catalogue des stations forestières de la Sologne (F. Charnet, 1994). Les stations rencontrées sont de type SAx-1 correspondant à des planosols très acides, fortement hydromorphes, développés dans des sables surmontant des argiles à silex (profondeur des argiles entre 50 et 100 cm). La végétation est dominée par la fougère-aigle et la molinie, cette dernière pouvant être très abondante dans les peuplements ouverts.

Ces deux ensembles de stations présentent donc des contraintes assez proches. Simplement, les stations en forêt de Vierzon ont un engorgement plus prononcé que celles de la forêt d'Orléans.

D'après le guide des sylvicultures de la chênaie atlantique (P. Jarret, 2004), ce type de stations représente 16 % de la surface des forêts domaniales atlantiques, soit environ 28 000 ha. La gestion de ces chênaies acidiphiles hydromorphes constitue donc un réel enjeu à l'échelle du bassin de production.

végétation, mais dans des conditions stationnelles un peu différentes.

Les mesures réalisées

Le suivi des trois essais est détaillé dans le tableau 1. Il a porté sur la mortalité et la croissance en hauteur des plants. Le suivi de la plantation de chêne d'Orléans a cessé en 1997, car des abrouissements très importants ont fortement perturbé l'essai. Un suivi floristique selon les coefficients

d'abondance-dominance de Braun-Blanquet a également été réalisé sur les trois essais.

Des résultats spectaculaires sur la croissance en hauteur

Nous présentons ici les résultats issus de l'ensemble des trois essais, en ce qui concerne le taux de reprise et la croissance des plants d'une part, la flore d'autre part.

Taux de reprise : léger avantage à la modalité billonnée

Si, comme nous l'avons vu, les conditions édaphiques ne sont pas défavorables à la croissance du pin laricio et du chêne sessile, en revanche, l'hydromorphie et la forte végétation concurrente (100 % de recouvrement en molinie) représentent des conditions difficiles pour l'installation des plants.

TAB. 1 : LE SUIVI DES TROIS ESSAIS

Suivi	FD Orléans Pin laricio	FD Orléans Chêne sessile	FD Vierzon Chêne sessile
Date de plantation	Avril 1989	Novembre 1988	Mars 1998
Date des dernières mesures de mortalité et hauteur	2002	1997	Fin 2002
Nombre d'années de mesures après plantation	13	8	5
Date des derniers relevés floristiques	1995	1995	2003
Nombre d'années de suivi floristique	6	6	5

TAB. 2 : TAUX DE REPRISE SUR LES 3 ESSAIS

Les trois essais	FD Orléans Pin laricio	FD Orléans Chêne sessile	FD Vierzon Chêne sessile
Modalités	Taux de reprise à 8 (et 13) ans en %		Taux de reprise à 5 ans en %
L	62 (59)	70 (ND)	
P			79
LP	66 (63)	74 (ND)	79
BP	85 (84)	87 (ND)	
PLB			73
PLBD			94

Sur Orléans, on observe de fortes disparités dans la reprise des plants, mais celles-ci ne sont malheureusement pas significatives sur le plan statistique. **Seul le billonnage permet une reprise économiquement acceptable, de l'ordre de 85 % pour le chêne et le pin. L'emploi d'un herbicide ne semble pas améliorer la reprise des plants.**

Sur l'essai de Vierzon, la reprise est assez comparable à celle d'Orléans (81 % en moyenne après 5 années de végétation), sans différence significative entre modalités. **Les travaux lourds du sol n'améliorent pas la reprise des plants** (voir tableau 2).

Une croissance en hauteur nettement améliorée dans la modalité « herbicide »

Pour le pin laricio et particulièrement pour le chêne, nous avons constaté des différences très importantes de croissance des plants (supérieures à 1 m en 8 ans) entre les modalités avec herbicide et la modalité sans herbicide des deux essais d'Orléans (voir figures 1 et 2). C'est pourquoi nous avons pris soin d'effectuer un contrôle complémentaire des stations au cours de l'été 2004, afin de détecter un éventuel biais stationnel. Ce contrôle fin, comprenant la réalisation de fosses, n'a révélé aucune différence de nature à justifier par des caractéris-

tiques stationnelles les différences de croissance observées.

Sur Vierzon, il n'y a pas de différence significative de croissance entre modalités (16 cm/an sur 5 ans en moyenne), qui comportent toutes un traitement chimique. L'effet prépondérant du traitement herbicide sur la croissance des plants est ainsi conforté.

S'il ne permet pas d'améliorer le taux de reprise, l'emploi d'un herbicide permet en revanche d'améliorer durablement la croissance en hauteur des plants, alors qu'il n'est intervenu qu'une fois lors de la préparation du sol.

En pratique, ce « bonus » de croissance permettrait donc non seulement d'économiser un ou plusieurs dégagements, mais aussi de mettre les plants plus vite à l'abri de la dent du gibier. Si nous ne constatons pas de fléchissement de la croissance en hauteur des plants avec le recul dont nous disposons sur ces essais (voir tableau 1), peut-on dire cependant que l'application d'un herbicide permet également d'améliorer la production ? Pour l'instant, nous ne pouvons conclure sur ce point, c'est pourquoi des mesures sur les derniers accroissements courants en hauteur (période 2002-2005) sont prévues prochainement.

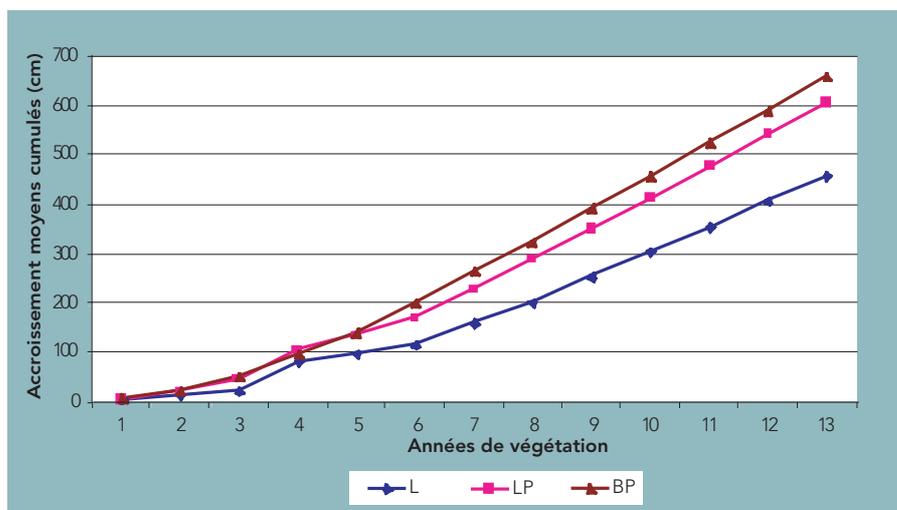


Fig. 1 : évolution de la hauteur totale entre 1989 et 2002 pour le pin laricio de Corse. Après 13 ans de végétation, les plants de pin Laricio ayant bénéficié d'une préparation chimique du sol à l'aide d'un herbicide (modalités LP et BP) ont gagné 1,5 à 2 m par rapport à ceux n'en ayant pas bénéficié (modalité L)

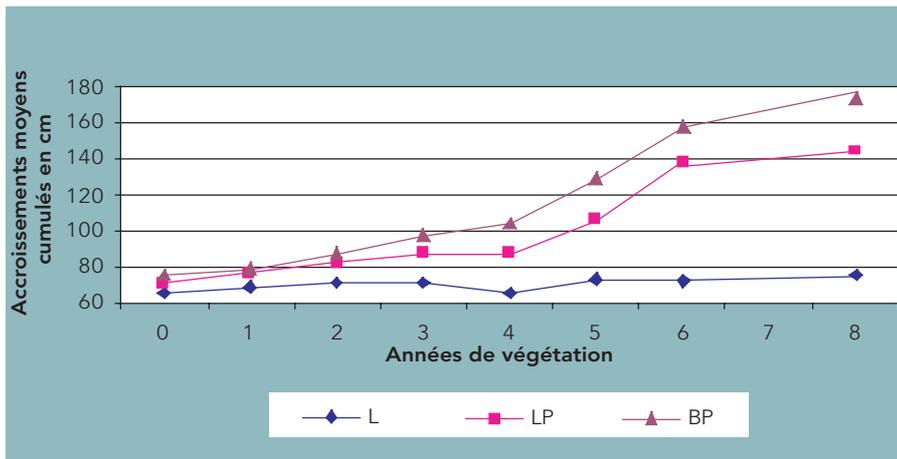


Fig. 2 : évolution de la hauteur totale entre 1989 et 1997 pour le chêne sessile. Après 8 ans de végétation seulement, les plants de chêne sessile des modalités « traitées » (LP et BP), ont gagné environ 1 m de hauteur par rapport aux plants de la modalité L.

N.B. : l'absence de croissance dans la modalité L s'explique par la concentration d'importants dégâts de cervidés dans cette modalité, alors que la pression du gibier était plus uniforme entre modalités dans les premières années de la plantation. Les abrouissements se sont donc concentrés sur les pousses les plus facilement accessibles, et ne sont pas responsables des différences de croissance constatées

Une végétation accompagnatrice modifiée par les lourds travaux du sol

L'analyse floristique sur les trois essais montre que l'effet de l'herbicide sur la végétation concurrente est fugace, puisque quatre ans après, le taux de recouvrement de la molinie est redevenu supérieur à son état initial. Ce qui ne signifie pas qu'il faille traiter de nouveau ! Si l'effet *visuel* de l'herbicide a disparu, il permet un gain de croissance *durable*, car il faciliterait grandement l'installation d'un système racinaire plus développé.

Concernant les effets sur le reste de la végétation accompagnatrice, l'analyse montre que les travaux lourds du sol modifient durablement la végétation initiale, en favorisant le genêt et la callune, alors que la diversité ligneuse, à base de charme et de chêne pédonculé, est préservée dans la modalité non travaillée (avec herbicide). Cinq ans après le traitement herbicide, on ne constate pas de réelle inversion de flore, mais une simple réduction globale du recouvrement.

Que ce soit pour la croissance ou l'installation des plants, les coûteux travaux du sol ont montré leur inutilité. En revanche, le traitement herbicide permet un gain de croissance durable, ne perturbant que temporairement la végétation accompagnatrice potentielle.

Ce qui nous conduit à dire que rien ne sert de dépenser plus, il faut intervenir à point : la modalité herbicide seul en traitement préalable permet ainsi d'obtenir le même taux de reprise que la modalité la plus lourde en interventions et donc la plus coûteuse !

On peut néanmoins légitimement se poser la question de l'utilité de ce traitement par rapport à l'absence totale de travaux préparatoires (ce qui coûterait encore moins cher !). Les placeaux d'observation de Vierzon montrent en effet une régénération

naturelle fournie, dont la croissance en hauteur est importante. Cependant, on constate qu'il s'agit essentiellement de semis de chêne pédonculé, issus de la futaie sur souche de chêne pédonculé dépérisante et récoltée en coupe rase. Cette essence n'étant pas souhaitée sur ce type de station à fort dessèchement estival, la transformation du peuplement a donc été réalisée. Le traitement herbicide semble donc être l'intervention minimale permettant d'assurer l'installation de l'essence-objectif choisie, en l'occurrence le chêne sessile.

Ces observations nous conduisent à réfléchir plus largement sur les récentes évolutions des techniques sylvicoles en contexte stationnel difficile.

Quelques réflexions sur les techniques sylvicoles

Une réflexion à mener sur les objectifs sylvicoles dans un contexte stationnel difficile

Proscrire les travaux lourds du sol

Les essais précédents nous montrent que non seulement les travaux lourds n'apportent pas de gain significatif de reprise ou de croissance des plants, mais engendrent des effets négatifs. Ils déstructurent les horizons superficiels du sol, dont nous savons actuellement qu'il est primordial de les conserver en bon état. De plus, ils éliminent la végétation potentiellement accompagnatrice (charme, bouleau...) et favorisent la germination d'espèces concurrentes, comme la callune par exemple (risque de substitution de flore). Ces remarques se vérifient particulièrement dans le cas du dessouchage, qui perturbe les sols en surface, mais aussi en profondeur. Dans des stations plus sèches que celles évoquées ici, on peut pratiquer des interventions assez légères, comme par exemple la plantation en potets travaillés dans le recru, lorsqu'il existe.

Pratiquer des dégagements « sales »

Les dégagements ne doivent pas chercher à ne laisser que l'essence-objectif sur la parcelle. Sur les stations délicates, on a en effet tout intérêt à recouvrer le plus vite possible une ambiance forestière, qui participera naturellement à la résorption des herbacées concurrentes favorisées par l'ouverture des peuplements. On pourra par exemple au stade juvénile garder en mélange d'autres essences comme le pin sylvestre, et pratiquer des dégagements manuels en cheminée, mettant en lumière la partie supérieure des houppiers.

Faire évoluer les modes de traitement

La réussite de la régénération sur de grandes surfaces reste un pari risqué sur ces stations acidiphiles hydromorphes, conditionné par une préparation de terrain adéquate et opportune. En outre, nous avons constaté que les stations les moins productives engendraient souvent les investissements les plus élevés. D'autres modes de traitement, tels le renouvellement par trouées ou la futaie irrégulière, peuvent constituer des alternatives intéressantes. Les stations sont en effet très souvent en mosaïques, et liées étroitement à la microtopographie, qu'il n'est pas possible d'identifier physiquement sur le terrain.

Il s'agit là de nouveaux axes de recherche-développement.

Pour un emploi raisonné des herbicides en forêt

Avec un recul de près de 30 années d'utilisation des herbicides, nous sommes arrivés aux préconisations suivantes.

La réalisation d'un diagnostic avant intervention est essentielle. Actuellement, dans la direction territoriale Centre-Ouest, il existe principalement deux cas où l'utilisation d'un herbicide est justifiée, en fonction de l'importance de la végétation concurrentielle et de sa dynamique de développement :

- lorsque les blocages écologiques durables sur des stations acidiphiles et acides hydromorphes (chênaie ou pineraie acidiphile hydromorphe) ne peuvent être résolus pour l'implantation de la régénération sans l'usage d'un herbicide, comme le forexone contre la molinie par exemple (substance active : quizalo-P-éthyl),

- lorsque l'emploi d'un herbicide apporte une économie substantielle :
- le traitement de la fougère-aigle au fougerox par exemple (substance active : asulame) est bien plus économique que des interventions mécaniques répétées.

D'autres critères sont également pris en compte, comme :

- la biodiversité (présence d'espèces fragiles) et le réseau hydrographique (ruisseaux, fossés, mares...) : on n'optera pas pour une méthode chimique si les risques écologiques sont réels,

- la topographie, la portance des sols et l'accessibilité des parcelles.

Aussi le recours aux herbicides en forêt reste-il très limité et seuls quelques contextes stationnels pour des parcelles productives ou des interventions en « génie écologique » justifient son usage.

Ensuite, lorsqu'il décide d'intervenir, le forestier raisonne l'intervention au regard du diagnostic. Ainsi :

- il préfère une préparation ou un dégagement classique lorsque les conditions s'y prêtent, et il réserve l'outil herbicide aux cas où les interventions mécaniques sont inefficaces et coûteuses (graminées et fougères) ;

- il utilise des produits homologués pour l'usage qu'il vise : une liste révisée annuellement définit les produits autorisés et les conditions d'utilisation (note de service annuelle) ;

- il réalise les traitements dans des conditions optimales, avec des personnels formés et compétents, et dans le respect de la réglementation et des mesures d'hygiène et de sécurité.

La recherche montre que l'usage occasionnel (une fois en 100 ou 200 ans) et raisonné des herbicides (respect des

doses homologuées, réduction des surfaces traitées aux seuls cas où il est nécessaire) permet de contrôler avantageusement la végétation tout en respectant l'environnement. On pourra à ce sujet se référer utilement à la synthèse de Yann Dumas (Cemagref) sur l'impact des traitements herbicides sur la biodiversité forestière dans la publication du GIP-ÉCOFOR « Biodiversité et gestion forestière », 2002.

Les engagements PEFC et les normes ISO 14 001 autorisent l'usage de cet outil dans des conditions bien définies : formations des personnels, habilitation des entreprises, respect des réglementations en vigueur, respect des zones de captage et des plans d'eau (voir encadré).

Un exemple de la prise en compte de l'outil herbicide dans les engagements PEFC : quelques extraits des engagements PEFC Limousin...

Le propriétaire utilise pesticides et herbicides lorsque la vitalité ou l'avenir de son peuplement sont menacés et qu'il n'existe pas d'autre alternative aussi efficace à coût comparable.

Dans une ripisylve, dans les périmètres immédiats et rapprochés d'un captage d'eau potable, ou sur un habitat remarquable dans la mesure où celui-ci peut être identifié par le propriétaire, les traitements chimiques sont proscrits.

Anne LAYBOURNE

Loïc NICOLAS

Xavier MANDRET

ONF, direction territoriale Centre-Ouest
service technique et recherche
anne.laybourne@onf.fr
loic.nicolas@onf.fr
xavier.mandret@onf.fr

à suivre

n° 9 - été 2005

Prochain dossier : les réseaux naturalistes de l'ONF

parution : août 2005

Connaître les réseaux naturalistes et les travaux qu'ils mènent : tel est le cœur de ce prochain dossier très pratique qui présentera les réseaux naturalistes, et illustrera à travers différents cas concrets les éléments qu'ils peuvent apporter au gestionnaire.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* sur *intraforêt*

Tous les textes de ce numéro sont accessibles au format PDF dans la rubrique qui lui est désormais consacrée dans le portail de la direction technique (Recherche et développement/Documentation technique). Accès direct à partir du sommaire.

Pour rechercher un article particulier, utilisez le moteur de recherche de la base documentaire



Si vous désirez nous soumettre des articles, prenez contact avec nous :

ONF - Département recherche
Dominique de Villebonne
Tél. : 02 38 65 02 86
Mail : dominique.de-villebonne@onf.fr

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
Mail : dtech-documentation@onf.fr

