

# RenD ez - V ou s t e c h n i q u e s

n° 19 - hiver 2008

**Dossier**  
p.23



**Exploitation respectueuse des sols**

**Forêt, théâtre de nos émotions**



p.3

patrimoine

sylviculture

progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable

# Rendez-Vous techniques

## **Directeur de la publication**

Bernard Gamblin

## **Rédactrice en chef**

Christine Micheneau

## **Comité éditorial**

Yves Birot, Jean-Marc Brézard, Léo Castex, Patrice Hirbec,  
Alain Macaire, Patrice Mengin-Lecreux, Ludovic Pasquet,  
Jérôme Piat, Sonia Poupeau, Thierry Sardin, Sandrine Vivier

## **Maquette, impression et routage**

Imprimerie ONF - Fontainebleau

## **Conception graphique**

NAP (Nature Art Planète)

## **Crédit photographique**

page de couverture

En haut : FCBA

En bas : gravure de Gustave Doré, 1861

Page d'ouverture de dossier : FCBA, ONF, ONF

## **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 tech-  
nique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : [dtech-documentation@onf.fr](mailto:dtech-documentation@onf.fr)

ou par fax : 01 64 22 49 73

## **Prix au numéro (hors frais de port) :**

n° ordinaire : 10 euros ; hors série : 20 euros

**Abonnement** : 35 euros : 1 an = 4 numéros ordinaires  
(prix du hors série pour les abonnés = 15 euros)

**Dépôt légal** : mars 2008

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

---

**sommaire****N° 19 hiver 2008**

---

**C**onnaissances**La forêt, théâtre de nos émotions***par Benoît Boutefeu*

3

**M**éthodes**Gérer la chênaie à chêne pubescent du massif de Fontainebleau***par Marc Jacquet*

9

**C**onnaissances**Essai d'épandage de boues de station d'épuration avant plantation de chêne sessile en forêt de Chantilly***par Gwenaëlle Gibaud*

15

**23****dossier pratiques****Exploitation respectueuse des sols****M**éthodes**Conserver les ressources génétiques du sapin pectiné en France : pourquoi, comment ?***par Guillaume Plas, Alain Valadon et Bruno Fady*

55

**P**ratiques**Aperçu sur les sapins méditerranéens en France***par Thierry Lamant*

64

## éditorial

Il y a presque trois ans, les *Rendez-vous techniques* consacraient un dossier à l'importante question du tassement des sols. Depuis, le programme PROSOL « Pour une exploitation respectueuse des sols » a livré ses enseignements. Conduit par l'ONF et le CTBA (désormais FCBA) avec le soutien du ministère de l'Agriculture et la participation active des partenaires concernés, il a déjà permis de sensibiliser et former bon nombre de forestiers, exploitants et personnels des entreprises de travaux forestiers, et se conclura prochainement par la diffusion d'un « kit de vulgarisation » à l'ensemble des acteurs de la filière. Dans le même temps, l'ONF a formalisé ses engagements en matière de protection des sols (politique environnementale) et les a traduits dans les documents cadres qui régiront désormais les travaux en forêts : en premier lieu le Règlement National d'Exploitation Forestière qui entrera en vigueur en juillet prochain, ensuite le Règlement National des Travaux Forestiers disponible fin 2008. Nous revenons donc aujourd'hui sur ce sujet majeur avec un regard sur les solutions pratiques : choix des systèmes d'exploitation, matériels, organisation des chantiers... sans oublier la dimension économique.

Le reste du sommaire de cette nouvelle édition est assez éclectique, avec un éclairage original sur les relations forêt – société, le bilan mitigé d'une expérimentation de 10 ans sur l'épandage de boues d'épuration en forêt de Chantilly, le réseau de conservation *in situ* du sapin pectiné, ou la construction très pragmatique d'une typologie et de principes sylvicoles pour la gestion des chênaies à chêne pubescent de la forêt de... Fontainebleau. Autant de sujets susceptibles de concerner ici ou là notre « cœur de métier ».

Ce numéro enfin n'aborde pas le domaine de la dendrométrie, mais qu'il me soit permis cependant de rendre hommage à deux éminents spécialistes récemment décédés, Jean Pardé et Walter Bitterlich, dont l'œuvre imprègne quotidiennement nos travaux. Dans notre dernière édition (n° 18 – automne 2007), l'article sur « la surface terrière, méthodes de mesures et intérêts » en porte témoignage, qui cite 7 fois le nom de « Bitterlich » à propos de son fameux relascope.

Le Directeur technique et commercial bois

Bernard Gamblin

## La forêt, théâtre de nos émotions

L'ONF, gestionnaire de la forêt publique, doit répondre aux besoins et attentes de notre société : d'où le programme de recherche « Forêt et société », avec des partenaires scientifiques diversifiés, pour une réflexion large et approfondie sur les relations entre la forêt et la société française. Les Rendez-vous techniques s'en sont déjà fait l'écho : historique des enquêtes en France (n° 5), résultats de l'enquête nationale (n° 9 et 11), approfondissements qualitatifs (n°17). Voici maintenant une autre approche, qui apporte un nouvel éclairage sur nos relations à la forêt.

Lieu de détente et de promenade pour citadins en quête de nature, source d'émotions, de rêves et d'évasion de 7 à 77 ans, la forêt joue un rôle social important pour les Français. Les enquêtes statistiques conduites depuis plusieurs décennies montrent d'ailleurs qu'ils s'y rendent chaque année par millions, guidés par une véritable « fièvre de la chlorophylle », pour reprendre une formule journalistique employée par Christine Garin dans « Le Monde ».

Ce phénomène a des répercussions sur la gestion forestière, en particulier dans les espaces boisés périurbains soumis à de fortes contraintes de fréquentation. Il interpelle également les chercheurs en sciences humaines et sociales qui essaient d'en comprendre les ressorts (Corvol et al., 1997). Qu'est-ce qui pousse autant de nos concitoyens à se rendre en forêt ? Que viennent-ils y chercher ? « À questions simples, réponses complexes », dit l'adage du chercheur. C'est pourquoi, sans avoir la prétention d'élucider ces interrogations, nous espérons apporter quelques éléments

d'éclairage et de réflexion, issus de trois années de recherche sur ce sujet.

### Un rôle social qui échappe aux logiques sociologiques classiques

Les gestionnaires regroupent habituellement les aspirations de leurs concitoyens, qui voient dans les espaces forestiers une alternative à la modernité urbaine, sous le vocable de « demande sociale » (Deuffic, Granet et Lewis, 2004). L'Office National des Forêts, en tant que gestionnaire des forêts publiques, est chargé de répondre et de satisfaire à cette dernière.

Sur le terrain pourtant, le forestier est souvent désarmé pour assurer cette mission. La fonction sociale de la forêt est la plupart du temps appréhendée de manière réductrice, comme la « capacité de charge » maximale en visiteurs que peut accueillir le milieu forestier. La fréquentation est par exemple décrite en termes de pression à réguler, au moyen de points de fixation appropriés et d'équipements adaptés (tables, bancs, aires de jeux, etc.).

De son côté, le chercheur essaie lui aussi de cerner le rôle social assumé par la forêt. Par exemple, Bernard Kalaora, qui s'est penché à la fin des années 1970 sur le cas du tourisme en forêt de Fontainebleau (Kalaora, 1981), a décrit la fréquentation comme un fait social relevant d'une logique de classe. Une distinction s'opèrerait en fonction du capital culturel et du statut social des visiteurs : l'élite adopterait une démarche esthétisante et contemplative tandis que les classes défavorisées considèreraient la forêt comme un bien de consommation courant pour les loisirs et la récréation. La plupart des enquêtes qui ont suivi, au plan local comme national, ont réutilisé ce postulat déterministe, l'attitude d'un individu envers la forêt étant analysée au regard de sa position sociale et non de son vécu.

Les entretiens exploratoires que nous avons menés auprès de visiteurs de deux massifs domaniaux périurbains (cf. encadré 1) montrent pourtant que la relation à la forêt répond mal à des logiques sociologiques classiques. Elle ne

repose pas sur des discours collectifs structurés et des représentations sociales que l'on pourrait décrypter. Elle semble davantage renvoyer à l'imaginaire et à l'inconscient.

Le rapport à la forêt procède du sensible, de l'affectif, de l'organique, de l'émotion et fait peu intervenir de raisonnements et de constructions intellectuelles. En effet, la forêt est appréhendée en premier lieu par les sensations (humidité, fraîcheur, couleur...) et les émotions (évoquant de souvenirs d'enfance, sentiment de liberté) qu'elle procure.

La plupart des personnes interrogées se sont montrées désespérées pour évoquer leur rapport à la forêt. Le questionnaire sociologique classique s'est révélé inefficace pour capter des données psychoaffectives, intimes et inconscientes. La peur ou la honte, par exemple, ne sont jamais ouvertement exprimées. D'autres supports ont dû être mobilisés pour accéder aux images associées aux milieux forestiers, tels des corpus de reportages télévisuels et de citations littéraires (cf. encadré 1).

### La relation à la forêt serait avant tout de nature inconsciente et archétypale

La forêt, objet ressenti plutôt que pensé, ferait intervenir essentiellement la sphère psychoaffective en mettant en résonance des croyances individuelles héritées d'un vécu et des archétypes universels. Au-delà des pratiques habituelles (cueillette, promenade, loisirs sportifs) et des modes de fréquentation spécifiques (les femmes et les 15-24 ans allant par exemple moins facilement en forêt), les représentations associées à la forêt seraient dominées par des symboles et des images archétypales

## 1 - Des méthodologies complémentaires pour recueillir de l'information originale

### In situ

- Entretiens semi-directifs exploratoires : 49 entretiens conduits auprès de visiteurs de deux forêts domaniales périurbaines (Val Suzon en Côte d'Or ; Grande Chartreuse en Isère)
- Des questionnaires conduits en vis-à-vis : 400 au total, dont 200 en forêts du Val Suzon et de la Grande Chartreuse et 200 hors forêt (centres-villes de Dijon et Grenoble)

### Ex situ

- Dépouillement de corpus de reportages et d'articles : 631 reportages sur la forêt issus des journaux télévisés de TF1 (années 2002 à 2004), 166 articles parus dans le quotidien « Le Monde » (années 2002 à 2004)
- Dépouillement d'un corpus de citations littéraires : 78 citations de « grands » auteurs

socialement et culturellement partagées.

Hérités d'un inconscient collectif, les archétypes se manifestent différemment selon l'histoire et la sensibilité de chacun (Jung, 1963). Grâce à leur puissance symbolique, ils structurent la vie psychoaffective des individus. En revanche, ils se traduisent rarement par des représentations conscientes. Aussi, parler de « demandes sociales » en forêt de la part de la société apparaît plutôt comme un raccourci malheureux qu'un concept de recherche opératoire et pertinent.

Si la théorie des archétypes a déjà été mentionnée pour expliquer notre rapport à la forêt, notamment par la sociologue Nicole Eizner (*in* ANCR, 1995), elle reste peu utilisée dans les travaux de recherche relevant de cette thématique. Nous avons essayé d'en tester la validité, à partir de deux niveaux d'analyse :

- l'échelle individuelle, pour comprendre les dimensions psychoaffectives et subjectives du lien qu'entretient chaque personne avec les espaces boisés

(entretiens personnalisés et questionnaires en vis-à-vis) ;

- l'échelle sociologique pour dégager les caractéristiques de la forêt dans l'inconscient collectif (analyse d'images et de discours médiatiques et littéraires sur la forêt) (cf. encadré 1).

### L'émotion et la sensation, manifestations visibles de la fonction symbolique de la forêt

La forêt apparaît d'abord comme un objet sensible. Les « grands » auteurs, en particulier les poètes, l'ont en tout cas traduit comme tel (cf. encadré 2). Dans les entretiens semi-directifs, les visiteurs ont également abordé facilement les sensations qu'ils éprouvent en forêt : l'odeur de l'humus, le chant des oiseaux, les couleurs de l'automne. Cette attention portée aux sens génère chez eux un sentiment de calme, d'apaisement, synonyme de paix intérieure.

Lors des entretiens semi-directifs, les interlocuteurs ont également fréquemment évoqué leurs souvenirs d'enfance en forêt : leur passé de scout, leurs premiers émois amoureux, les discussions avec

## 2 - les poètes au secours du sociologue pour décrypter la symbolique forestière

Lieu de refuge ou de perte, la forêt est le théâtre de toutes les expériences. Celles-ci peuvent être spirituelles (« *Tu trouveras plus dans les forêts que dans les livres. Les arbres t'enseigneront les choses qu'aucun maître ne te dira.* », Saint Bernard de Clairvaux), initiatiques (« *J'étais au milieu de la forêt, il y avait deux chemins devant moi, j'ai pris celui qui était le moins emprunté, et là, ma vie a commencé.* », Robert Frost) ou encore sexuelles (le petit chaperon rouge découvrant « *le loup* »). On vient en forêt pour retrouver la naïveté et l'innocence de l'enfance, ou bien pour s'en défaire. Loin d'être un aride désert de sens, les sylves sont d'une fertilité symbolique incroyable.

Personne mieux que Charles Baudelaire (1857) n'a su aussi bien l'exprimer :  
« *La Nature est un temple où de vivants piliers laissent parfois sortir de confuses paroles*

*L'homme y passe à travers des forêts de symboles qui l'observent avec des regards familiers* ».

Ces « *forêts de symboles* » sont dominées par des ambivalences. Paradis de bienveillance maternelle, de pureté originelle et de virginité immaculée, la forêt est aussi un enfer dominé par la sauvagerie, l'amoralité, la perversion et la tentation. Elle peut conduire à la perte, au non-retour, à une errance sans fin ou bien mener au chemin de la Connaissance et de la sagesse.



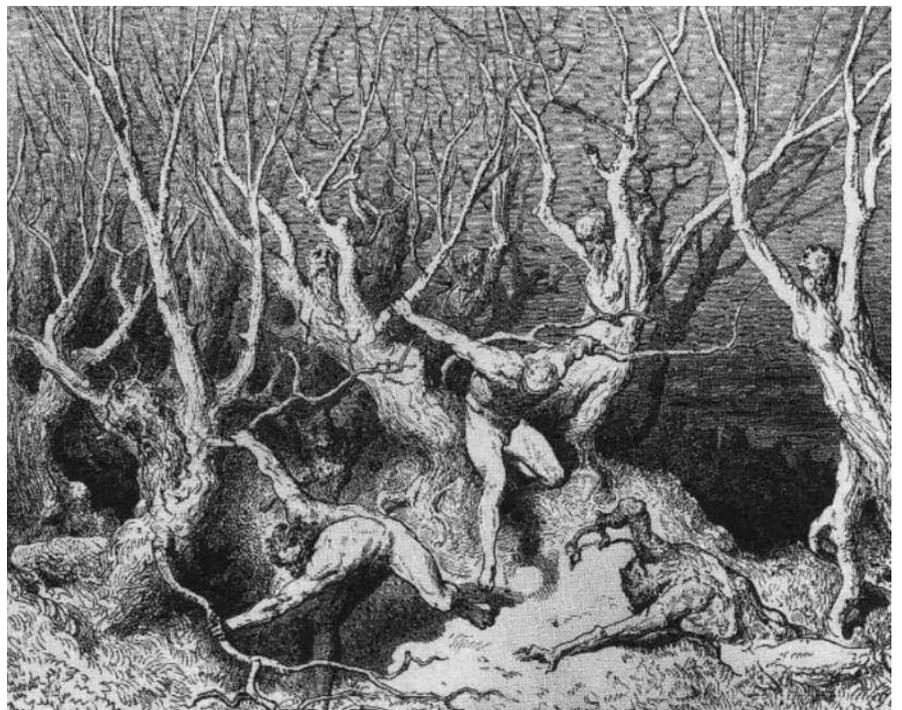
*Le petit Chaperon rouge ou le mythe populaire forestier par excellence (gravure de Gustave Doré, 1862)*

leur grand-père qui les amenait aux bois, leurs premières expériences du sentiment de liberté, ou au contraire parfois leurs frayeurs. Dans leur imaginaire, la forêt fonctionne comme les fameuses madeleine de Proust (dans « *Du côté de chez Swann* », premier volume de son œuvre « *À la recherche du temps perdu* »), elle réactive des sensations et des émotions liées à l'enfance (cf. encadré 3).

soucis et se replonger dans ses souvenirs d'enfance. Elle est pour beaucoup un fusible, une soupape psychique, l'une des rares occasions au cours desquelles les sen-

Chaque visiteur, par son histoire personnelle, possède sa propre grille de lecture du décor forestier. Ce n'est pas sa condition sociale mais son vécu et son état émotionnel du moment qui la déterminent. La forêt possède donc un effet miroir en permettant à chacun de rentrer en résonance avec son espace intérieur. Elle apparaît à la fois comme un lieu intime et un lieu de sociabilité facilitée par rapport aux contraintes urbaines ordinaires. Elle est bien plus qu'un espace utilitaire ou consommé : chacun y vient avant tout pour se remplir d'émotions spécifiques.

Elle est un lieu de prédilection pour se ressourcer, oublier ses



*Les arbres anthropomorphisés de la forêt des damnés dans l'Enfer de Dante (gravure de Gustave Doré, 1861)*

*L'anthropomorphisme inquiétant d'arbres mi-homme mi-végétal illustré ici par Gustav Doré a influencé Walt Disney, qui s'est aussi très largement inspiré des contes de Perrault et des frères Grimm pour ses dessins animés.*

sations, les émotions peuvent prendre le pas sur l'intellect. « *Tranquillité* », « *sérénité* », « *calme* », « *plénitude* », « *apaisement* », « *retour à l'essentiel* », « *liberté* », « *indépendance* », « *solitude* » sont des mots ou expressions qui sont revenus très régulièrement lors des entretiens. La forêt agit en libérant des conventions sociales et apaise ainsi les esprits. Elle fait fondre momentanément les barrières mentales d'un « surmoi » tyrannique et hyperactif.

## La « peur de la nature », une émotion refoulée mais pourtant active

Si la forêt procure des émotions positives de bien-être, elle peut également être source de peurs et d'angoisses. Celles-ci peuvent être de plusieurs natures. Une bonne part trouve son origine, une nouvelle fois, dans l'enfance. Qui n'a pas frémi en écoutant, petit, des contes sylvestres, dont le plus célèbre d'entre eux, celui du petit chaperon rouge écrit par Charles Perrault (1628-1703), repris par les frères Jacob Grimm (1785-1863) et Wilhelm Grimm (1786-1859), puis plus tard par Tex Avery (1908-1980) dans ses dessins animés ? Ces

légendes, ces mythes et ces contes tirent directement leur substance d'un inconscient collectif qui dépasse les individus (cf. gravures).

Les peurs liées à la forêt peuvent se manifester sous forme d'angoisses « flottantes », c'est-à-dire sans cause identifiée, ou être projetées sur des objets particuliers, tels les insectes ou les animaux sauvages. Elles sont difficiles à déceler, les individus interrogés n'en étant pas toujours conscients ou n'avouant pas spontanément leurs angoisses profondes et refoulées.

Par exemple, lorsque l'on demande aux visiteurs s'ils peuvent parfois ressentir des peurs en forêt, très peu répondent par l'affirmative (cf. figure 1). En revanche, si l'on reformule la question en interrogeant les objets sur lesquels peuvent se porter d'éventuelles angoisses, les réponses sont plus faciles (cf. figure 2). La rencontre avec un chasseur arrive en tête, la peur de se retrouver nez à nez avec un tireur et de prendre une balle perdue lui étant associée.

Les angoisses liées à la forêt semblent bien plus puissantes et nom-

### 3 - L'émotion, la sensation et le sentiment : trois facettes de la relation psychoaffective aux sylves

Le terme « sensation » provient du latin *sensasio* désignant à l'origine « une impression produite par des objets sur les sens » (dictionnaire Trésor de la Langue Française). Le « sentiment » distingue quant à lui « la faculté de recevoir des impressions physiques, des sensations » (dictionnaire TLF). Enfin l'« émotion », du latin *motio* correspond à un « trouble, mouvement » (dictionnaire TLF). La sensation s'apparente à la perception : elle est immédiate et fait intervenir uniquement l'appareil neurosensitif. L'émotion est plus complexe puisqu'elle relève de la psyché et désigne un état affectif. Contrairement à la sensation, elle peut être produite sans objet extérieur et naître par exemple de l'évocation d'un souvenir. Le sentiment procède quant à lui d'une construction *a posteriori* : il n'est donc pas directement saisissable. Le passage de l'émotion au sentiment fonctionne par reconstruction subjective du réel (Damasio A., 2003).

breuses que ne le laissent supposer les items de la question de la figure 2. Elles peuvent être regroupées schématiquement en deux

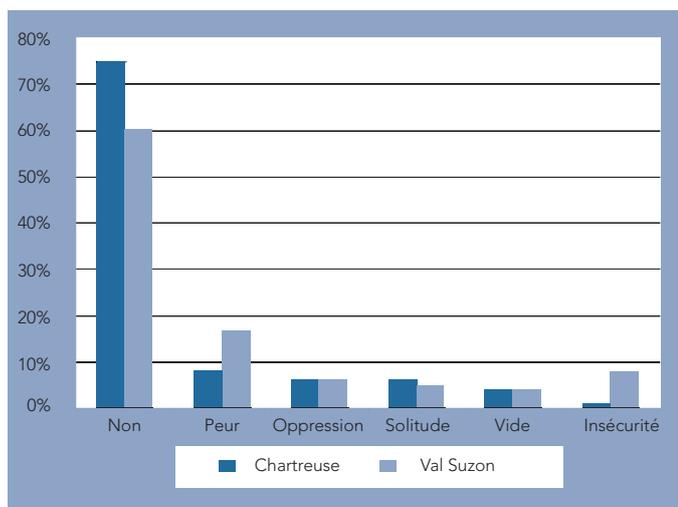


Fig. 1 : vous arrive-t-il parfois de ressentir un sentiment de [...] ?

Questionnaires : N=100 en forêt de Chartreuse et du Val Suzon

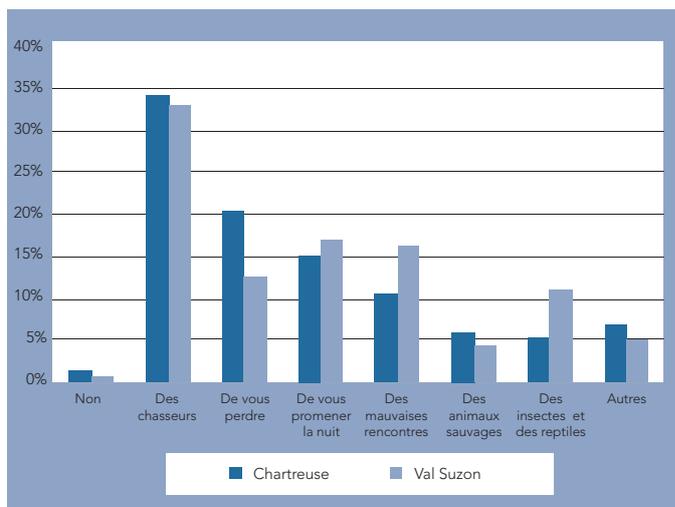


Fig. 2 : de quoi pourriez-vous éventuellement avoir peur : [...] ?

Questionnaires : N=100 en forêt de Chartreuse et du Val Suzon

classes selon leurs origines : la peur des déviations humaines (mauvaises rencontres, insécurité, accidents de chasse), la peur du sauvage (animaux, reptiles, insectes). Les craintes de se perdre ou de se promener la nuit en forêt renvoient simultanément à ces deux catégories.

Le naturaliste et chercheur François Terrasson a consacré toute sa vie à étudier les angoisses suscitées par la nature avec une approche psychiatrique (Terrasson, 1988). Pour les révéler, il a imaginé un dispositif expérimental qu'il a baptisé « *stage de la peur* » : des volontaires sont envoyés passer une nuit seuls en forêt, sans lumière et sans aucun moyen de communication. Ce dispositif réveille chez la plupart des participants des angoisses enfantines et archétypales qui, selon François Terrasson, refléteraient la peur d'un retour à l'état originel de nature, renvoyant chacun à son « moi » pulsionnel, immoral et animal.

### Le forestier, garant d'un patrimoine à la fois naturel et symbolique

La forêt apparaît comme un objet communicant, chacun pouvant y projeter ses histoires et ses souvenirs ou y retrouver des symboles universels. Le forestier ne gère donc pas qu'une ressource économique et naturelle mais aussi un capital symbolique, bâti sur des représentations, des archétypes et des valeurs socialement partagées.

La tâche du forestier est bien plus que technique, puisqu'il est aussi le « *garant d'un ordre sacré, d'un ordre où la rencontre est possible et où l'usure et la mort font partie intégrante de la vie* » (Vegléris et Lecomte, 2000, p. 563). L'erreur serait de croire qu'il lui suffit de capter des attentes sociales majoritaires pour définir une politique forestière légitime. Celles-ci n'exis-



Un forestier « en scène » devant un public captivé

tent pas sous une forme structurée et sont la plupart du temps inaccessibles, parce que confinées dans les inconscients collectif et individuels.

Aussi, face à des visiteurs en quête d'émotions et de plaisirs, les discours techniques ou injonctifs du gestionnaire risquent de ne pas avoir beaucoup de résonance.

Pour toucher et faire passer des messages auprès des visiteurs, il lui faut se mettre en scène et accepter de jouer le rôle d'un passeur, d'un médium ou d'un initiateur, capable de concilier les impératifs économiques de la sylviculture avec la nécessaire part de rêve. Le franc succès rencontré en Chartreuse avec les sorties nocturnes en raquettes guidées par

des agents formés aux techniques théâtrales ouvre en ce sens des pistes prometteuses (cf. photo 1). Mais, faire converger la gestion forestière et les attentes sociales pose également la question du sens à donner à la profession de forestier public (Boutefeu B. et Arnould P., 2006). Des ruptures et des distorsions apparaissent entre la forêt rêvée de l'Office National des Forêts, c'est-à-dire productive et rentable tout en étant riche en biodiversité, et celle du grand public, « *belle et naturelle* », et par définition « a-commerciale ». En vantant les mérites d'une gestion économiquement performante de la ressource boisée, le gestionnaire doit donc prendre garde à ne pas altérer la fonction symbolique et émotionnelle associées à la forêt, au risque de déclencher des rejets voire des conflits.

**Benoît BOUTEFEU**

Docteur en sciences humaines et sociales  
Agence ONF des Alpes Maritimes

**Bibliographie**

Les réflexions présentées dans cet article sont issues d'une thèse de doctorat soutenue en septembre 2007. Ces travaux de recherche ont été réalisés au sein de l'École Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines de Lyon et financés par l'Office National des Forêts. L'auteur tient à remercier Anne-Marie Granet (responsable de la mission de recherche sur la fonction sociale de la forêt à l'ONF) pour sa relecture critique et ses corrections.

ANCR (Agence Nationale de Création Rurale), 1995. *La Forêt, les savoirs et le citoyen : regards croisés sur les acteurs, les pratiques et les représentations*. Le Creusot : éditions ANCR. 376 p.

BOUTEFEU B., 2007. *La forêt comme un théâtre ou les conditions d'une mise en scène réussie*. Thèse de doctorat de sciences humaines et sociales. Lyon : École Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines. 519 p. <en ligne : <http://umr5600.univ-lyon3.fr/chercheur/THESEBOUTEF EU.pdf>>

BOUTEFEU B., ARNOULD P., 2006. *Le métier de forestier : entre rationalité et sensibilité*. *Revue Forestière Française*, vol. 58, n° 1, pp. 61-72

CORVOL A., ARNOULD P. et HOTYAT M., 1997. *La forêt, perceptions et représentations*. Paris : L'harmattan. 401 p.

DAMASIO A., 2003. *Spinoza avait raison. Joie et tristesse. Le cerveau des émotions*. Paris : Odile Jacob. 346 p.

DEUFFIC P., GRANET A.M. et LEWIS N., 2004. *Forêt et société : une union durable. 1960-2003 : évolution de la demande sociale face à la forêt*. *Rendez-vous techniques*, n° 5, pp. 10-14

GARIN C., 2004. *Les Parisiens rêvent d'une ville plus verte et préservée*. *Le Monde*, édition du 23 septembre 2004

JUNG C.G., 1963. *L'âme et la vie*. Paris : Buchet/Chastel. 389 p.

KALAORA B., 1981. *Le musée vert ou le tourisme en forêt : naissance et développement d'un loisir urbain, le cas de la forêt de Fontainebleau*. Paris : Anthropos. 302 p.

TERRASSON F., 1988. *La peur de la nature : au plus profond de notre inconscient les vraies causes de la destruction de la nature*. Paris : Sang de la terre. 187 p.

VÉGLERIS E., LECOMTE F., 2000. *L'autre visage de la forêt : ce que voit le forestier en son miroir*. *Revue Forestière Française*, vol. 52, n° 6, pp. 559-565

VON FRANZ M.L., 2003. *L'interprétation dans les contes de fées*. Paris : Dauphin. 240 p.

# Gérer la chênaie à chêne pubescent du massif de Fontainebleau

*Qui connaît le chêne pubescent en forêt de Fontainebleau ? Dans un contexte géologique particulier, il forme des peuplements originaux et à forte valeur patrimoniale... dont la gestion restait à inventer. L'étude présentée ici marque un progrès important en définissant, pour le massif bellifontain, une typologie des chênaies à chêne pubescent et les principes sylvicoles appropriés, solidement appuyés sur les dynamiques de peuplement observées.*

Les peuplements forestiers à chêne pubescent, présents sous diverses formes dans l'hexagone, révèlent pour partie leur limite nord de répartition sur les plateaux calcaires des alentours de Fontainebleau. L'intérêt croissant des forestiers pour les questions de biodiversité, de qualité écologique ou plus simplement de gestion durable rend ces peuplements intrigants car peu connus sous ces latitudes. L'étude dont il est question ici, attendue par l'Office National des Forêts de Fontainebleau, a été réalisée dans le cadre d'un mémoire FIF : 6 mois de travail ont permis de synthétiser les connaissances actuelles concernant le chêne pubescent et de préciser la façon d'appréhender la gestion de cette essence dans le contexte particulier de Fontainebleau.

## Une grande richesse spécifique

La situation géographiquement marginale du chêne pubescent à Fontainebleau en fait une essence remarquable au niveau local. Mais le principal intérêt de ce type de chênaie est de dominer une pelouse calcicole thermophile des plus riches. Plus important encore,

l'état de conservation de ces pelouses est intimement lié à celui de la chênaie pubescente à laquelle elle est associée. Ainsi s'explique la nécessité de conserver de telles formations végétales, objectif délicat vu leur relative instabilité par endroits.

## Une dynamique alarmante

Au fur et à mesure de la gestion ordinaire de ces peuplements de chênes pubescents, les forestiers bellifontains se sont aperçus de leur inexorable recul au profit de deux autres essences : le hêtre et le pin sylvestre. On pourrait considérer les chênaies pubescentes comme des paliers instables d'une évolution progressive vers des hêtraies sèches ou des pinèdes. Pourtant, certaines sont dans un excellent état de conservation et accusent des âges insoupçonnés : on peut certainement les qualifier de stables, tout du moins à l'échelle de quelques aménagements forestiers. Ces constatations ont permis de classer les principales chênaies concernées dans des séries d'intérêt écologique particulier (SIEP), et des réserves biologiques dirigées (RBD), mais ce classement ne résout pas le

problème qui préoccupe le gestionnaire de terrain : quelle gestion de ces chênaies pour leur conservation ?

La dynamique de la chênaie est fortement liée aux facteurs édaphiques, et notamment à la réserve utile en eaux des substrats (figure 1 page suivante). Ces facteurs sont bien sûr induits par la géologie du massif.



Chêne pubescent sur pelouse calcicole thermophile

M. jacquet

## Un contexte géologique complexe, mais révélateur

La géologie très particulière du massif de Fontainebleau induit des substrats pédologiques variés. Les chênaies pubescentes se rencontrent dans trois situations topographiques différentes : sur les plateaux calcaires, dans les versants, et dans les vallées sèches (figure 2, n°1). Cette topographie très tranchée est caractérisée par un sous-sol particulier. Les plateaux sont formés d'une fine couche de calcaire d'Étampes, plus ou moins recouverte de sables soufflés et les versants sont taillés dans les sables stampiens acides (et enrichis de cailloutis calcaires provenant de l'altération de la dalle). Les vallées sèches sont constituées de ce même cailloutis calcaire mélangé par colluvionnement aux sables stampiens (figure 2).

Les sables soufflés, propres au massif de Fontainebleau, proviennent en réalité d'une érosion éolienne des sables stampiens acides des versants (figure 3, n°1), enrichis en calcaire actif au contact de la dalle de calcaire d'Étampes (figure 3, n°2), puis parfois re-soufflés et transportés dans les versants (figure 3, n°3). Cette dynamique géologique explique la grande diversité de substrats que l'on peut rencontrer à Fontainebleau, cette diversité pouvant parfois s'exprimer à l'échelle du mètre.

Bien entendu, les pentes du massif sont souvent dominées par des platières de grès, produisant par érosion des chaos de blocs gréseux (figure 2, n°2). Ce sont les sables stampiens qui forment, par induration, cette particularité propre à Fontainebleau. Même si quelques chênes pubescents isolés s'installent sur ces versants arides, ils n'y forment pas de peuplements à part entière.

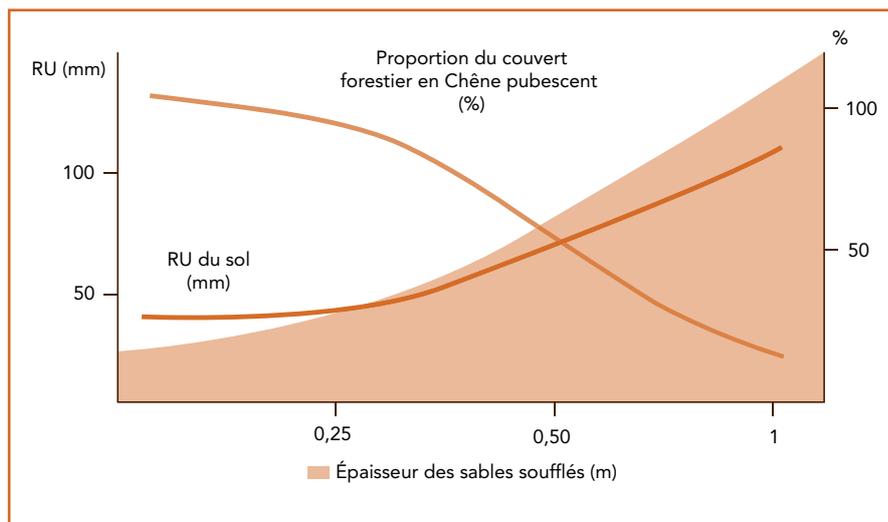


Fig. 1 : influence de l'aridité des stations sur la répartition du chêne pubescent

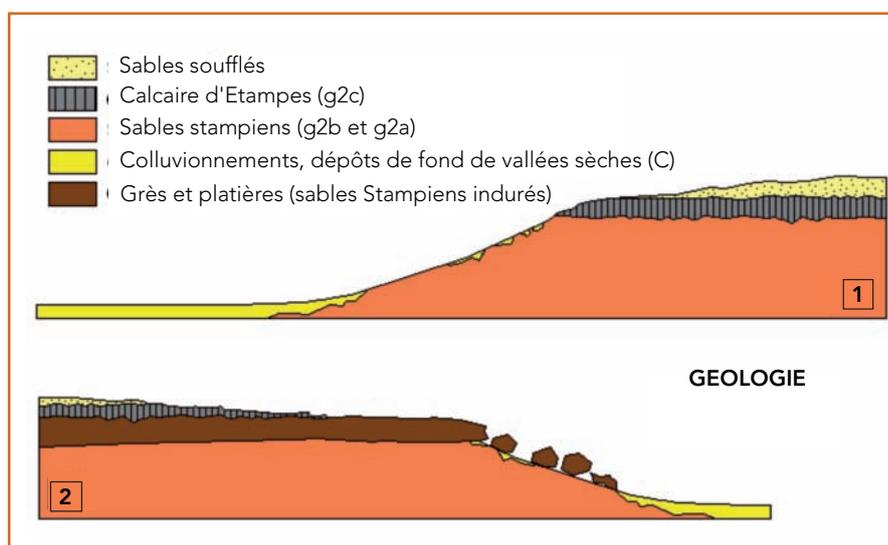


Fig. 2 : géologie bellifontaine des stations à chêne pubescent (n°1) et des formations de platières et chaos gréseux (n°2)

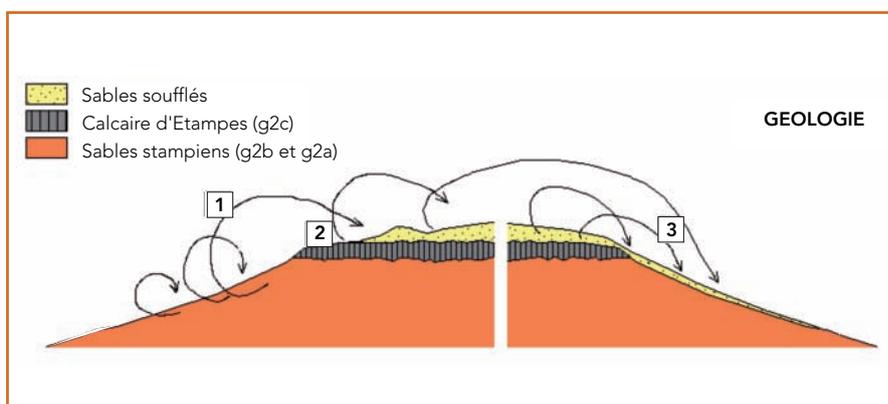


Fig. 3 : formation des « sables soufflés »

D'une manière générale, la répartition des chênaies pubescentes est liée à la présence de la dalle de calcaire d'Étampes : elle ne se rencontre pas sur tous les plateaux bellifontains, mais son érosion et son rôle dans l'enrichissement en calcaire des sables soufflés créent les stations propices.

### Un premier obstacle : la reconnaissance des espèces

Les stations à chêne pubescent de la forêt de Fontainebleau sont généralement arides et peuvent se répartir sur des substrats carbonatés ou acides. Le chêne sessile est donc souvent présent dans les environs de ces stations, à la faveur d'un sol plus profond, d'une exposition plus fraîche où il se montre plus dynamique que le pubescent. Ces deux espèces s'hybrident facilement par leur proximité spatiale et botanique, et les phénotypes qui en découlent sont variables et très difficilement reconnaissables. Ainsi, il existe une quasi-infinité de phénotypes entre le chêne pubescent et le chêne sessile. Ces hybrides semblent naturellement occuper des zones intermédiaires entre les stations typiques à chêne pubescent et celles à chêne sessile.

L'étude de P. Kissling (Clef de détermination des chênes médio-européens *in* : Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft, tome 90 n°1, 1980, pp. 29-44) montre que, s'il est possible de classer et distinguer ces hybrides en laboratoire, la distinction sur le terrain est vaine. L'unique critère de comparaison à l'œil nu reste l'intensité de la pubescence des feuilles, des rameaux et des cupules de leurs glands. Plus cette pubescence est visible et fournie, plus le chêne considéré aura les caractères génétiques d'un chêne pubescent.

Pour conserver l'intérêt pratique de cette étude, nous considérons qu'un chêne pubescent est un chêne dont la pubescence des feuilles et des rameaux est visible à l'œil nu (cette distinction est à réaliser de préférence en période de végétation, car la pubescence tombe et s'estompe en hiver).

### Quand parler de « chênaie pubescente » ?

Les chênaies du massif de Fontainebleau sont bien souvent qualifiées de « pubescentes » lorsqu'elles présentent des morphologies buissonnantes de taillis improductifs, où les arbres souvent très âgés ont des accroissements dérisoires et sont disposés en cépées. En réalité, ces peuplements dépérissants et souffrants ne sont pas toujours composés de chêne pubescent, mais parfois de chênes sessiles ou pédonculés. Il est aussi possible de trouver des peuplements mélangés sessile/pubescent, ce qui oblige à définir une limite nette entre chênaie pubescente et chênaie sessiliflore.

De nombreuses prospections de terrain nous ont conduits à la conclusion que, lorsque 40 % des chênes sont distingués comme pubescents, on admettra être en présence d'une chênaie pubescente. En toute rigueur, il est plus exact de parler de « chênaies à chêne pubescent ».

### Distinguer et caractériser les chênaies pubescentes : un outil typologique

Cette étude a pour but de guider le gestionnaire de chênaies à chêne pubescent qui, désirant les conserver et travailler à leur profit, doit appliquer des choix sylvicoles. La typologie ici proposée, valable pour le massif de Fontainebleau, doit faciliter la reconnaissance de ces chênaies (figure 4). Celle-ci

n'est donc pas purement descriptive, mais volontairement orientée en fonction des possibilités de conservation ou de restauration de la chênaie. C'est ainsi que des mélanges chêne pubescent/hêtre par exemple seront considérés comme des hêtraies dès lors que la proportion de chêne est insuffisante pour espérer enrayer la dynamique naturelle.

On peut distinguer trois grands types de chênaies à chêne pubescent à la morphologie très dépendante de leur situation topographique :

- les chênaies de plateau (PL), possédant des sous-types avec des évolutions plus ou moins lentes, en fonction de leur proximité au rebord du plateau et de leur structure ;
- les chênaies de versant (VE), à la croissance plus faible et irrégulière. On y trouve des arbres âgés, souffrant de la xéricité des sols superficiels ;
- les chênaies de vallons et vallées sèches (VS), possédant des chênes souvent buissonnants et une fruticée très présente.

On peut ajouter à ces trois types le cas particulier des ourlets de rebord de plateaux, possédant sans doute les chênaies les plus stables et une pelouse sous-jacente bien souvent en très bon état de conservation.

### Quelle gestion pour conserver les chênaies à chêne pubescent ?

Cette gestion conservatoire doit se focaliser sur les stations permettant une pérennité, voire une stabilité de ces peuplements. Le peuplement objectif sera une futaie sur souche par cépées entières, au couvert épars à discontinu, associée à une pelouse recouvrante et à une fruticée épars (types VS1, VE1, PL1 et leur variante « claire » VS1\*, VE1\* et PL1\*). La régénération de ces peu-

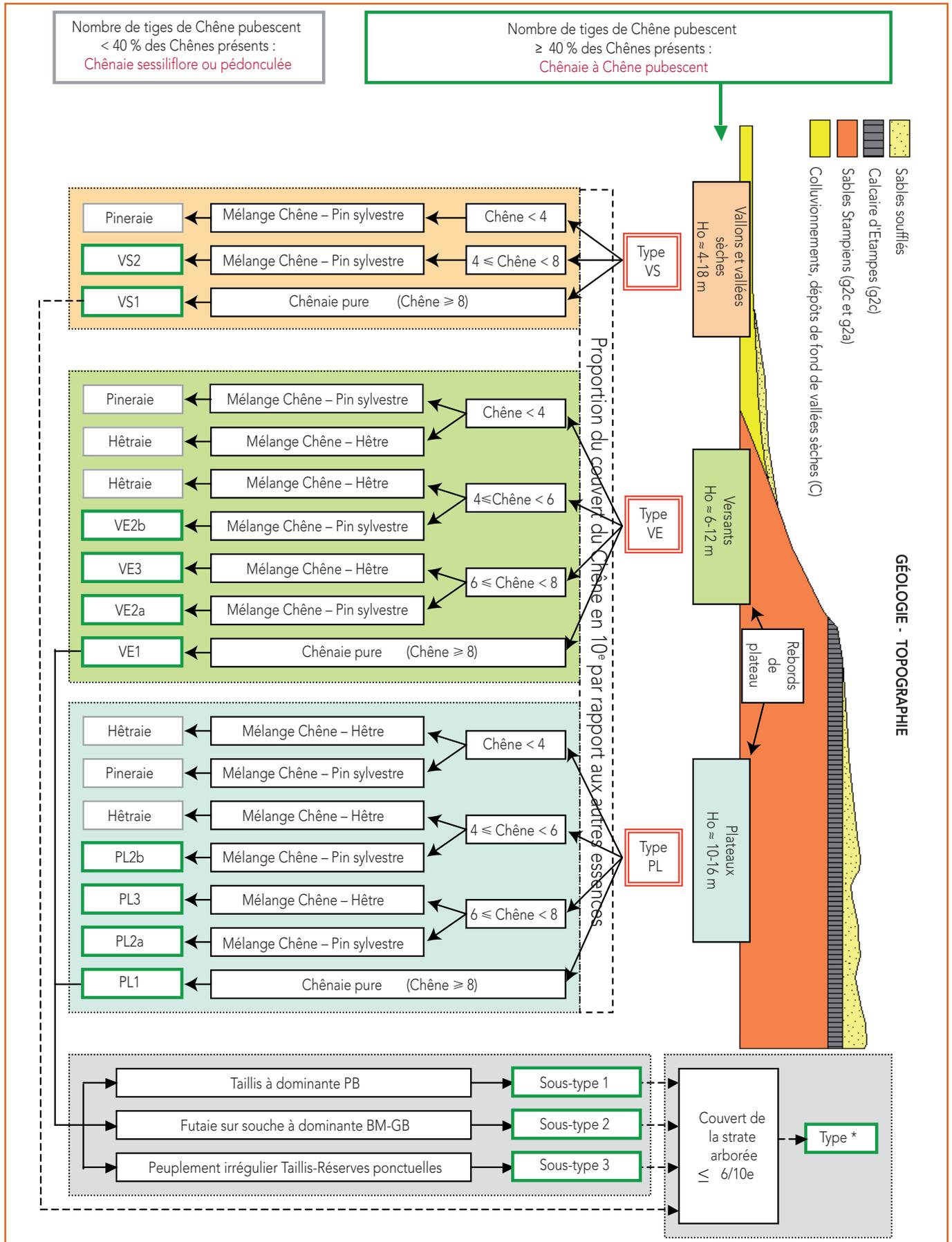


Fig. 4 : clé de détermination des peuplements à chêne pubescent



M. jacquet

La chênaie objectif de type PL1\* : des cépées entières et un couvert épars



M. jacquet

Les plus gros chênes pubescents, souvent tourmentés, dépassent aisément les 250 ans

lements devra être déclenchée par leur état avancé de maturité, jugé à partir de la répartition des diamètres et des signes avant-coureurs de sénescence et dépérissement des cépées. Vu la longévité de ces chênes, et leur capacité à résister à la xéricité du milieu, ils pourront sans mal dépasser 150 - 200 ans pour des diamètres compris entre 35 et 55 cm.

Les méthodes de renouvellement de ces peuplements doivent être adaptées à la lenteur de leurs réactions et resteront très progressives et étalées dans le temps. Elles doivent être basées sur une gestion fine du couvert à travers des coupes secondaires espacées. Les rotations doivent éviter de déstabiliser physiologiquement les semenciers par une mise en lumière trop brutale et d'élever considérablement la tempéra-

ture au sol en été, synonyme de perte des jeunes semis de chêne. Le maintien d'une fruticée éparse sous la chênaie doit permettre également de réguler ce couvert et cette température.

Pour conduire les peuplements colonisés par d'autres essences (types VS2, VE2b, VE3, VE2a, PL2a, PL2b, PL3) vers les types objectifs, il faudra réduire assez rapidement les effectifs des deux concurrents principaux : le pin sylvestre et le hêtre (figure 5).

Les chênaies à chêne pubescent mélangées au pin sylvestre sont relativement aisées à restaurer : 1 à 3 rotations de coupes suffisent à éliminer le pin, même s'il faut rester attentif à l'irrégularité de sa dynamique (ses semis, parfois absents durant plusieurs années, peuvent apparaître brusquement à la faveur

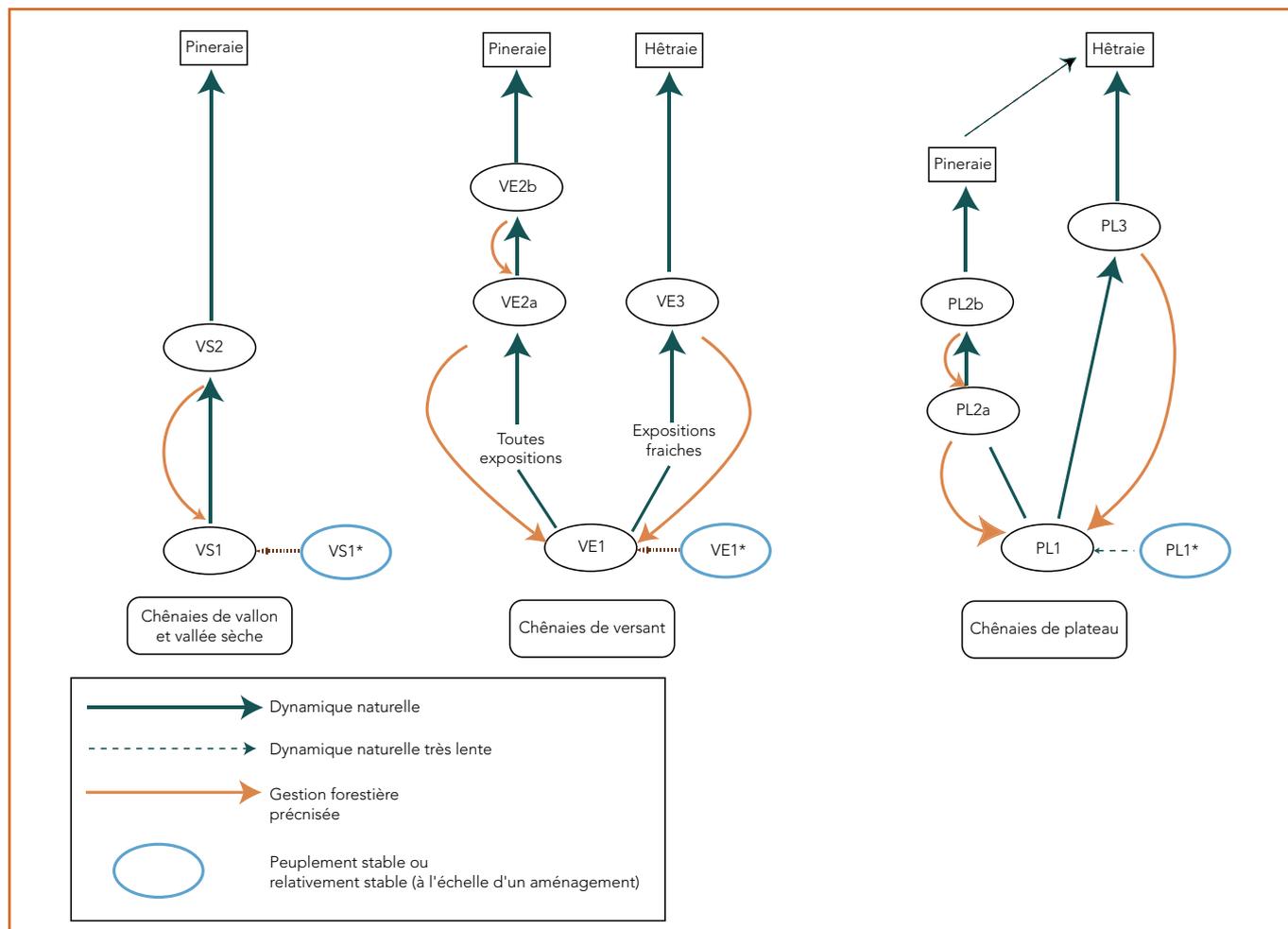
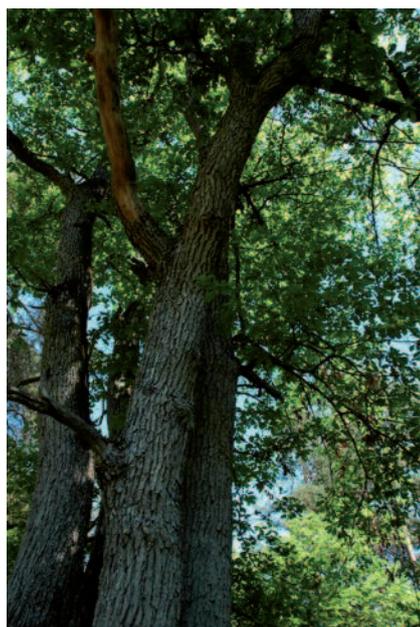


Fig. 5 : évolution des types chênaie à chêne pubescent



Cépeée de chênes pubescents

M. Jacquet

d’une strate herbacée décapée, de bonnes conditions de lumière et de température).

Le hêtre, lui, est un concurrent beaucoup plus sérieux. En effet, sa dynamique relativement rapide sur les plateaux calcaires est longue et difficile à stopper. La typologie des chênaies doit permettre de définir à partir de quel moment celle-ci ne pourra plus être restaurée, grâce à de simples évaluations du couvert (figure 4).

**Quelques réponses qu’il reste à approfondir**

Même si ce travail répond à des interrogations, des incertitudes concernant la « Chênaie pubescente » du massif de Fontaine-

bleau, il reste à constater et relater ses évolutions au cours du temps, notamment face aux essences qui la concurrencent. C’est notamment l’objectif d’une réserve biologique intégrale de la forêt comprenant cette formation végétale. Les réserves biologiques dirigées, elles, créées en partie pour la conservation du chêne pubescent, permettent déjà d’appliquer, de suivre et de compléter notre connaissance de sa sylviculture.

**Marc JACQUET**

chef de projet aménagement  
agence ONF de Verdun

**Un grand merci** à Claude Lagarde (agence ONF de Fontainebleau), pour son aide et son encadrement au cours de cette étude.

# Essai d'épandage de boues de station d'épuration avant plantation de chêne sessile en forêt de Chantilly

*Les épandages de boues d'épuration en forêt sont interdits depuis 1997, mais des évolutions réglementaires sont possibles et l'expérimentation reste d'actualité. Le bilan mitigé de l'essai conduit sur deux stations contrastées en forêt de Chantilly laisse à penser que l'idée des épandages en gestion forestière ordinaire est peu pertinente.*

**E**n France, plus de 900 000 tonnes de matières sèches issues de boues d'épuration urbaine sont produites chaque année. Cette production est en constante augmentation depuis plusieurs années du fait de l'accroissement démographique et de la multiplication des stations d'épuration. Pourtant, **les filières de recyclage des boues se restreignent**. Les boues sont actuellement majoritairement recyclées par épandages en agriculture mais ceux-ci sont interdits durant la période de croissance des cultures (de mars à juin). La mise en décharge est interdite depuis 2002 par les directives européennes sur les déchets et l'incinération demeure une technique très coûteuse.

Dans ces conditions, **l'épandage de boue sur parcelles boisées est apparu comme une possibilité alternative**. En effet, cela pourrait accélérer la croissance et la productivité des peuplements en améliorant la fertilité des sols. Mais ces bénéfices supposés ne doivent pas masquer les dangers potentiels pour l'environnement et la santé humaine : modification de la flore, contamination des sols, des eaux, des champignons, de la flore et de la faune par les éléments traces métalliques (ETM), les composés traces organiques (CTO) et les micro-organismes pathogènes.

Aussi, depuis 1997, **les épandages de boues de station d'épuration sur parcelles boisées sont interdits**. Ils ne sont effectués qu'à titre expérimental et après autorisation préfectorale (décret du 8 décembre 1997). Le réseau ERESFOR (voir encadré) coordonne les expérimentations pour développer les connaissances en la matière et asseoir les évolutions réglementaires sur des bases solides.

Le présent article dresse le bilan de l'expérience conduite dans ce cadre en forêt domaniale de Chantilly pour tester ce type d'épandage en gestion forestière « ordinaire ».

## L'essai de Chantilly, par rapport aux autres expérimentations

Les études menées en France sur les conséquences environnementales des épandages de boues en milieu boisé sont peu nombreuses. **La valorisation des boues en milieu forestier a été étudiée en France depuis les années 1970**, mais sans véritable prise en compte des effets environnementaux. Les premières expérimentations réalisées en France sont principalement les essais mis en place en 1975-76 par l'INRA Nancy (Le Tacon *et al.*, 1988) et les essais en contexte méditerranéen mis en place par la Société du

### Le réseau ERESFOR

Créé en 1999, ERESFOR est un réseau national de sites expérimentaux sur l'épandage de produits résiduels sur parcelles boisées. Il a pour objet l'acquisition de connaissances et l'observation sur le long terme afin de constituer un référentiel technico-scientifique au niveau national.

Coordonné par l'INRA de Bordeaux, il regroupe 25 sites expérimentaux répartis sur tout le territoire français. Chaque site est géré par un organisme concerné par le sujet : 8 sites sont gérés par le FCBA, 7 par l'INRA, 6 par l'IDF, 2 par l'ONF (dont celui de Chantilly) et 2 par l'Université d'Aix-Marseille. Ces sites ont été choisis en fonction de leur représentativité à l'échelle régionale et nationale et parce qu'ils couvraient une large gamme de sols, de climats et d'essences forestières.

Les boues testées recouvrent presque tous les types de boues d'épuration : origine urbaine, industrielle et papetière ; forme liquide, pâteuse, déshydratée ou solide ; après traitement de l'eau primaire, physico-chimique ou biologique ; conditionnement (pour stabilisation) aérobie, anaérobie, par chaulage ou par compostage.



## Repères

Les **boues d'épuration** sont les principaux déchets produits par une station d'épuration. Ces sédiments résiduels sont principalement constitués de particules solides non retenues par les traitements en amont de la station d'épuration, de matières organiques non dégradées, de matières minérales et de micro-organismes.

Les **éléments traces métalliques** (ETM) sont des éléments naturellement présents en très faible quantité dans un milieu. On utilise également l'expression métaux lourds ou bien oligo-éléments. Les ETM les plus connus pour leur dangerosité sont le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn). Il faut ajouter à cette liste l'arsenic (As) et le sélénium (Se), qui ne sont que des Éléments Traces et pas des métaux. L'ingestion à fortes doses de certains ETM peut atteindre gravement la santé humaine. Généralement, les ETM attaquent le système nerveux et peuvent être impliqués dans différents cancers. L'intoxication de l'homme par les ETM est souvent provoquée par l'ingestion ou l'inhalation de ces éléments.

Les épandages de boues de station d'épuration sur des sols apportent à l'écosystème certains ETM qui peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire. Néanmoins, les produits forestiers ne constituent pas une source alimentaire importante pour l'homme. Les différentes sources de contamination peuvent donc être le gibier, les fruits sauvages, les champignons et l'eau de la nappe, mais très peu d'études ont été réalisées concernant les effets des ETM sur la santé humaine après épandage en milieu forestier.

Les **composés traces organiques** (CTO) contenus dans les boues de station d'épuration sont des produits chimiques (pesticides, hydrocarbures, détergents...). Ils sont présents en quantité infinitésimale dans le milieu naturel et sont très résistants à la biodégradation. Au même titre que les ETM, ces différents produits peuvent devenir toxiques.

Le **décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées** définit les règles d'épandage en agriculture. Il vise notamment à éviter des concentrations trop importantes de métaux lourds ainsi que le lessivage des nitrates. Les apports de boues ne doivent pas dépasser 30 tonnes de matière sèche par hectare (tMS/ha) sur 10 ans. Des concentrations maximales d'ETM et de CTO à ne pas dépasser dans les boues ainsi que dans les sols sont également définies. En ce qui concerne les parcelles boisées, seuls les épandages à titre expérimental peuvent être effectués après autorisation préfectorale.

ayant débuté avant le décret de 1997 fixant l'apport maximal à 30 tMS/ha sur 10 ans, une modalité 50 tMS/ha a pu être testée ;

■ on souhaitait mesurer l'impact d'un apport massif de boues de station d'épuration tant sur le plan de la croissance et de la nutrition des plants que sur le plan environnemental, **dans le cadre de la gestion forestière habituelle** ; les projets expérimentaux plus récents visent essentiellement les parcelles boisées exploitées intensivement pour la production de bois ou de biomasse comme les peupleraies, les plantations ou les taillis à courte révolution ;

■ le protocole est complet ; il a permis un **suivi pendant 10 ans des effets de l'épandage des boues sur la croissance des plants** mais aussi de l'impact sur les différents compartiments de l'écosystème (sol, eaux de percolation, flore).

### Présentation du dispositif

#### Contexte et objectifs

Le Chêne sessile est une essence que l'on cherche particulièrement à développer dans l'Oise, pour la qualité de son bois, mais aussi pour son tempérament plus social et sa meilleure résistance aux sécheresses que le chêne pédonculé. Par ailleurs, la forêt de Chantilly présente des sols relativement pauvres.

L'étude visait donc à tester si l'effet améliorateur et fertilisant d'un apport de boues avant plantation sur sol moyennement riche (site 1) et sur sol pauvre (site 2) pouvait améliorer la nutrition du chêne et ainsi augmenter son accroissement initial, augmenter sa productivité et diminuer ses cycles de production dans le cadre de la gestion forestière habituelle. Mais l'expérimentation avait également pour objectif d'évaluer l'impact d'un apport massif de boues sur le plan environnemental sur un sol présentant un horizon d'accumulation susceptible de retenir des éléments (site 1) et sur un sol très filtrant (site 2).

Canal de Provence dans les années 1980 (Cadillon, 1995).

De ces essais, en contextes forestiers et pédoclimatiques très différents, et avec des qualités et apports de boues variables, on peut tirer quelques tendances générales :

■ la **valeur fertilisante des boues et une amélioration de la croissance des essences forestières** les premières années, même avec des apports massifs de boues (doses 3 à 10 fois supérieures à la réglementation actuelle) ;

■ la **diminution du taux de survie** après épandage et l'augmentation de la végétation adventice ;

■ les réactions différentes des essences forestières en fonction des apports de boues et de l'âge des peuplements.

L'étude de Chantilly présente différentes particularités par rapport à ces dispositifs.

■ c'est la première expérimentation d'épandage de boues en milieu forestier étudiant le **chêne sessile** ;

■ **5 quantités d'apport de boues d'épuration** sont testées ; l'essai

	Site 1	Site 2
Situation	Parcelle 12 commune d'Apremont	Parcelle 179 commune de Pontarmé
Substrat	Calcaire lutétien supérieur recouvert d'une faible couche de sable d'Auvers	Sable et grès de Beauchamp de l'Auversien
Sol	Sol brun lessivé moyennement pourvu en éléments minéraux	Sol podzologique pauvre
Humus	Moder	Mor
Climat	Semi-continentale du bassin parisien ; température moyenne annuelle = 10 °C ; pluviométrie = 700 mm	
Antécédents de la parcelle	Parcelle boisée en épicéa, incendiée en 1990 puis coupée à ras	Parcelle boisée en chêne pédonculé, coupée à ras (rémanents brûlés)

Tab. 1 : caractéristiques des 2 sites du dispositif installé en forêt de Chantilly

### Caractéristiques du dispositif

Le dispositif expérimental a été installé sur deux parcelles de la forêt de Chantilly, dont les caractéristiques figurent dans le tableau 1. Le facteur étudié est la quantité de boue apportée, exprimée en tonne de matière sèche à l'hectare (tMS/ha), avec 8 modalités présentées dans le tableau 2. Chacun des 8 traitements a été répété 4 fois. Il y a donc 32 placeaux par site. Chaque placeau (12 ares) possède une zone centrale de mesure contenant 75 chênes sessiles plantés à la densité de 1 700 plants/ha.

Le site n°1 a été épandu en juin 1992 et planté en décembre 1992. Le site n°2 a été épandu en septembre 1993 et planté en décembre 1993. Les boues ont été épandues quelques mois avant plantation afin de respecter une période de maturation qui diminue leur toxicité. Ces boues résiduelles urbaines déshydratées provenaient des stations d'épuration de Chantilly et de Lamorlaye. Elles étaient riches en azote, phosphore et à fortes teneurs en métaux, notamment en nickel (142 mg/kgMS) ou en plomb (657 mg/kgMS) sans toutefois dépasser les valeurs limites du décret de décembre 1997. On notera enfin la présence non négligeable de calcaire (CaCO<sub>3</sub> : 5,63 % MS) et un pH alcalin voisin de 8.

Modalité	Plantation/semis	Fertilisation/épandage
TM	Plantation	Non (témoin)
S'	Semis	Non
AF	Plantation	Fertilisation minérale selon les carences du sol, localisée au pied des plants
Q1	Plantation	Apport de 2 tMS/ha
Q2	Plantation	Apport de 5 tMS/ha
Q3	Plantation	Apport de 10 tMS/ha
Q4	Plantation	Apport de 20 tMS/ha
Q5	Plantation	Apport de 50 tMS/ha

<sup>1</sup> Le semis n'ayant pas réussi, cette modalité a été retirée de l'étude

Tab. 2 : modalités étudiées dans le dispositif de Chantilly

Paramètre	Méthode d'analyse	Dates des mesures		Observations
		Site 1	Site 2	
Dendrométrie	Hauteur, diamètre <sup>2</sup> et taux de survie des plants	t0, t1, t2, t3, t4, t5, t10	t0, t1, t2, t3	
Flore	Estimation de la biomasse	t2, t3, t4	t1, t2, t3	
	Relevés floristiques	t0, t1, t7, t10	-	
Concentration des éléments (pH, azote, phosphore, cations, chlore et éléments traces métalliques) dans les différents compartiments de l'écosystème	Analyse de sol à 3 profondeurs	t0, t1, t2, t10	t0, t1, t2, t3, t10	Seulement pour les placettes témoin, fertilisation, 5 tMS/ha et 50 tMS/ha
	Analyse des eaux de percolation à 2 profondeurs (20 et 70 cm) par un système de bougies poreuses	de t0 à t3 tous les 2 mois	-	Seulement pour les placettes témoin, 5 tMS/ha et 50 tMS/ha
	Analyse des feuilles	t0, t1, t2, t3	t2	

<sup>2</sup> Les mesures de diamètre ont été prises au collet de t0 à t5 et à 1,30 m à t10.

Tab. 3 : paramètres suivis et dates de mesures

Les paramètres suivis et les dates de mesures sont présentés dans le tableau 3. L'interprétation des résultats a été effectuée de manière statistique par analyse de variance.

## Effets sur la croissance des plants de chêne sessile

### Site n°1, sur sol brun lessivé

Remarque : le site n°1 a été ravagé par les flammes en avril 1997, soit cinq ans après la plantation ; les plants ont alors été recépés.

On note un **effet fertilisant bénéfique sur la croissance en hauteur et en diamètre des plants de chêne dès la deuxième année** : plus l'apport de boue est important, plus l'accroissement des plants est important, jusqu'à 3 ans après plantation. Par exemple, l'accroissement en hauteur dans la modalité 50 t/ha (Q5) est 3 fois plus important que celui du témoin la deuxième année et 2 fois plus la troisième année. Quatre ans après l'épandage, l'effet boue commence à s'estomper : les accroissements en hauteur ne sont pas les plus élevés dans les modalités à fort apport de boue. Par ailleurs, l'apport de 10 t/ha (Q3) de boue apparaît plus efficace en terme d'accroissements en hauteur cumulés sur les 4 premières années qu'un apport de 20 t/ha (Q4) ou 50 t/ha (Q5).

En parallèle, **le taux de survie diminue lorsque les quantités de boues apportées augmentent**. A 50 t/ha,

l'augmentation de la végétation concurrente est telle que des dégagements sont nécessaires. Certains plants sont donc malencontreusement cassés ou coupés au cours des opérations. Ainsi, quatre ans après la plantation, le témoin présente un taux de survie de 91 % contre 65 % pour la modalité Q5. Le taux de survie le plus faible correspond à la modalité Q3 qui a subi des attaques de rongeurs.

**Dix ans après l'épandage** et cinq ans après le recépage, **on ne constate plus d'effet significatif ni sur la hauteur ni sur le diamètre des plants**. Le taux de survie reste toutefois plus faible dans la modalité Q5 (66 %) (voir figure 1).

### Site n°2, sur sol pauvre

Contrairement au site n°1, l'effet fertilisant bénéfique des boues sur la croissance des plants est négligeable : **le taux de survie et les accroissements en hauteur et diamètre se révèlent très faibles**.

Dès la première année, le taux de survie s'est trouvé très faible (62 % en moyenne). Trois ans après la plantation, la mortalité des plants de chêne ne cesse d'augmenter avec la concurrence de la végétation. **Le taux de survie est d'autant plus faible que les quantités de boues apportées sont importantes**. Ainsi, il s'échelonne de 47 % pour la modalité témoin à 6 % pour la modalité 50 t/ha. Dix ans après la plantation, le nombre de plants

vivants était si faible que les mesures dendrométriques n'ont pas été effectuées.

Le faible taux de survie rend problématique les comparaisons de croissance. Par exemple, à t3, un accroissement en hauteur de 2,9 cm pour Q5 n'est mesuré que sur 18 plants (4,5 plants en moyenne par placette) alors qu'un accroissement moyen comme celui de TM (1,2 cm) est mesuré sur 142 plants (36 plants en moyenne par placette). Toutefois, les accroissements se révèlent très faibles et il n'y a pas de grande différence sur les hauteurs et diamètres des plants quelle que soit la quantité de boue apportée.

■ Sur sol brun lessivé, les résultats de l'épandage de boues sur la plantation sont positifs sur la croissance en hauteur et en diamètre les premières années. Par exemple, après trois ans on constate un gain de croissance de 30 % avec 2 t/ha à 166 % avec 50 t/ha. Mais l'apport de boues induit une explosion de la végétation accompagnatrice affectant le taux de survie et l'effet sur la croissance n'est plus visible dix ans après l'épandage.

■ Sur sol pauvre (sol podzolique), les apports de boues sont défavorables pour le taux de survie même pour les faibles doses. La croissance en hauteur et en diamètre se révèle très faible pour toutes les modalités.

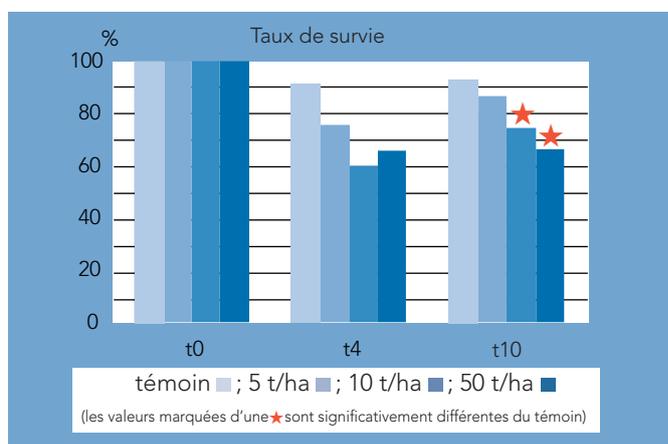
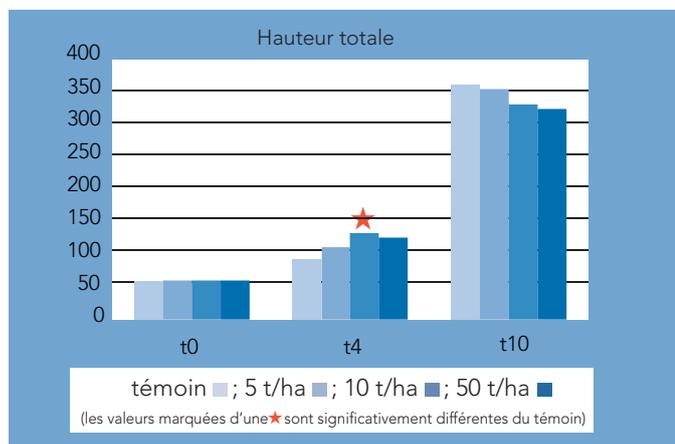


Fig. 1 : hauteur totale des plants (cm) et taux de survie (%) sur le site n°1, à t0, t4 et t10 pour les différentes modalités

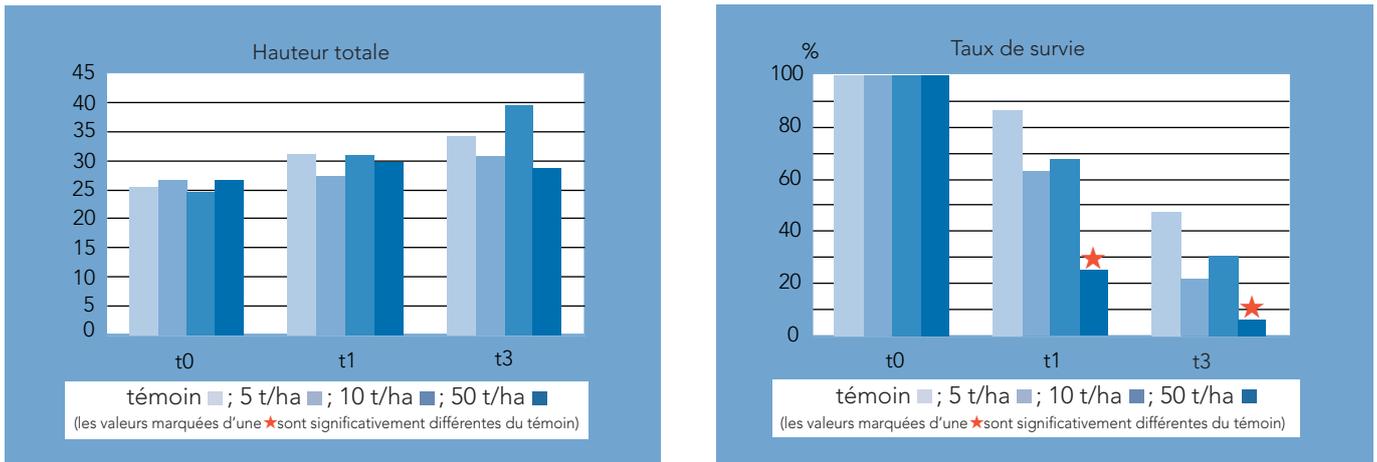


Fig. 2 : hauteur totale des plants (cm) et taux de survie (%) sur le site n°2, à t0, t1 et t3 pour les différentes modalités

### Effets sur la flore

#### Biomasse

Le prélèvement de la végétation accompagnatrice (fougère, ronce, graminées, bouleau) pour les modalités témoin, 5 t/ha et 50 t/ha met en évidence un effet fertilisant des boues. Suite à l'épandage, la biomasse est croissante avec la quantité de boue apportée. Cet effet a disparu 4 ans après l'épandage dans le site 1 et 3 ans après l'épandage dans le site 2. L'apport de boue favoriserait donc le développement de la biomasse adventice à court terme, jusqu'à 2 ou 3 ans après l'épandage.

#### Composition floristique, apparition et disparition d'espèces

Des inventaires floristiques ont été effectués sur la flore vernale à t0, t1 et t10 et sur la flore estivale à t7 et

t10. La flore herbacée et ligneuse a été notée par un taux de recouvrement dans chaque placette.

Des espèces nitrophiles, neutro-nitrophiles et neutro-nitroclines apparaissent très nettement dans les modalités à épandage de grandes quantités de boues (*Sambucus nigra*, *Urtica dioica*, *Solanum dulcamara* et *Galium aparine*). Ceci est à mettre en rapport avec les analyses de sol qui montrent l'effet important des boues sur le cycle annuel de l'azote. D'autre part, les espèces qui disparaissent nettement sont des espèces héliophiles (*Populus tremula*, *Lonicera periclymenum*). Ces disparitions sont le reflet de la très forte concurrence de la végétation dans les modalités à forte dose de boues. Les plants de Chêne en sont d'ailleurs les premières victimes. Enfin, beaucoup d'espèces

semblent insensibles aux différentes quantités d'épandage. C'est le cas de *Mercurialis perennis*, *Epilobium angustifolium*, *Calamagrostis epigjos* et pour les espèces forestières de *Salix caprea*, *Tilia cordata*, *Betula pendula* qui sont des espèces pionnières, résistantes à la concurrence de la végétation. Ces espèces se retrouvent indifféremment sur toutes les modalités.

#### Composition floristique, effets sur les groupes écologiques

Les espèces notées sur les relevés appartiennent à des groupes écologiques dont le nombre peut être révélateur d'une tendance du milieu. Ainsi une analyse des histogrammes de la figure 4 donne un autre aperçu de l'évolution de la flore sur ces 10 années de suivi pour les différentes modalités.

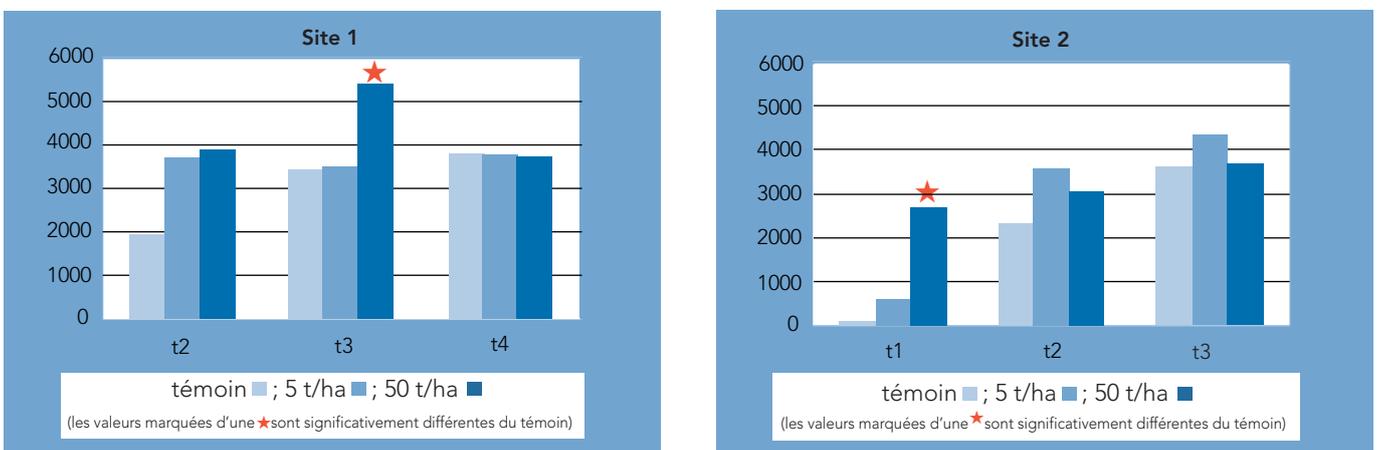


Fig. 3 : valeurs moyennes de la biomasse (Kg MS/ha) pour les 2 sites

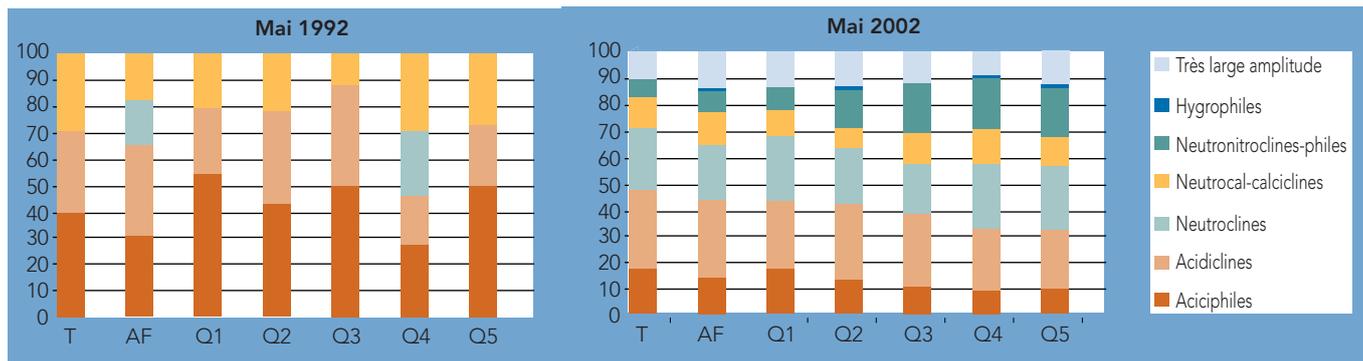


Fig. 4 : répartition des espèces herbacées et ligneuses par groupes écologiques pour les différentes modalités en mai 1992 et mai 2002.

La différence est nette entre 1992 et 2002 mais il faut se méfier de cette comparaison hâtive car en 1992 les relevés floristiques inventoriaient en moyenne 5 espèces, contre près d'une vingtaine d'espèces pour chaque relevé en 2002. Ceci est d'abord dû à l'explosion classique de la végétation suite à la coupe forestière. Ainsi, l'image de 1992 est très peu précise par rapport à celle de 2002 car elle est représentée par des pourcentages sur un très faible nombre d'espèces.

Malgré cette mise en garde, il est tout de même possible de constater que les 7 modalités présentaient peu de différences en 1992 (ce qui montre l'homogénéité relative de départ). Par contre en 2002, un gradient se profile de la modalité témoin à la modalité Q5 avec notamment une augmentation des espèces « neutronitroclines-philes » et une diminution des espèces acidiphiles. Reste une question pour l'avenir : est-ce une évolution durable ou temporaire ?

■ La modification du milieu et de la flore avec l'apport de boue est réelle mais l'appréciation de l'évolution reste qualitative. La dose seuil de boue qui a un effet sur la flore est assez floue : dès 2 t/ha pour l'apparition de certaines espèces (ex : *Galium aparine*) ou vers 5-10 t/ha pour d'autres (ex : *Urtica dioïca* et *Sambucus nigra*).

■ Au final, la contrainte majeure pour la plantation est l'accrû de végétation concurrente très sévère dans les zones épandues à forte dose (> 10 t MS/ha) : cela est coûteux en dégagements et peut avoir des conséquences sur la mortalité des plants.

### Effets sur la concentration des éléments dans les différents compartiments de l'écosystème

#### Site n°1, sur sol brun lessivé

Les prélèvements ont été effectués à trois profondeurs : entre 0 et 5 cm, entre 15 et 25 cm et dans l'horizon Bt (horizon caractérisé par une accumulation d'argile).

L'effet de l'épandage de boues est principalement constaté dans la modalité 50 t/ha. On observe rapidement un enrichissement progressif notable en éléments fertilisants dans les 5 premiers centimètres du sol : augmentation rapide du pH, de la matière organique, du phosphore et de l'azote ; la baisse du rapport C/N témoigne de l'amélioration de la minéralisation. On note également un enrichissement en cations (magnésium, calcium, potassium). Les migrations majeures concernent l'azote que l'on retrouve aux 3 profondeurs. Dès la deuxième année, on constate dans le niveau 15-25 cm une augmentation significative de l'azote, du calcium, du potassium ainsi que des ETM (plomb, cuivre, zinc, chrome et nickel). Dix ans après

l'épandage, les concentrations de ces éléments ont diminué dans les 5 premiers cm mais restent significativement supérieures à celles du témoin. En revanche, les concentrations de phosphore, cuivre et mercure ont augmenté dans le niveau 15-25 cm. Il y a donc eu migration de ces éléments en profondeur.

Pour la modalité 5 t/ha, on note seulement une augmentation du mercure dans les 5 premiers cm la première année et du cuivre dans le niveau 15-25 cm la deuxième année. Dix ans après épandage, il n'y a plus de différence significative entre la modalité 5 t/ha et le témoin.

Les analyses des eaux de percolation ont été réalisées tous les deux mois pendant les trois premières années sur le témoin, le 5 t/ha et le 50 t/ha, à partir de bougies poreuses situées à 20 cm et 70 cm de profondeur. Là encore, l'effet de l'épandage de boues est principalement constaté dans la modalité 50 t/ha. Les eaux de percolation se sont enrichies à 20 puis 70 cm de profondeur en azote, phosphore, cations (calcium, magnésium, potassium et sodium), aluminium et chlore. En ce qui concerne les métaux lourds on retrouve uniquement du manganèse, du nickel et du cadmium dans l'eau. Pour la modalité 5 t/ha, seules les concentrations en cations (calcium, magnésium et potassium) ont augmenté à 70 cm de profondeur.

Les analyses de feuilles ont été réalisées à t0, t1, t2 et t3 dans toutes les modalités : **on ne note que très peu de différences par rapport au témoin**, excepté pour le manganèse et l'azote total pour la modalité 50 t/ha. Mais en général, les éléments accumulés au niveau du sol ne se retrouvent pas ou peu dans les organes de production foliaires.

■ Un fort apport de boues (50 t/ha) entraîne une augmentation durable des éléments fertilisants et des cations dans le sol et dans les eaux du sol. Les teneurs en métaux lourds augmentent également dans le sol mais se trouvent complexés au niveau du sol (complexe adsorbant) et migrent peu en profondeur ou se solubilisent peu dans l'eau.

■ Cette augmentation des métaux lourds dans le sol n'entraîne pas d'accumulation dans les feuilles.

#### Site n°2, sur sol pauvre

Les prélèvements de sols ont été effectués à trois profondeurs : entre 15 et 25 cm, entre 30 et 40 cm et dans l'horizon Bp (horizon caractérisé par une accumulation de matière organique et d'aluminium).

Sur le site n°2, **les migrations d'éléments dans le sol ont été plus rapides que dans le site n°1**. Dès la deuxième année, on a constaté, aux trois profondeurs, un effet fertilisant (azote et phosphore) de l'apport de boue de 50 t/ha par rapport au témoin, ainsi qu'une augmentation en métaux lourds (zinc, manganèse et nickel), sans toutefois dépasser les normes.

La troisième année a confirmé l'effet fertilisant et progressif de l'apport de boue à 50 t/ha mais cet effet reste relativement faible. Par rapport aux teneurs observées sur le site n°1, l'effet fertilisant sur le site n°2 semble négligeable. De plus, le rapport C/N fluctue chaque année sans que l'on constate une réelle

diminution globale, signe que la minéralisation n'est pas améliorée.

On note que certains éléments ne commencent réellement à migrer que trois ans après épandage, c'est le cas du cuivre dans le niveau 15-25 cm, aussi bien à 5 qu'à 50 t/ha. Dix ans après l'épandage, l'apport de boue à 50 t/ha n'est visible que pour l'azote aux trois profondeurs, pour le phosphore dans le niveau 15-25 cm et pour le calcium dans le niveau 30-40 cm.

Dans les feuilles, on constate un enrichissement en azote, phosphore, magnésium pour les modalités 5 et 50 t/ha ainsi qu'une augmentation du calcium, du chlore et du cuivre dans la modalité 50 t/ha deux ans après la plantation. Pourtant, cet enrichissement n'a pas de conséquences sur la croissance des plants. On peut donc supposer que la croissance des chênes est limitée par la forte concurrence en eau due à l'explosion de la végétation herbacée d'une part et au caractère très drainant du sol d'autre part.

■ Il semble que le lessivage soit beaucoup plus accentué pour ce sol podzolique que dans le site n°1. En effet, on retrouve des éléments métalliques en profondeur les trois années suivant l'épandage alors que pour le site n°1, les métaux lourds semblaient retenus en surface. À ce jour, les connaissances restent lacunaires, sur la spéciation des ETM dans le sol (forme complexée, adsorbée, soluble organique ou inorganique) laquelle détermine leur dynamique et les mécanismes de leur mobilité.

■ Dans les feuilles, il n'y a pas de variation des métaux lourds : les ETM ne semblent donc pas consommés par les plants de chêne sessile. Par contre, on y observe un enrichissement en éléments fertilisants, sans que la croissance des plants puisse en bénéficier.

#### Bilan de l'expérimentation

L'apport des boues n'a pas eu les mêmes effets sur les deux sites. De plus, le site n°1 a fait l'objet d'une importante attaque de rongeurs en 1995 puis a été ravagé par les flammes 5 ans après la plantation et le site n°2 a connu de très fortes mortalités. Ainsi, le bilan reste complexe à dresser mais, dans les deux sites, on peut déceler différents effets de l'épandage de boues.

Sur sol podzolique pauvre (site n°2), où la fertilisation serait la plus intéressante du point de vue de l'installation des jeunes plants, les résultats de survie et de dendrométrie sont mauvais. Le sol très filtrant a encouragé le lessivage des éléments fertilisants qui n'ont pu être disponibles pour les plants. Ces derniers ont donc subi la concurrence de la végétation herbacée et ligneuse pour l'eau et les éléments nutritifs. De plus, certains éléments métalliques, notamment du zinc et du nickel, ont migré en profondeur dès un épandage à 5 t/ha. Cet effet a été de courte durée (de l'ordre de deux ou trois ans).

Sur sol brun lessivé (site n°1), où la fertilisation n'est pas nécessaire dans le cadre de la gestion forestière habituelle, les résultats sont positifs en termes de croissance durant les 5 premières années. Mais cet effet n'est plus décelable au bout de 10 ans et les taux de survie sont inférieurs pour les modalités avec épandage de boues. La composition chimique du sol est modifiée par l'apport de 50 t/ha de boue, principalement dans les 5 premiers centimètres. Même si les valeurs restent toujours inférieures aux valeurs de référence du décret de décembre 1997, l'effet est encore très visible 10 ans après l'épandage. De même, on observe temporairement des augmentations modérées des teneurs en éléments fertilisants et cations dans les eaux de percolation. Beaucoup de métaux lourds restent complexés au niveau du sol.

L'apport de boue est également visible sur la flore : la végétation est réellement dopée par l'épandage en abondance, en vigueur et en composition (avec évidemment une abondance accrue des nitrophiles). Ceci représente une concurrence pour les plants pouvant expliquer les taux de survie plus faibles ainsi que la croissance en hauteur plus élevée.

Finalement, l'épandage de boues à faible dose (inférieure ou égale à 5 t/ha) n'apporte pas d'amélioration notable de la croissance des plants et l'épandage à dose élevée (50 t/ha) entraîne une augmentation de la concentration d'éléments toxiques dans le sol ce qui affecte le taux de survie des plants. Le traitement à 10 t/ha serait peut-être une dose qui permettrait un meilleur compromis entre l'effet fertilisant recherché et les contraintes de maîtrise des éléments à risque.

## Conclusion

En dehors des limites expérimentales, si cette étude traduit la valeur fertilisante d'un apport de boue sur sol forestier, elle nous permet de conclure à un effet :

- négatif d'un apport de boues sur sol podzolique là où le complément d'éléments nutritifs aurait pu être intéressant pour l'installation du Chêne sessile sur sol sableux ;
- inutile voire néfaste d'un apport massif sur sol brun lessivé et positif d'un apport modéré (environ 10 t/ha) mais d'un intérêt limité dans ce contexte pédologique.

Ainsi, la piste des épandages en gestion forestière ordinaire est peu pertinente. D'autres pistes sont actuellement explorées sur les parcelles boisées exploitées intensivement pour la production de bois ou de biomasse comme les peupleraies, les plantations de Pin maritime dans les Landes ou les taillis à courte révolution.

**Gwénaëlle GIBAUD**

direction forêt

ONF, DT Île-de-France – Nord-Ouest

gwenaelle.gibaud@onf.fr

## Bibliographie

Décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. JO du 10 décembre 1997, pp. 17822-17825

Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. JO du 31 janvier 1998, pp. 1563-1571

BAILLY A., GAUTRY J.Y., CARNUS J.M., BENBRAHIM M., 2004. Etat de l'art sur l'épandage en forêt de boues de stations d'épuration urbaine et de boues de papeterie. Bordeaux : AFOCEL – INRA. 72 p., ann.

CADILLON M., 1995. La valorisation de boues de stations d'épuration pour le reboisement en contexte méditerranéen : les principaux enseignements des expérimentations menées par la Société du Canal de Provence ; Les Boues de stations d'épuration urbaines, ENGREF-CEMAGREF Editions, pp. 251-267

CARNUS J.M. et al., 2002. Epandages expérimentaux de boues sur parcelles boisées : recommandations pour la conception et le suivi des dispositifs expérimentaux. Bordeaux : INRA. 53 p.

CORME T., PILARD-LANDEAU B., PIAT J., 1992. Expérimentation d'épandage de boues d'épuration en sylviculture, Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest.

LE TACON F., BOUCHARD D., GARBAYE J., 1988. Augmentation de la croissance initiale du Frêne (*Fraxinus excelsior* L.) par l'épandage de boues de station d'épuration

urbaine et plantation intercalaire d'Aulne blanc (*Alnus Incana* L.Moench). Revue Forestière Française, vol. 40, n° 2, pp. 117-125

MAURICE S., PILARD-LANDEAU B., PIAT J., 1993. Expérimentation d'épandage de boues de station d'épuration en forêt (suite 1). Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest. 44 p.

PICARD M., PILARD-LANDEAU B., PIAT J., LE GOUGUEC P., 1994. Expérimentation d'épandage de boues de station d'épuration en forêt (suite 2). Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest. 51 p.

PILARD-LANDEAU B., PIAT J., LE GOUGUEC P., 1996. Expérimentation d'épandage de boues de station d'épuration en forêt (suite 4). Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest. 42 p.

PILARD-LANDEAU B., 1998. Epandage de boues de station d'épuration avant plantation de chêne sessile. Bulletin d'information STIR Nord Ouest, n° 4, pp. 105-108

PILARD-LANDEAU B., 1999. Bilan de l'essai d'épandage de boues de stations d'épuration en forêt de Chantilly. Compiègne : ONF STIR Nord-Ouest. 8 p.

TROUILLARD K., 1997. Epandage de boue de station d'épuration avant plantation de Chêne sessile en forêt de Chantilly (Oise), ONF – STIR Nord-Ouest, 6 p. Août

SIMON E., MARTIN H., 2003. Synthèse du suivi floristique sur le dispositif « Epandage de boue » en parcelle 12, forêt de Chantilly. Compiègne : ONF Service Technique Forêts. 5 p.

THOMAS A.L. et al., 2004. Le réseau "ERESFOR", Epandages de produits RESiduaireS sur parcelles FORestières. Actes des journées techniques ADEME : Retour au sol des matières organiques. 27-28 avril 2004, Paris, pp. 247-257

# Dossier



## Exploitation respectueuse des sols

Depuis notre dossier du printemps 2005 sur le tassement des sols, les choses évoluent et s'organisent : formalisation des engagements de l'ONF, diffusion des enseignements des programmes d'étude et de démonstration, avec des recommandations très pratiques destinées à l'ensemble des acteurs, nouveaux documents cadre et modes opératoires pour progresser vers l'exemplarité. Didier Pischedda a coordonné ce nouveau dossier, avec un éclairage non seulement pratique mais aussi économique.

- p. 24 Positionnement de l'ONF pour une exploitation respectueuse des sols  
par Jean-Michel Mourey
- p. 26 Observatoire des impacts de l'exploitation forestière  
par Emmanuel Cacot
- p. 30 Organisation des chantiers d'exploitation forestière « traditionnels »  
par Emmanuel Cacot
- p. 34 Des systèmes complémentaires existent  
par Didier Pischedda, Michel Bartoli et Jean-Luc Chagnon
- p. 43 Analyse économique des coûts d'exploitation d'un chantier  
par Max Bruciamacchie, Sandrine Costa, Lisette Ibanez
- p. 50 Évolution des systèmes de mobilisation et protection du sol  
par Didier Pischedda

## Positionnement de l'ONF pour une exploitation respectueuse des sols

Les forestiers connaissent depuis longtemps l'impact du compactage des sols limoneux dans le dépérissement de la hêtraie. Ils n'ont pas attendu les effets des tempêtes récentes et l'engouement actuel à protéger l'environnement pour comprendre l'impact croissant sur les sols d'une mécanisation en accroissement constant. Ce problème revêt dorénavant une importance majeure dans le contexte du développement durable, où la protection des sols figure parmi les six critères retenus lors de la conférence d'Helsinki en 1993 pour définir la gestion durable.

À un moment où, grâce au Grenelle de l'environnement, la mobilisation des bois et la protection de la biodiversité ne sont plus antinomiques, l'ONF se doit d'être exemplaire et moteur en matière d'exploitation respectueuse des sols, du fait de son statut d'établissement public, de son image, de son activité dans les milieux naturels et de ses engagements liés aux certifications Iso 14001 et PEFC.

### Des impératifs de gestion durable et multifonctionnelle

Réaliser des exploitations respectueuses des sols répond à trois impératifs : économique, environnemental et social.

Au plan **économique**, les sols constituent le support de la diversité et de la productivité forestière : le maintien de leur fertilité est donc essentiel. Au plan **environnemental**, de nombreux habitats forestiers visés par la directive 92/43 CEE du 21 mai 1992 sont situés sur des sols fragiles (ripisylves, tourbières boisées...); les cadres de gestion proposés par les cahiers d'habitats sou-

lèvent alors toujours ce problème. Enfin, au plan **social**, les dégâts causés aux sols sont la manifestation la plus négative que ressent tout visiteur de la forêt après une exploitation ou des travaux forestiers.

Afin d'assurer une exploitation respectueuse des sols, il importe de connaître l'impact des machines en fonction des types d'engins, de leur équipement et des conditions climatiques. De plus en plus d'études et de tests sur chantiers ont permis en France et à l'étranger de regrouper toute une série de résultats permettant de donner des conseils aux gestionnaires (ouverture de cloisonnements) et aux entreprises (adaptation des matériels et des interventions) pour un respect maximal des contraintes stationnelles.

Les expériences démontrent qu'on peut améliorer l'exploitation forestière à bien des égards, tout en réduisant les retombées négatives de l'exploitation.

### Contexte pour l'ONF

La **politique environnementale** 2007-2011 de l'ONF fait partie intégrante de son système de management. Elle exprime l'engagement de l'établissement pour limiter son impact sur l'environnement, en lien avec sa certification Iso 14001. Cette politique est en parfaite cohérence avec l'objectif de gestion durable des forêts qui constitue le socle de son action quotidienne. Elle comporte 5 axes, l'axe 3 concernant les sols et étant intitulé : « Maintenir un état des sols favorable au milieu forestier ». L'objectif visé est de « limiter le tassement des sols » et concerne tout particulièrement les forêts de plaine.



ONF

*En FD de Chaux, le cours d'eau à franchir a été préservé de tout impact*

L'ONF doit par ailleurs satisfaire aux **exigences PEFC** fixées par le référentiel de certification 2006-2011 en matière de sols dans trois types de documents.

Il s'agit d'abord du **cahier des charges national d'exploitation forestière** (dont les prescriptions ont intégralement été reprises dans le Règlement national d'exploitation de l'ONF). Le § 3.4 impose à l'exploitant non seulement de tenir compte des conditions météorologiques pour choisir la période d'intervention et organiser le chantier, mais aussi d'utiliser des matériels adaptés aux conditions locales et organiser le chantier de façon à limiter l'impact de son activité sur les sols (particulièrement en utilisant les cloisonnements lorsqu'ils existent...).

Il s'agit ensuite des **cahiers des charges à respecter par le propriétaire** et des documents de **politique de qualité de la gestion forestière durable** (PQGFD) définis par chaque entité régionale.

## La volonté de concrétiser

Aux côtés de ses partenaires, l'ONF s'est déjà investi sur le thème de l'exploitation respectueuse des sols comme le démontre le dossier intitulé « Tassement des sols dus à l'exploitation forestière » publié dans les *Rendez-vous techniques* (RDVT n° 8, printemps 2005).

Ce dossier présentait notamment :

- la synthèse des connaissances issues d'une étude bibliographique approfondie ;
- 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, en partenariat entre l'Afocel et le CTBA<sup>1</sup> ;
- l'analyse du problème rencontré en forêt de Soignes (Belgique) où l'échec depuis plus de 50 ans de toute tentative de régénération naturelle est corrélé notamment à l'importance de la compaction des sols ;
- l'intérêt des cloisonnements d'exploitation, devenus désormais des dispositifs quasi incontournables pour l'exploitation et l'extraction des produits forestiers.

Mais de nombreuses initiatives ont été prises dans les territoires en fonction des contextes locaux pour expérimenter des techniques diverses, dans le cadre de projets européens ou grâce au Fonds pour l'environnement et le développement durable (FEDD).

Le programme Life « Ruisseaux de têtes de bassin et faune patrimoniale associée » permet de mettre en œuvre une exploitation respectueuse des ruisseaux et des sols en FD de Chauv, en association avec le programme PROSOL financé par le ministère de l'agriculture. Un chantier de débardage par câble téléphérique a ainsi été organisé, afin de mesurer la différence d'impact sur les sols et les cours d'eau de ce type d'exploitation par rapport à un

débardage classique. En complément, une action pour tester la faisabilité de l'utilisation de l'outil Profor® (cf. RDVT n° 14, automne 2006) est à l'étude.

Le FEDD a par ailleurs permis de financer par exemple :

- un chantier de débardage par câble téléphérique en forêt domaniale du Duc (Yonne),
- des expériences de débardage par câble-mât en zone prioritaire tétras (Moselle), en site Natura 2000 dans le parc naturel des Ballons vosgiens, en réserve biologique dirigée (Vosges), en forêt domaniale de Bellême (Basse-Normandie),
- un chantier d'exploitation par câble zig-zag en réserve biologique dirigée de Bousson (Meurthe-et-Moselle).

D'autres projets sont à l'étude et devraient être programmés en 2008 : débardage par câble téléphérique dans le Morvan (Yonne), par câble-mât dans la réserve naturelle nationale de Chaudefour (Puy-de-Dôme).

## De nouveaux modes opératoires

Le thème de ce nouveau dossier des *Rendez-vous techniques* est tout particulièrement d'actualité à un moment où sont mis en œuvre à l'ONF de nouveaux documents cadres, rédigés en conformité avec les exigences PEFC, et de nouvelles procédures.

Au titre des documents cadres, le **règlement national d'exploitation forestière** adopté fin décembre 2007 constitue pour l'ensemble des intervenants en forêt l'équivalent d'un cahier des clauses techniques générales ; le paragraphe 1.1.2 traite tout particulièrement de la préservation des sols ; mais il en est également question au paragraphe 3.2.1 : la rencontre préalable au début des travaux d'exploitation permet, en cas de sols fragiles, de vérifier que le type d'engins mécanisés est conforme aux spécificités

du terrain et aux prescriptions particulières.

De même, le **cahier des clauses communes nationales des services sylvicoles** va être pour l'entrepreneur de travaux l'équivalent d'un cahier des clauses techniques générales ; on y retrouvera logiquement les mêmes dispositions qu'en matière d'exploitation.

En ce qui concerne les procédures, une **liste de consignes** a été mise au point au niveau national par rapport aux enjeux environnementaux majeurs (dont la fragilité des sols). Cette liste allant être automatisée par les outils informatiques, toute personne chargée de rédiger soit un **cahier des charges** soit une **fiche de consignes** pourra y sélectionner les consignes les plus appropriées au chantier concerné ; elle pourra les personnaliser en tant que de besoin pour satisfaire aux exigences environnementales propres au chantier. L'objectif visé par ces procédures est de permettre de **porter par écrit à la connaissance de tous les intervenants les consignes à respecter**, qu'il s'agisse des entreprises et de tous leurs sous-traitants chargés de réaliser les exploitations et travaux ou de tous les personnels amenés à les surveiller et contrôler.

## La volonté de progrès et d'exemplarité

Ainsi, en matière de débardage respectueux de l'environnement dans les secteurs qui le justifient, grâce tant à la maîtrise opérationnelle des nouvelles procédures mises en œuvre qu'à la volonté partagée de progresser, l'ONF devrait non seulement satisfaire aux enjeux liés à ses certifications Iso 14001 et PEFC mais aussi faire preuve d'exemplarité et être reconnu comme expert sur le sujet.

**Jean-Michel MOUREY**

Responsable politique  
environnementale et PEFC  
ONF- DEDD  
jean-michel.mourey@onf.fr

<sup>1</sup> désormais fusionnés en FCBA : Forêt, Cellulose, Bois, Ameublement

# Observatoire des impacts de l'exploitation forestière

En 2005 et 2006, l'ex AFOCEL a ausculté en détail 48 chantiers représentatifs de l'exploitation forestière en France, pour dresser un tableau précis des impacts observés et recenser les bonnes pratiques, pour la protection du capital sol en particulier. Édifiant.

La pression environnementale sur les opérations d'exploitation forestière est de plus en plus forte : préoccupation du grand public vis-à-vis de la forêt, certification de la gestion forestière durable (PEFC)... De plus, la récupération des bois chablis, suite aux tempêtes de 1999, menée dans l'urgence sur de nombreuses parcelles et bien souvent dans de mauvaises conditions (terrain détrempé), a provoqué des dégâts qui inquiètent les gestionnaires et propriétaires.

Dans ce contexte, FCBA a mis en place en 2005 et 2006 un observatoire de la performance environnementale des chantiers d'exploitation forestière en France afin de répondre aux questions des professionnels. Quels sont les impacts réels observés à la fin d'un chantier pour différents types de coupe et avec différents systèmes d'exploitation ? Quelles sont les pratiques d'exploitation qui prennent le mieux en compte l'environnement ?

## Chantiers et mesures de l'observatoire

### Caractéristiques des chantiers

Au total, 48 chantiers ont été mesurés. Ils ont été choisis en fonction de leur situation géographique et de leur mode d'exploitation afin d'avoir un échantillon le plus représentatif possible des pratiques et des conditions d'exploitation en France : plaine / montagne, résineux / feuillus, petit bois / bois moyen / gros bois, éclaircie / coupe rase, abattage manuel / mécanisé, débardage au porteur / débusqueur... (figure 1).

Les prises de mesures (et donc les chantiers observés) ont été réparties sur toute l'année 2005 et début 2006 pour tenir compte des évolutions climatiques et de la saisonnalité de certaines opérations (exploitation des grumes feuillues de qualité, exploitation en montagne).

### Mesures réalisées

Dans le cadre de cette étude, seuls ont été retenus les impacts mesurés dans la parcelle forestière une fois l'exploitation terminée. Les aspects paysagers, les dégâts occasionnés aux pistes ou aux places de dépôts situées en dehors des parcelles n'ont pas été pris en compte.

Tous les renseignements descriptifs des chantiers ont été relevés :

caractéristiques de la coupe, des engins, conditions météorologiques, texture du sol, pourcentage d'humidité et charge en cailloux du sol, observations générales concernant l'environnement...

En se basant notamment sur le protocole harmonisé européen AIR3-CT94-2097, les mesures suivantes ont été réalisées :

- le relevé des perturbations de la surface du sol (= état du parterre de coupe) ;
- la quantification de la surface parcourue par les engins dans la parcelle ;
- les blessures faites aux arbres du peuplement restant (pour les éclaircies).

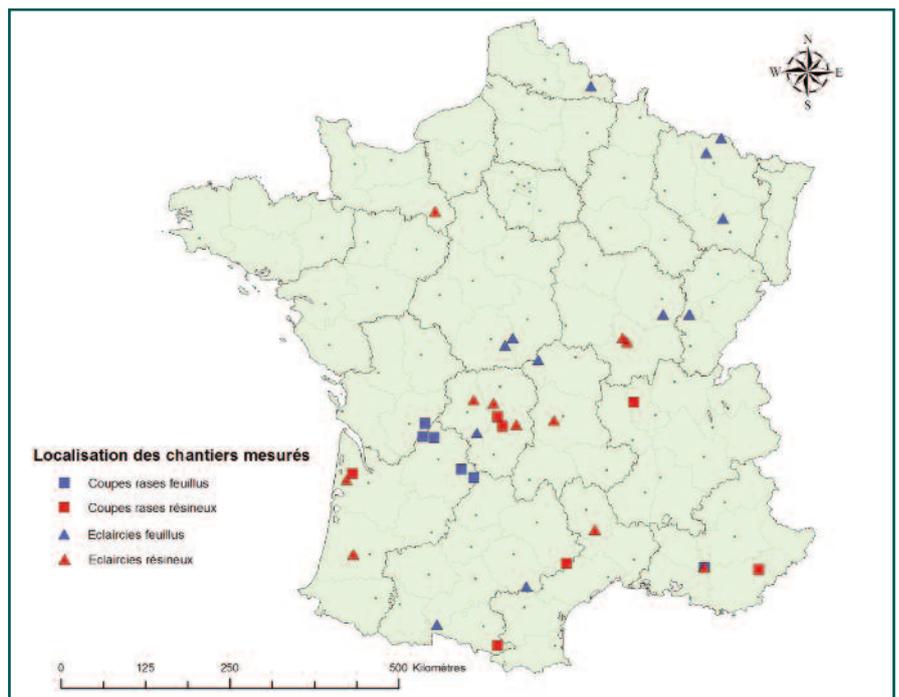


Fig. 1 : les chantiers de l'observatoire ont été répartis géographiquement en France

L'échelle ne permet pas de faire ressortir tous les points (superpositions)

	Coupes rases		Éclaircies	
	Feuilleu	Résineux	Feuilleu	Résineux
Minimum	23 %	8 %	7 %	20 %
Maximum	47 %	51 %	59 %	60 %
Moyenne	35 %	30 %	34 %	36 %

Tab. 1 : surfaces circulées par type de coupe (hors chantiers câble-mât)

## Impacts au sol

### Surface circulée

La surface circulée s'entend comme la surface des traces de roue plus la surface comprise entre les roues. Les surfaces parcourues par les engins sur la parcelle sont extrêmement variables : elles sont comprises entre 7 et 60 % (tableau 1).

Tous types de coupes confondus, la moyenne de surface circulée est de 34 %. Les surfaces parcourues sont minimales sur des chantiers en forte pente avec un débusquage effectué depuis les pistes. Les maxima sont relevés sur des chantiers débardés avec deux engins. En dehors des quelques cas où les engins pénètrent peu ou pas du tout dans la parcelle (débusquage depuis les pistes), la surface circulée est au minimum de 20 %, quel que soit le volume prélevé par hectare. Ce taux de circulation augmente en même temps que le nombre d'engins. Mais c'est le premier engin qui circule sur la plus grande surface

(30 % en moyenne). Les engins suivants ont tendance à reprendre en grande partie les traces déjà existantes.

Le volume prélevé par hectare n'a pas d'influence sur la surface circulée (figure 2). L'organisation des opérations, en particulier lors du débardage, est le paramètre principal expliquant le taux de circulation. Le facteur humain est donc très important.

Paradoxalement, la surface circulée par les engins sur les parcelles n'a pas diminué de façon notable en présence de cloisonnements. La raison de ce constat est double :

- l'écartement entre les cloisonnements est trop important (jusqu'à 40-50 m, voire 100 m dans certains cas), ce qui oblige les chauffeurs à circuler dans les interbandes pour accéder aux bois ;
- les chauffeurs ne cherchent pas à rester sur les cloisonnements car ils n'en perçoivent pas toujours l'utilité.

Pour limiter la surface circulée, il convient de ne pas dépasser 25-30 m entre les cloisonnements. La formation et la sensibilisation des opérateurs sont également primordiales pour intégrer la prise en compte de l'environnement au cours de leurs opérations.

### État du parterre de coupe

L'observatoire a mis en évidence une très grande variabilité des perturbations légères et sévères : selon les chantiers, elles couvrent une surface de 2,2 à 50,4 % du parterre de coupe, avec des perturbations sévères de 0 à 29 % (figure 3). Les perturbations légères correspondent à des mélanges ou déplacements de la litière. Les perturbations sévères sont soit une déstructuration des horizons superficiels du sol, soit des ornières.

Quatre paramètres sont importants pour expliquer le niveau des perturbations :

- la présence d'un débusqueur à câble a tendance à augmenter les surfaces fortement perturbées, cette machine est plus agressive pour le sol (sculpture des pneus, grumes tirées) qu'un porteur ;
- l'utilisation des rémanents comme tapis portant limite la formation des ornières ;
- plus l'humidité du sol est importante et plus il est sensible à la formation d'ornières ;
- une teneur élevée en cailloux limite sa sensibilité aux perturbations sévères.

Les bonnes pratiques ainsi mises en évidence sont de :

- limiter la circulation des débusqueurs sur la coupe (certaines grumes de volume peu important peuvent être débardées au porteur ou rebillonnées à 6-7 mètres),
- faire circuler les engins de débardage sur des lits de branches (maximum 1,50 m de hauteur).

### Tassement du sol

Des mesures supplémentaires de tassement du sol ont été effectuées

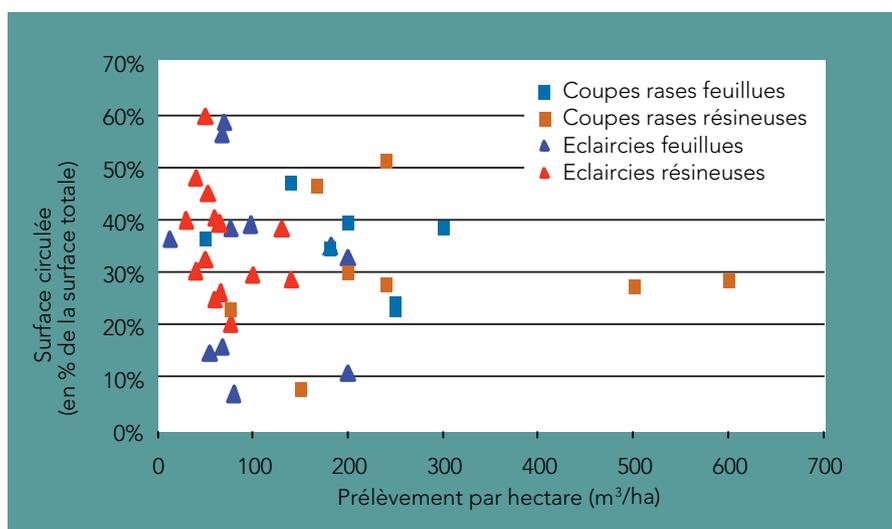


Fig. 2 : la surface circulée par les engins est indépendante du volume à exploiter par hectare

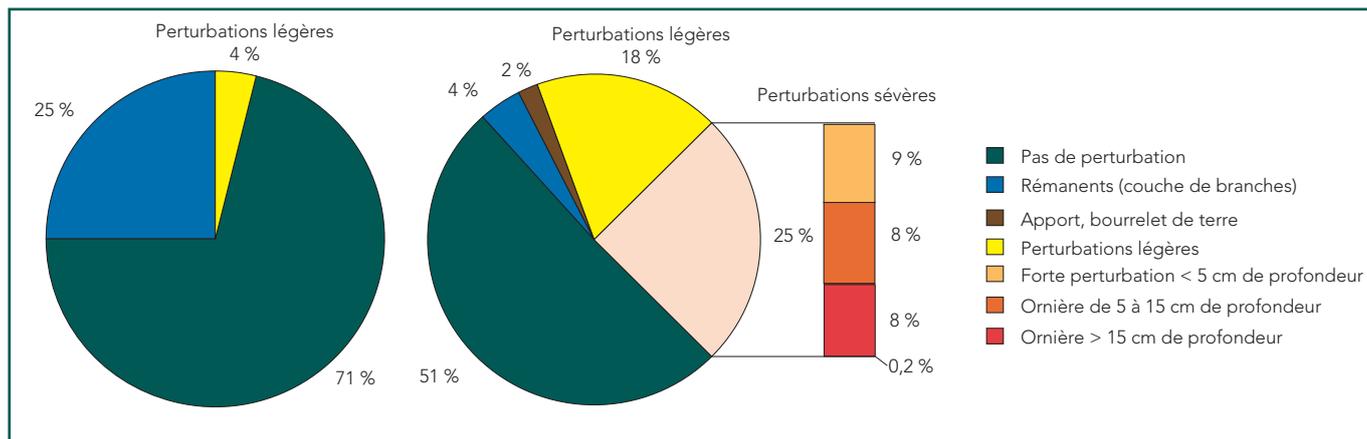


Fig. 3 : état du parterre de coupe après exploitation sur l'un des sites les moins perturbés (à gauche) et l'un des plus perturbés (à droite)

grâce à un pénétromètre à cône, sur 21 chantiers. Le test de pénétrométrie consiste à mesurer la force nécessaire pour enfoncer une pointe verticalement dans le sol. Plus le sol est tassé, plus sa résistance à la pénétration sera forte et moins la pointe s'enfoncera.

Les zones sous les traces de roues ressortent comme tassées par rapport aux zones hors passage : la pointe du pénétromètre s'enfonce en moyenne moins sous les roues que hors passage. Cependant dans quelques cas, le sol est comme « soufflé » en surface après le pas-

sage des engins et le sol apparaît moins tassé que les zones non circulées (fig. 4, chantiers Borreze et Chœurs 1). La figure 4 donne une idée de l'intensité du tassement et permet de classer les chantiers en trois catégories :

- tassement inexistant ou faible (moins de 20 % de différence) : 5 chantiers ;
- tassement moyen (entre 20 et 40 % de différence) : 9 chantiers ;
- tassement fort (plus de 40 % de différence) : 7 chantiers.

Au total, 76 % des chantiers présentent un tassement jugé moyen ou

fort sous les traces de roues. Le sol est d'autant plus tassé et sensible à l'apparition d'ornières que sa charge en cailloux diminue et/ou son humidité augmente.

**Pour réduire les surfaces tassées, il convient de :**

- limiter les surfaces circulées par les engins, avec des produits regroupés, des grues à longue portée, des parcours réfléchis...
- éviter les opérations d'exploitation sur sol humide, a fortiori s'il est sensible (limons, argiles).

### Blessures aux arbres

**Pourcentage et gravité des blessures**

Le pourcentage d'arbres blessés en éclaircie est en moyenne de :

- 17 % dans les peuplements feuillus (minimum 1 %, maximum 52 %),
- 11 % dans les peuplements résineux (minimum 0 %, maximum 25 %),
- 14 % toutes essences confondues.

Les arbres blessés le sont plus sévèrement chez les feuillus que chez les résineux (tableau 2). Ceci est lié en grande partie à l'organisation du débardage. Dans les peuplements résineux, les chantiers sont en général mieux organisés (ouverture de cloisonnements, les engins restent plus sur ces cloisonnements) que dans les peuplements feuillus

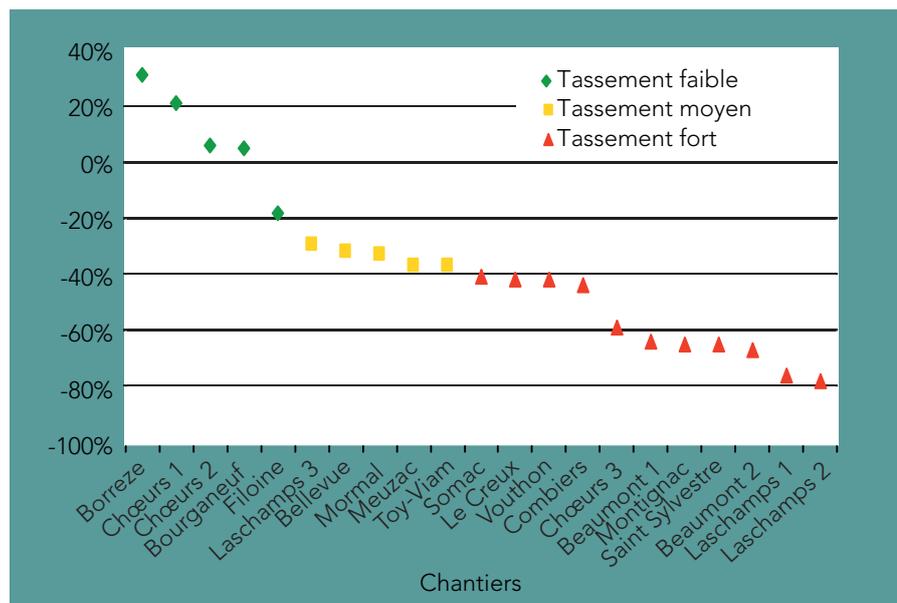


Fig. 4 : différence (en %) entre la profondeur maximale atteinte avec le pénétromètre sous les traces de roues et hors passages d'engins pour les 21 chantiers

	Nombre de blessures par arbre blessé	Surf. moy. de la blessure la plus grave	Profondeur de la blessure la plus grave	
Feuillus	2	292 cm <sup>2</sup>	84 %	des blessures avec écorce ou fibres du bois arrachées
Résineux	1,3	135 cm <sup>2</sup>	59 %	

Tab. 2 : les feuillus sont plus sévèrement touchés que les résineux par les blessures

(circulation plus erratique des engins).

Quelle que soit l'essence, environ 60 % des blessures sont localisées sur la bille de pied au-dessus de 30 cm. En feuillus comme en résineux, plus de 60 % des arbres blessés en éclaircie sont des arbres dominants.

### Origines des blessures

Les pourcentages d'arbres blessés les plus importants s'observent sur des chantiers débardés au débusqueur, où les arbres ont été halés depuis les pistes (parcelles en forte pente). Les grumes tirées provoquent par frottement de nombreuses blessures de taille importante (800 à 1 500 cm<sup>2</sup>), surtout à la base des arbres.

À l'exception de ces chantiers débusqués depuis les pistes, les taux moyens de blessure en automne et en hiver (respectivement 10 % et 7 %) sont plus faibles

qu'au printemps et en été (respectivement 15 % et 17 %). Ceci s'explique simplement par l'état des arbres : ils sont en sève au printemps et en été et sont donc plus sensibles aux blessures lors des frottements.

Sur les chantiers de l'observatoire, ni la densité restante, ni le prélèvement par hectare (figure 5), ni la puissance des engins utilisés n'ont d'influence sur le taux d'arbres blessés. **Le facteur « conducteur » (formation, expérience, organisation, soin apporté...) semble donc un paramètre important pour expliquer les blessures aux arbres.**

### Conclusion

À l'issue de l'analyse des données de l'observatoire, un classement des chantiers selon leur performance environnementale a été réalisé afin de tester quelques critères pertinents et facilement observables sur le terrain (blessures au peu-

plement, surface circulée, ornières). Les chantiers ne peuvent pas être « très bons » pour tous les critères car, par exemple, réduire la surface circulée sur la parcelle implique de haler les bois sur une plus grande distance, donc augmente le risque de blessures aux arbres restants. Enfin, les conditions de terrain imposent parfois des systèmes d'exploitation qui induiront de fait plus de perturbations que la moyenne observée (par exemple, en zone de forte pente, le câblage des arbres depuis les pistes est une nécessité mais provoque un taux de blessure supérieur à la moyenne).

Les conséquences du tassement et des perturbations du sol, ainsi que des blessures, sont connues dans les grandes lignes : réduction de la croissance voire mortalité accrue du peuplement forestier... Des études sont en cours pour affiner ces conséquences et analyser la dynamique de restauration naturelle. Les résultats de l'observatoire viennent compléter ces études car ils permettent de quantifier les phénomènes de tassement du sol et autres impacts à l'échelle des parcelles forestières.

**Emmanuel CACOT**

FCBA station Centre-Ouest  
emmanuel.cacot@fcba.fr

### Bibliographie

CACOT E. et al., 2006. Observatoire des bonnes pratiques environnementales en exploitation forestière. Rapport final, convention DGFAR/AFOCEL n°61.45.80.41/04. AFOCEL. 48 p., ann.

RICHARD G., RANGER J., BRETHERS A., 2007. Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liés au tassement : effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. INRA - ONF

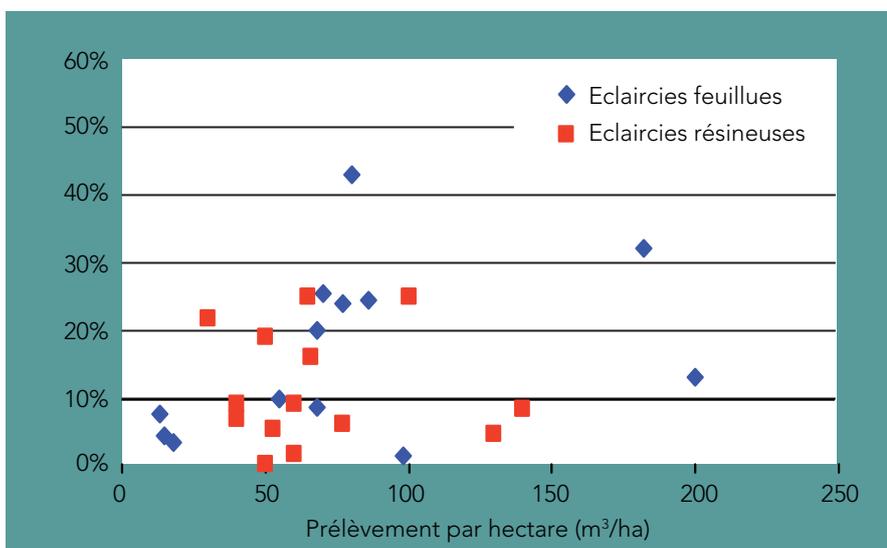


Fig. 5 : pourcentage d'arbres blessés selon le volume récolté par hectare

## Organisation des chantiers d'exploitation forestière « traditionnels »

Avant de penser à des solutions particulières pour les sols les plus sensibles, voyons déjà comment l'organisation des chantiers traditionnels doit préserver les sols. Des progrès sont possibles à tous niveaux : gestion du cloisonnement d'exploitation, choix de machines adaptées, efficacité de la « rencontre préalable »... c'est notre affaire.

Les enseignements issus de l'observatoire mis en place par FCBA (cf. article précédent) montrent l'importance des opérateurs dans la prise en compte de l'environnement, et en particulier du sol, au moment de l'exploitation forestière. Plus précisément, c'est de la façon dont les chantiers vont s'organiser que va dépendre l'état final des parcelles passées en coupe. Ce sont les opérations d'abattage et de débardage qui viennent en premier à l'esprit, mais il ne faut pas oublier qu'une bonne partie des choix faits lors de l'exploitation dépend de décisions prises auparavant par le propriétaire et/ou gestionnaire (martelage, cloisonnements, infrastructures existantes, accessibilité des parcelles...) puis de la discussion et transmission des informations entre ces différents intervenants.

### Préparation de l'exploitation forestière : le cloisonnement

**Responsable : le propriétaire ou le gestionnaire**

Une idée largement répandue auprès des professionnels est qu'il vaut mieux circuler avec les engins de débardage partout sur la parcelle pour diluer les passages et éviter ainsi de créer des ornières qui donnent une mau-

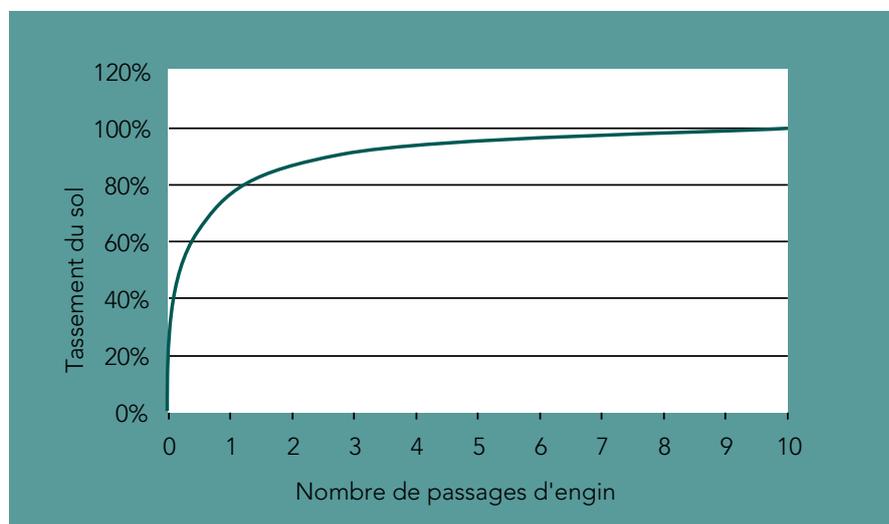


Fig. 1 : représentation schématique du tassement du sol en fonction du nombre de passages d'engin

vaise image du chantier. Or **80 à 90 % du tassement des horizons de surface du sol a lieu entre le premier et le troisième passage d'engin**. La représentation graphique en figure 1 donne une idée de ce phénomène.

Avec cette constatation, circuler sur l'ensemble de la parcelle pour ne pas marquer le sol est une fausse bonne idée qui aura pour effet de tasser le sol sur une très grande surface, avec toutes les conséquences négatives connues sur le sol et les racines (Lamandé et al., 2005). Il vaut mieux avoir quelques ornières localisées qui attirent l'œil plutôt qu'un tassement du sol généralisé sur l'en-

semble de la parcelle mais non visible en apparence. De plus, en circulant un peu partout, le risque d'augmenter la proportion d'arbres blessés s'accroît.

Pour ces raisons, il est préférable d'ouvrir des couloirs de cloisonnement afin de concentrer les passages des engins sur une surface plus faible de la parcelle. Ces cloisonnements peuvent être ouverts dans tous les types de peuplement. Ils peuvent être légèrement sinueux en raison du relief ou d'obstacles (rochers, mares...) mais ils doivent être :

- suffisamment rapprochés pour que les engins n'aient pas à en sortir (entre 16 et 30 m d'axe en axe) ;

- d'une largeur de 4 m ;
- orientés dans le sens de la pente ;
- communiquant entre eux, sans angles aigus avec les pistes et routes.

L'écartement entre les cloisonnements doit être fixé à partir de l'analyse de plusieurs paramètres : le sol et sa sensibilité au tassement (texture, zone engorgée régulièrement ou non), le peuplement (en particulier sa hauteur et le volume des bois à manipuler), les enjeux et objectifs de la sylviculture, les moyens d'exploitation existants et pouvant intervenir sur les parcelles concernées. C'est bien l'analyse de tous ces éléments qui doit conduire au cas par cas à fixer un écartement entre cloisonnements, il n'existe pas de réponse universelle. Ainsi, l'observatoire a montré qu'un pas de cloisonnement de 50 m n'était pas compatible avec la très grande majorité des moyens d'exploitation existants et que, de ce fait, les engins étaient amenés à circuler dans les interbandes. Inversement, un cloisonnement trop serré neutralise une proportion importante de la surface et peut occasionner un « compartimentage » des circulations d'eau dans le sol.

Une fois ces cloisonnements réalisés, ils peuvent être assimilés à des infrastructures pérennes. **Ils doivent donc être préservés tout au long de la vie du peuplement** et ne doivent pas être considérés comme une zone que l'on peut « défoncer » au bénéfice du reste de la parcelle. En effet, si ces cloisonnements sont trop abîmés avec la formation de nombreuses ornières, les engins auront tendance à circuler dans les interbandes pour contourner ces zones qui formeront de nouveau un obstacle lors des exploitations suivantes. Même si un coup de lame a été donné pour aplanir la surface du sol, les impacts en profondeur, en particulier le tassement, restent présents.



Photo FCBA

*Le cloisonnement défoncé (à droite) lors d'une exploitation précédente n'a pu être repris qu'une ou deux fois par le porteur avant que les ornières ne réapparaissent, ce dernier est donc obligé d'emprunter un nouveau passage dans l'interbande (à gauche).*

Le propriétaire ou gestionnaire veillera à préserver leur état en interdisant le débardage à certaines périodes en cas de terrain particulièrement sensible, c'est-à-dire lorsque les sols sont très humides, et en demandant la disposition des rémanents sur les cloisonnements pour réduire l'orniérage. La période de mise en vente est alors importante, en lien avec les délais d'exploitation et les périodes de l'année propices à une exploitation respectueuse des sols.

### Choix des matériels et des systèmes d'exploitation

#### Responsables : l'exploitant et l'entrepreneur, en relation avec le propriétaire ou gestionnaire

Comme pour les écartements des cloisonnements, le choix du système d'exploitation et des matériels doit se faire en fonction du sol (portance), du peuplement (volume et longueur des arbres à exploiter) et des moyens d'exploitation pouvant intervenir. C'est un compromis entre les exigences

sociales (sécurité des opérateurs, pénibilité du travail, disponibilité de la main-d'œuvre), économiques (coûts directs de l'abattage et du débardage, coûts indirects en cas de remise en état des parcelles) et environnementales.

**Il n'existe pas de système ou matériel universel :** chacun, du cheval au câble en passant par le porteur et le débusqueur, a un domaine pertinent d'utilisation. Les préconisations formulées dans le Baden-Württemberg en Allemagne donnent un exemple de choix du système d'exploitation en fonction des contraintes des chantiers (tableau 1).

#### Quelques solutions techniques de bon sens peuvent être rappelées :

- choisir l'engin adapté au terrain (encadré 1) : petit et maniable pour les espacements étroits et les parcours sinueux, léger et de capacité petite ou moyenne pour les terrains sensibles ;
- monter des pneus larges (600 à 800 mm) et basse pression sans augmenter la charge de l'engin ;

	Pente	Sensibilité des sols (fonction de la texture et de l'humidité)			
		Faible	Moyenne	Forte	Sol mouilleux
Plaine ou plateaux	Plat	Engin + cloisonnement		Engin + cloisonnement/Câble aérien	Câble aérien
	< 30 %	Engin + cloisonnement		Câble aérien	Câble aérien
Versant	30-45 %	Engin + cloisonnement		Câble aérien	Câble aérien
	> 45 %		Câble aérien	Câble aérien	Câble aérien

Tab. 1 : exemple de préconisations proposées dans le Baden-Württemberg

mais attention, le pneu le plus large et au profil le moins agressif n'est pas toujours la meilleure solution : s'il n'évacue pas correctement la terre qui s'accumule entre ses barrettes, il se met rapidement à patiner et, dans certains cas, l'engin à vide ne parvient pas à monter les pentes mêmes faibles ;

- monter des tracks pour augmenter la portance, des chaînes pour l'adhérence : ce 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 détrempe), il faut parfois arrêter les opérations en cours au risque de créer des dégâts irrémediables.

### L'organisation des opérations et le savoir-faire

#### Responsables : l'exploitant et les conducteurs d'engin

La principale préconisation est de planifier l'exploitation en fonction des risques terrain/météo, c'est-à-dire de réserver des périodes *a priori* favorables pour exploiter certaines parcelles dont on connaît la difficulté d'accès ou de fragilité en cas de pluie ou de neige. Il convient de traiter par beau temps les zones difficiles et lointaines et de garder comme zones de « repli » des terrains portants ou proches de la route.

#### 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...

Enfin, il est encore trop fréquent de voir des opérateurs attaquer leurs travaux sans avoir pris le temps de faire le tour de la coupe et d'analyser ses spécificités. **Un repérage du chantier est primordial** : il doit être effectué par chaque opérateur avant d'entamer ses travaux. Ceci permet de planifier les activités en fonction de la sensibilité du sol comme évoqué ci-dessus et évite par exemple de se trouver en fond de parcelle devant un obstacle infranchissable. Le document présenté en encadré 2 a été construit pour servir de support lors de ces repérages pour vérifier et compléter les informations.

#### 1 - Extrait du nouveau règlement national d'exploitation forestière de l'ONF

(Paragraphe 1.1 : Protection de l'environnement - 1.1.2 : Préservation des sols)

Dans un souci de préservation de l'intégrité physique des sols, l'intervenant en forêt doit utiliser des matériels adaptés aux conditions locales et organiser le chantier de façon à limiter l'impact de son activité sur les sols.

Lorsque les caractéristiques des sols le justifient, des prescriptions particulières au contrat peuvent être imposées\*. À défaut, le choix du système d'exploitation est à l'initiative de l'intervenant.

Il emprunte avec ses engins et véhicules de débardage les couloirs, cloisonnements d'exploitation, layons et passages désignés à l'ouverture du chantier par l'agent de l'ONF. Dans le cas d'équipements inexistantes ou insuffisants, l'intervenant doit adapter sa technique d'exploitation en fonction des possibilités physiques des sols et dans un souci global de préservation, en concertation avec l'agent de l'ONF.

\* Par exemple, peut être prescrit l'utilisation de câble aérien de débardage, de techniques de petite mécanisation, voire dans certaines situations le débusquage à traction animale ou l'interdiction d'exploitation mécanisée.

## 2 - Laissez une bonne impression !

Pour mettre en place la meilleure organisation possible, il faut que tous les intervenants aient reçu les informations nécessaires concernant le sol et les cloisonnements, mais également sur les cours d'eau ou zones humides, les sites ou espèces remarquables, les limites du chantier, les consignes générales ou particulières... Il est donc important de formaliser le transfert de ces informations entre le propriétaire/gestionnaire et l'exploitant (pour l'ONF, il s'agit de la rencontre préalable entre l'intervenant ou son représentant légal et l'agent de l'ONF, définie dans le nouveau règlement national d'exploitation forestière), puis entre l'exploitant et les différents prestataires de services et leurs opérateurs. Une carte reprenant la totalité de ces renseignements apparaît comme le meilleur outil, dont une copie doit être faite pour chaque intervenant.

Partant de ce principe, FCBA (ex-AFOCEL et ex-CTBA) avec l'ONF, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, les Entrepreneurs des Territoires... ont réalisé un guide de gestion environnementale des chantiers forestiers sous forme de carte « Laissez une bonne impression ! » (téléchargeable sur le site Internet du FCBA [www.fcba.fr](http://www.fcba.fr) ou sur l'intranet de l'ONF).

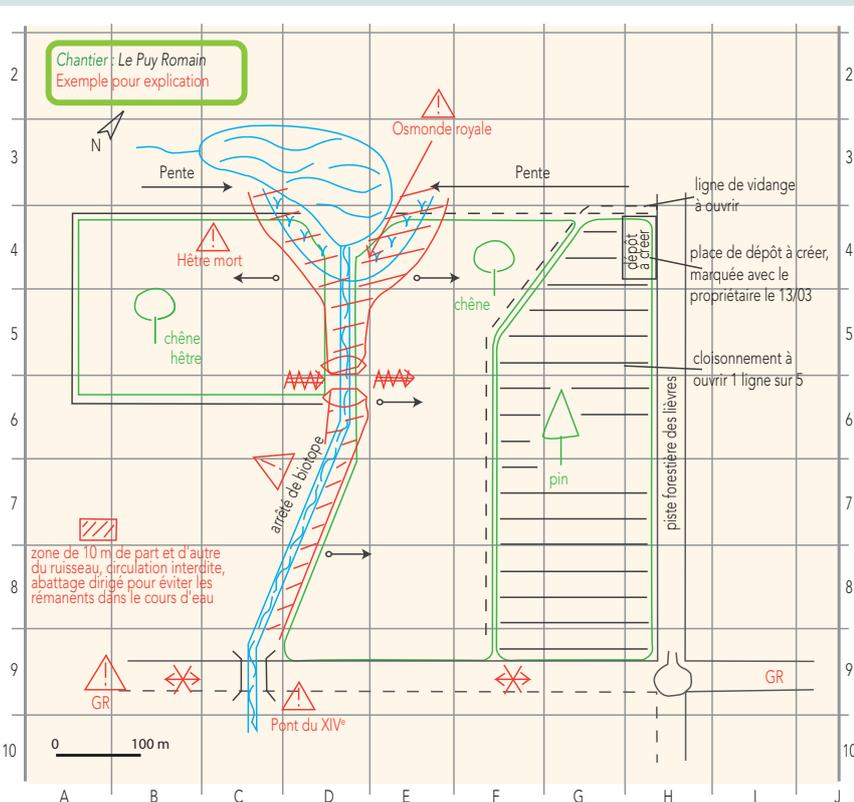


Fig. 2 : détail du guide « Laissez une bonne impression ! »

### Conclusion

L'organisation des chantiers, qui comprend l'ouverture de cloisonnements quand ce n'est pas déjà fait, le choix du bon système d'exploitation, la transmission d'informations entre tous les intervenants

et le repérage préalable à toute opération, est le garant du bon déroulement des chantiers d'exploitation forestière. Elle permet de prévenir les impacts car leur réparation (labour, sous-solage...) reste coûteuse et peu efficace. Le savoir-faire des professionnels est

la clé d'une bonne organisation. La formation des opérateurs pour que tous les éléments cités dans cet article soient compris et appliqués est donc essentielle.

**Emmanuel CACOT**

FCBA Station Centre-Ouest  
emmanuel.cacot@fcba.fr

### Bibliographie

ARMEF, CTBA, IDF, 1995. Manuel d'exploitation forestière. Tome 1. Paris : CTBA, Fontainebleau : ARMEF. 442 p.

CACOT E., 2001. Exploitation forestière et débardage : pourquoi et comment réduire les impacts ? Informations-forêt Afofel, n°637, 6 p.

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.

CACOT E. et PISCHEDDA D., 2005. Récolte des bois et respect du sol : un dialogue à développer entre les acteurs. Rendez-vous techniques n°8, pp. 36-43

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

LAURIER JP. et al., 2001. Classeur pédagogique n°4 : exploitation forestière et environnement. Nangis : AFOCEL

DE PAUL M.A., BAILLY M., 2005. La compaction des sols forestiers : définition et principes du phénomène. Forêt Wallonne, n°76, pp. 39-47

DE PAUL M.A., BAILLY M., 2005. Effet de la compaction des sols forestiers. Forêt Wallonne, n°76, pp. 48-57

## Pour une exploitation respectueuse des sols, des systèmes complémentaires existent

*De 2005 à 2007, le programme « PROSOL » a fait le point des techniques d'exploitation respectueuses des sols et testé en vraie grandeur des systèmes « alternatifs », petite mécanisation et câble, pour démontrer leur performance environnementale et préciser les cas d'utilisation recommandée, en raisonnant au-delà du simple coût immédiat. L'organisation du chantier et sa logistique sont déterminantes.*

Les dégâts aux sols sont la manifestation la plus négative que ressent tout visiteur de la forêt après une exploitation. La récolte des chablis a exacerbé ces dégâts et le constat de sols ravagés a pu être fait en maints endroits. Ainsi, la prise en compte des sols, et plus largement de l'environnement, est devenue une préoccupation grandissante, tant de la part des propriétaires/gestionnaires que des constructeurs, des exploitants et des entrepreneurs de travaux forestiers. L'enjeu du maintien de la fertilité est essentiel, le sol étant, en définitive, le seul support de toute la diversité et de toute la productivité forestière.

L'ONF et le CTBA ont piloté de 2005 à 2007 un programme de bibliographie et de démonstrations de systèmes de récolte alternatifs qui sont utilisés dans d'autres pays européens. Ce projet (« PROSOL » en abrégé), soutenu par le ministère de l'Agriculture, a réuni à la fois les acteurs de la recherche fondamentale (INRA), les représentants des gestionnaires forestiers (ONF et IDF<sup>1</sup>), les centres techniques (CTBA et AFOCEL) et les représentants des entrepreneurs de

travaux forestiers, au travers d'un de leurs syndicats (Groupement syndical des entrepreneurs de travaux forestiers alsaciens). Il s'agissait de (i) faire le point des connaissances sur les effets de la récolte de bois sur le sol et (ii) mettre en place quatre chantiers témoins utilisant des techniques alternatives et mesurer leurs effets par rapport aux techniques traditionnelles.

Nous rendons compte ici des enseignements de ce programme, que nous avons présentés à la dernière conférence internationale sur l'ingénierie forestière en octobre 2007, au Québec (Cacot et Pischedda, 2007).

### Une bibliographie approfondie sur les processus mis en cause

En France, la forêt est souvent installée sur des sols fragiles peu propices à l'agriculture. Les sols limoneux hydromorphes en sont un cas ; ils portent souvent de très beaux peuplements (chêne sessile en particulier). De nombreux habitats forestiers visés par la directive 92/43 CEE du 21 mai 1992 sont également sur des sols sensibles

(ripisylves, tourbières boisées...) ; pour eux, les cadres de gestion proposés par les Cahiers d'habitats soulèvent toujours ce problème. Se cumulent alors un enjeu de maintien durable de la fertilité des sols et un enjeu patrimonial.

Il n'y pas eu, en France, de recherche approfondie dans ce domaine pour le milieu forestier malgré des travaux que l'on pourrait qualifier de pionniers de la part du CTBA (Rotaru, 1983), et malgré les communications qui s'ensuivirent au niveau national et international (Congrès Mondial à Mexico (Rotaru, 1985a et b) et séminaire FAO/CEE/OIT (Rotaru, 1989)) avec l'introduction de la notion « interactions exploitation forestière et sylviculture-environnement ». Seuls quelques travaux de recherche appliquée ont été réalisés dans les années 1990 (CTBA, ONF, AFOCEL) sans pouvoir aborder les problèmes de fond concernant les conséquences sur le sol.

Or le sol est un milieu vivant qui évolue pour atteindre un équilibre avec les caractéristiques de l'environnement. Cette dynamique naturelle est lente et, à l'échelle humaine, le sol semble être une ressource peu voire non renouve-

<sup>1</sup> Institut pour le Développement Forestier – Centre national professionnel de la propriété forestière (CNPPF)

lable pour tout ou partie de ses caractéristiques ; par exemple, la perte de matière par érosion physique ou chimique est irréversible. L'altération de la qualité physique des sols, notamment de la porosité, a des conséquences négatives sur le développement des arbres, par l'intermédiaire de leurs racines (perte de croissance, dépérissement, diminution de la stabilité), et sur le développement des semis qui auront du mal à s'installer dans de tels milieux. Le cas de la hêtraie de Soignes (Belgique), où la relation entre le compactage et la difficulté de régénération naturelle est parfaitement démontrée (Loyen, 2005), en est un exemple très documenté.

Les principales questions posées pour l'exploitation forestière sont les suivantes : quelles sont les propriétés du sol qui prédisposent à la dégradation physique ? Quelles sont les conséquences pour les différentes fonctions de l'écosystème (Lamandé et al. 2005 ; Rendez-Vous techniques n° 8, 2005) ? Deux éléments doivent être mis en relation : la contrainte appliquée par la machine et la résistance du sol, laquelle dépend de ses propriétés physiques et de son état d'humidité. La réponse du sol se traduit par une déformation plus ou moins importante visuellement et durable (voir encadré).

Si les propriétés physiques du sol peuvent être considérées comme une variable interchangeable, les types de déformations et leur étendue dépendent fortement des techniques de mobilisation employées mais encore plus directement de l'état du sol au moment des opérations, en particulier de son humidité. Ainsi, la détermination d'un seuil limite à partir duquel les conséquences de l'application d'une contrainte sur le fonctionnement du sol sont trop importantes est un enjeu majeur.

#### Les déformations sont classées en trois catégories principales (décrites dès 1951 et vulgarisés par C. Rotaru en 1983)

**Le scalpage** : déplacement et souvent mélange de matériaux suite à une contrainte appliquée majoritairement selon une direction tangentielle à la surface du sol (patinage des roues, glissement latéral ou dérapage).

**L'orniérage** : creusement de la surface du sol (le matériau déplacé peut former des bourrelets) suite à des contraintes à la fois tangentielles et perpendiculaires à la surface du sol. Il en résulte un déplacement et souvent un mélange des matériaux ainsi qu'un tassement sous le passage de la roue.

**Le compactage** : tassement excessif du sol qui correspond à une réduction de volume sans changement de masse suite à une contrainte perpendiculaire à la surface du sol ; c'est donc la porosité qui est réduite.

Sur le plan pratique, il permettrait de déterminer à partir de quand un engin ne peut plus circuler sur le terrain. Cependant, le caractère général d'un tel seuil est difficile à appréhender car les conséquences sur le long terme sont très complexes et peu de données scientifiques comparables existent sur le sujet. Il est toutefois possible de prévoir grossièrement les risques en fonction des types de sols. Des systèmes experts d'aide à la décision existent en Allemagne et méritent d'être développés (Matthies et al. 2006 et voir encadré sur Profor® page suivante).

#### Une analyse complexe mais possible

Ainsi, il faut raisonner les travaux forestiers pour limiter les risques de dysfonctionnement du sol entraînant des conséquences néfastes sur le long terme. La compréhension de ce qu'est la gestion durable des sols est loin d'être simple et demande singulièrement à être affinée.

Il est cependant possible de porter les réflexions sur la gestion de la mobilisation des bois sur quatre grands points très interconnectés et qui interviennent directement sur le coût non seulement de la récolte mais aussi de la remise en état sur le moyen et long terme.

■ **La période d'intervention des engins** : la mobilisation rapide des bois renversés par les tempêtes de 1999, notamment pour éviter leur dépréciation, a bien montré la réalité des effets sur le sol alors que le printemps suivant était pluvieux.

■ **Le choix de matériels adaptés y compris les accessoires** (pneus basse pression, tracks...) : les machines forestières travaillent dans des conditions difficiles et se doivent d'être robustes et maniables tout en restant productives, d'où une évolution vers des machines plus lourdes et plus fiables que par le passé. Cependant des accessoires existent pour diminuer la pression au sol.

■ **La nécessité du cloisonnement d'exploitation** : l'implantation de cloisonnement permet de limiter la surface potentiellement tassée en concentrant la circulation des engins car le tassement a lieu essentiellement lors des tout premiers passages. Elle doit être pensée en fonction de la topographie, du réseau de fossés existants et des obstacles naturels, et l'usage réfléchi des cloisonnements doit se faire en lien avec les trois autres points.

■ **Le choix du système d'exploitation** concerne les questions de l'organisation globale du chantier : comment sortir les produits de la parcelle (bois courts/bois longs), où les façonner (sur coupe ou sur une place de dépôt ou entrée scierie) et quels engins de débardage choisir.

### Estimer la praticabilité des cloisonnements : le diagnostic ProFor® et ses difficultés pratiques

Le logiciel ProFor® a été présenté dans les *Rendez-vous techniques* n° 14 (Matthies et al., 2006). Il permet de juger de façon objective, impartiale tout au moins, de la praticabilité des cloisonnements. Cette notion de praticabilité, essentielle pour une gestion raisonnée des sols forestiers, est actuellement appréciée de façon trop empirique et, en conséquence, les dégâts sont plus constatés que prévenus.

La mise en œuvre de ProFor® a été testée en situation réelle sur trois chantiers de Haute-Marne. Impliquant agents responsables des coupes et ETF, ce test devait répondre aux questions :

- 1° Est-il facile de mesurer la teneur en eau ? Quelle est sa variabilité le long des cloisonnements ?
- 2° Comment varie la teneur en eau après le passage d'une machine ? Quelle est la différence entre les zones circulées et non circulées ?
- 3° Les seuils annoncés par ProFor® permettent-ils vraiment de prévenir des impacts très élevés aux sols ?
- 4° Est-il simple de connaître de la part des ETF les caractéristiques (détaillées) des machines qui vont être utilisées ?

D'après nos essais, circuler en-deçà du seuil ProFor® calculé garantit bien que les cloisonnements sont praticables sans création de boue. Mais le processus d'appréciation est complexe et demande encore de mûrir un protocole robuste.

Il est tout à fait possible de s'organiser pour connaître les données techniques des engins et constituer une base de données par ETF. En revanche, l'appréciation de la texture du sol et la mesure de son humidité volumique soulèvent des difficultés pratiques. Ces deux paramètres présentent en effet une grande variabilité dans le temps et dans l'espace. L'estimation de la texture « aux doigts », telle qu'on la pratique pour caractériser les stations, n'est pas assez précise. La mesure de l'humidité volumique, à réaliser très peu avant le passage de l'engin (souvent dans la précipitation), demande un minimum de répétitions des mesures. Cela ne permet pas d'envisager pour l'instant le déploiement de cet outil.

Par ailleurs, comme nos essais ont pu se dérouler dans des conditions d'humidité très variées, l'étude a montré qu'un engin *a priori* « inquiétant » peut être adapté ; tout dépend du contexte dans lequel on le fait travailler ! Elle a aussi montré comment, d'un passage à l'autre, le sol d'un cloisonnement pouvait, si l'on peut dire, « s'user ».

Vincent BENARD,  
animateur sylvicole  
agence ONF Haute-Marne

### Quatre chantiers tests avec des techniques alternatives

L'objectif principal des quatre chantiers du programme a été de montrer, aux entrepreneurs de travaux forestiers (ETF) et aux forestiers propriétaires ou gestion-

naires, des techniques très rarement pratiquées en France mais éprouvées à l'étranger, et dont les performances en matière de protection des sols sont connues (plusieurs communications sur le thème des systèmes de récolte respectueux du sol lors de la

deuxième conférence internationale sur l'ingénierie forestière en Suède ; Pischedda, 2003).

À l'étranger, en Autriche et en Irlande par exemple, l'utilisation du débardage par câble en terrain plat a été mise au point et a montré que les dégâts au sol pouvaient parfaitement être évités en faisant passer les arbres au-dessus du parterre des coupes. Il fallait que le chariot puisse se mouvoir à l'horizontale. Plusieurs matériels existent aujourd'hui. De son côté, la Suède a développé le concept de la petite mécanisation, dont on comprend qu'elle puisse être aussi une approche diminuant les impacts sur les sols forestiers et moderne sur le plan ergonomique pour des premières éclaircies manuelles.

Il a fallu répartir ces chantiers sur le territoire afin de permettre au plus grand nombre de venir les voir. En effet, il fallait organiser des chantiers en vraie grandeur pour éviter l'écueil de simples démonstrations, qui sont difficilement extrapolables, et assurer une forte promotion auprès des professionnels, des gestionnaires, des collectivités, des administrations et des médias régionaux et nationaux.

Ainsi, entre décembre 2004 et janvier 2006, un chantier petite mécanisation a été réalisé dans l'Orne et trois chantiers de câbles mâts dans le Nord, le Jura et la Meurthe et Moselle, tous suivis par des mesures de productivité et d'impacts.

### La petite mécanisation

Le « cheval de fer » (« Iron horse » dans son pays d'origine) est un engin suédois de petite taille conçu essentiellement pour travailler dans les premières éclaircies résineuses. Il symbolise le concept de la petite mécanisation. S'il n'est pas le seul outil de ce type sur le marché, il est le seul à avoir été



Chargement classique du cheval de fer



Débardage d'une grume de 1 m<sup>3</sup>

FCBA

conçu pour les travaux d'exploitation forestière. Il se déplace à l'aide de chenilles en caoutchouc - de forme dite Traban - très larges, ce qui explique la très faible pression exercée au sol. Il avance à environ 3,5 km/h soit à la vitesse d'un homme ou d'un cheval se déplaçant en forêt. Deux modèles sont disponibles (tableau 1).

Il peut être équipé d'un treuil hydraulique ainsi que d'une remorque ou un trinquedalle pour un poids avoisinant les 400 kg. Le treuil, non télécommandé, a une force de traction d'environ 1 tonne et la remorque une capacité de chargement de 500 kg. Si le cheval de fer a plutôt été conçu pour le débardage des premières éclair-

cies, il est aussi capable de sortir des arbres plus volumineux (1 m<sup>3</sup> environ) sans trop de difficulté. Cet engin est aussi polyvalent et peut servir comme porte-outils (plants, piquets, etc.).

Le chantier a eu lieu en forêt domaniale de Perche Trappes (61) en première éclaircie de sapin épicéa : 45 ans, prélèvement de 40 m<sup>3</sup>/ha, volume de l'arbre moyen = 0,123 m<sup>3</sup> avec toutefois des arbres de bordure de 1 m<sup>3</sup>. Le sol était très riche en limons et donc sensible au tassement, mais sa teneur en eau à l'époque des travaux (mi-décembre), était anormalement faible (16 %) car il n'avait pas plu depuis la fin novembre. Le distributeur du matériel en France, qui organisait la démonstration,

avait opté pour le bûcheronnage manuel suivi du débardage, alors que les Suédois préconisent une organisation simultanée.

Après le chantier, 4 % seulement de la surface présentait des perturbations légères (c'est-à-dire de moins de 5 cm) et aucune perturbation sévère. Les cheminements de l'engin étaient très difficiles à retrouver au premier coup d'œil. La productivité observée du débardage ne dépassait pas 1,2 m<sup>3</sup>/heure productive entraînant un coût de revient de 22 €/m<sup>3</sup>.



Les traces au sol laissées par le passage du cheval de fer

FCBA

	Modèle standard	Modèle Pro
Largueur	108 cm	108 cm
Longueur	280 cm	280 cm
Poids	330 kg	377/385 kg
Puissance moteur	5,5 ch	5,5/9 ch
Capacité de charge	1 - 1,2 m <sup>3</sup>	1 - 1,2 m <sup>3</sup>
Pression au sol en charge de 500 kg	0,150 kg/cm <sup>2</sup> *	0,156 kg/cm <sup>2</sup> *

\* un porteur exerce une pression au sol de 3 à 5 kg/cm<sup>2</sup> par roue soit 20 à 30 fois plus.

Tab. 1 : caractéristiques des deux modèles de cheval de fer (Source : Jonsered France)

Ce seul chantier démontre bien le résultat très positif vis-à-vis du sol mais l'organisation du travail était malheureusement loin d'être efficace. Les comparaisons avec les données suédoises, où bûcheronnage et débardage sont simultanés (Risberg, 1988), donnent pour des peuplements équivalents des

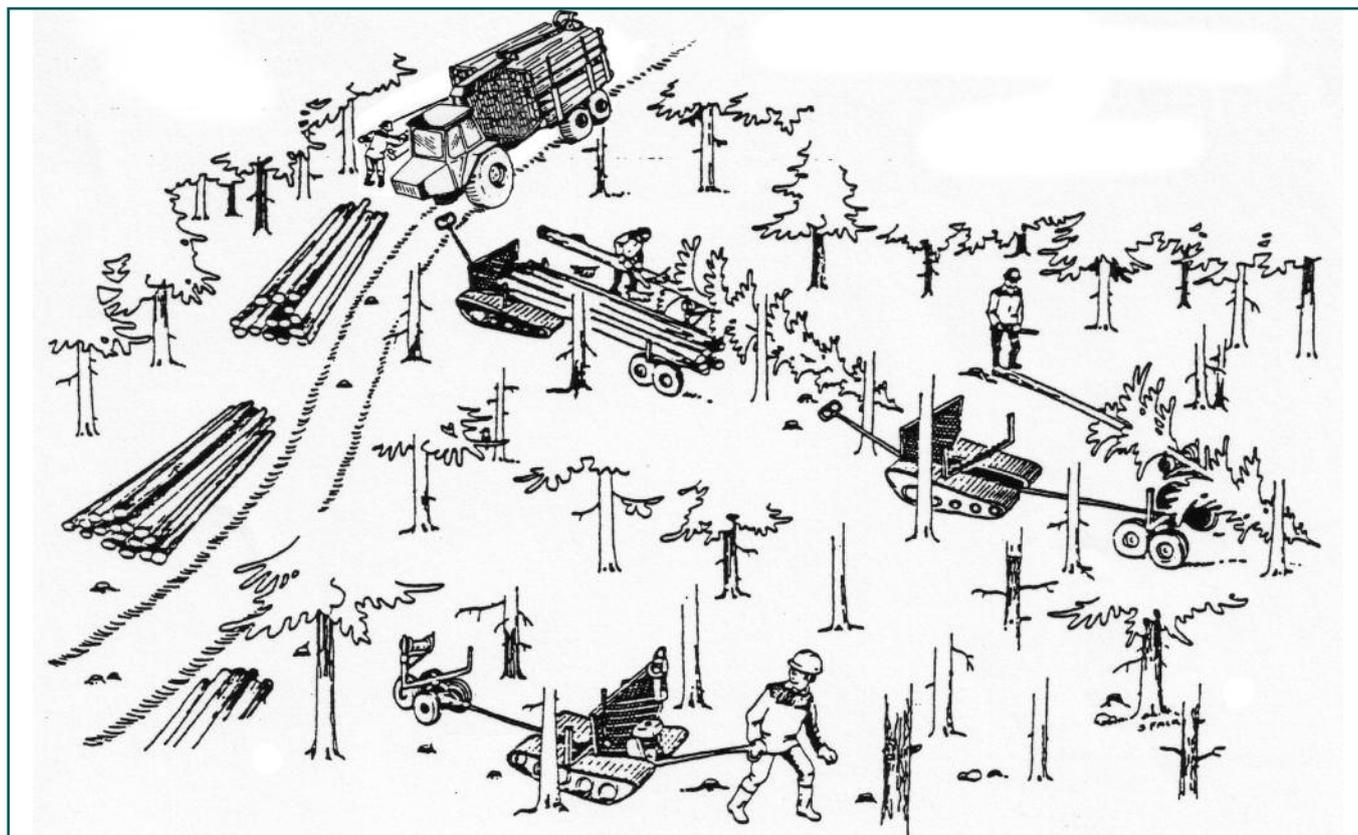


Fig. 1 : un cheval de fer vient ravitailler des cloisonnements d'exploitation installés de façon très lâche (d'après Moberg et al., 1988)

productivités trois fois plus élevées. Le coût de revient tomberait alors à 7 €/m<sup>3</sup>. **La méthode de travail est donc prépondérante.**

Ces premiers résultats montrent que cet outil demande de l'expérience, vu la faible valeur des produits dans ce type de chantier (trituration et petites grumes). La méthode de travail suédoise est d'ailleurs le fruit de plusieurs années de mise au point. **Le cheval de fer n'est donc pas concurrent du système classique** : il doit trouver sa place sur de petits chantiers ne justifiant pas le déplacement d'une abatteuse, sur des chantiers plus vastes mais sensibles, en tant que débusqueur pour rassembler les bois sur des pistes espacées (100 m) (voir figure 1) ou en synergie avec un porteur.

L'organisation des chantiers d'exploitation est « *le problème le plus difficile* » (Venet, 1956) de l'exploitation forestière : dans des situations

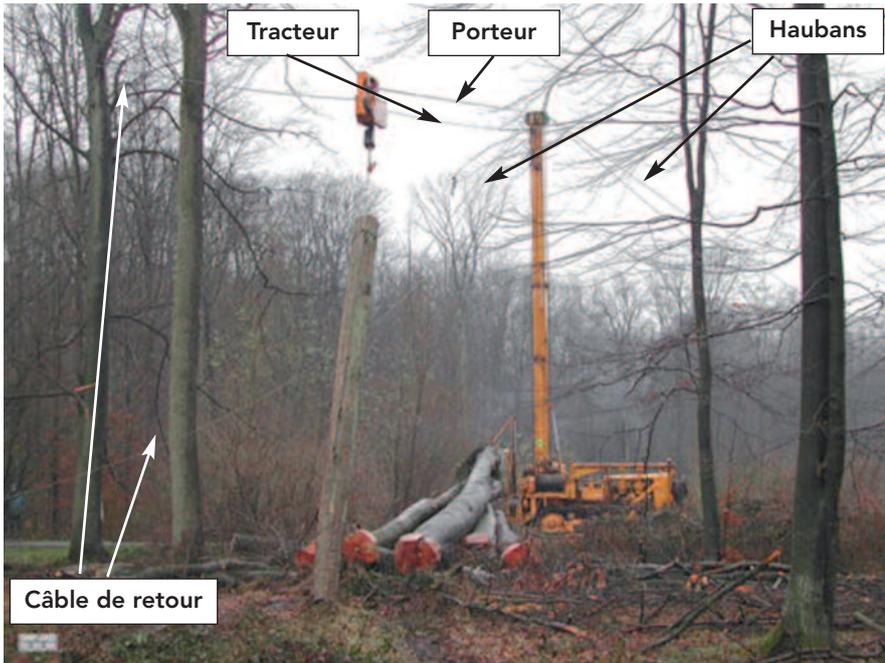
par définition nouvelles, la formation des hommes pour apprendre à travailler en maillon d'une chaîne n'est pas facile à percevoir ni à faire mettre en œuvre. Mais il existe, dans les cas d'utilisation recommandée du cheval de fer, de réelles possibilités d'améliorer facilement la productivité du système et donc son coût pour optimiser ce système qui, par ailleurs, répond remarquablement bien à la problématique du tassement de sol.

### Le débardage par câble en plaine

Comme dans tout système de débardage par câble, un chariot roule sur un *câble porteur* tendu en ligne droite. Le chariot est actionné, dans un sens, par un *câble tracteur*, câble qui va aussi pêcher – accrocher – les bois à droite ou à gauche de la ligne de câble ; dans l'autre sens (retour à vide pour nouvel accrochage), il est actionné par un *câble retour*.

Le terrain étant plat, il est impératif de monter un (ou deux) *pylônes intermédiaires* pour surélever le câble porteur. Un dernier arbre en fin de ligne, *pylône terminal*, servira à tendre (les tensions en jeu sont d'environ 8 à 12 tonnes) le câble porteur et à amarrer la ligne, avec la même fonction que le mât de l'engin (figure 2). L'emplacement des pylônes doit être repéré par le câbliste avant l'opération de bûcheronnage. Les caractéristiques des deux matériels utilisés figurent au tableau 2 page 40. Le premier a été construit et monté par l'entrepreneur sur une base de Bull-Dozer Allis-Chalmer. Le second est d'origine italo-autrichienne.

Pour mettre en œuvre un câble-mât, deux personnes sont nécessaires : un opérateur qui fait fonctionner la machine, décroche les grumes sur la pile de bois et assure les liens avec le transporteur et un accrocheur qui compose



ONF

À Mormal (59), le câble-mât (de l'entreprise Genin) et le dépôt des bois à port de camion

et optimise les charges à débusquer puis à débarquer sous le câble et prépare et élingue les prochaines grumes lorsque le chariot est reparti en charge.

Les chantiers se sont tous déroulés en forêt domaniale même si il n'y avait aucun *a priori* quant au statut de propriété. De nombreux sites avaient été visités tant en forêt pri-

vée qu'en forêt des collectivités et le choix s'est fait sur des opportunités techniques. Soulignons que, dans aucun des trois chantiers, le marquage des bois n'avait été organisé en fonction d'un débarquement par câble (à l'inverse de ce qui doit se pratiquer en montagne). Ceci étant, l'abattage ne doit avoir lieu qu'une fois les lignes tracées par le câbliste, pour

plusieurs raisons : direction de chute, nécessité de conserver certains arbres marqués comme pylônes ou, inversement, d'enlever quelques arbres non marqués des étroites emprises ; pour autant il n'y a aucun intérêt technique à avoir un martelage spécifique. Il faut simplement s'assurer (comme pour tout système d'exploitation) que le volume prélevé à l'hectare est suffisant. Un indicateur existe, l'« indice de prélèvement câble » (IPC), qui doit être d'au moins 0,5 m<sup>3</sup> prélevé par mètre linéaire de ligne.

Les trois chantiers de démonstration (voir tableau 3 page 40) concernaient des sols sensibles au tassement limono-argileux présentant souvent des traces d'hydromorphie et donc réputés difficiles à débarquer par le système traditionnel ; d'ailleurs les impacts des dernières exploitations étaient encore visibles (joncs, ornières, etc.). Pour le chantier de Chau, il fallait en plus traverser un ruisseau faisant l'objet d'une étude LIFE sans que les bois y soient traînés.

Les perturbations induites par le passage des grumes en grandes longueurs n'ont pas créé de tassement. En moyenne, sur les deux

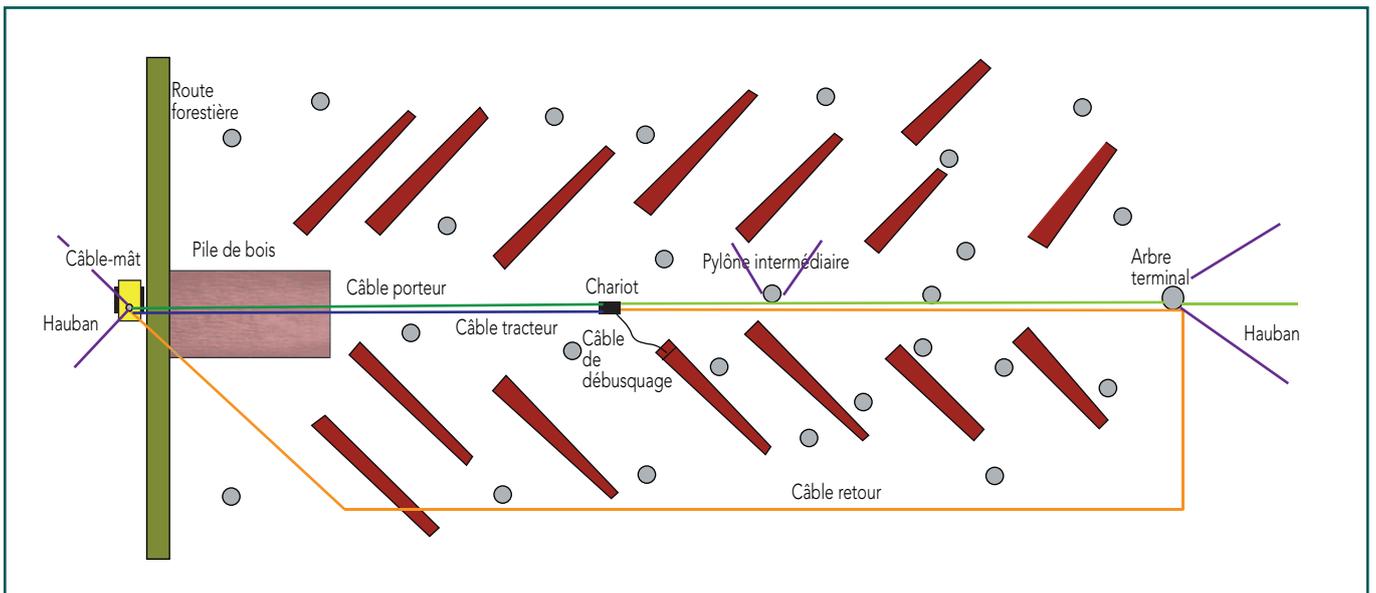


Fig. 2 : schéma de l'installation vue du dessus (Source : FCBA)

	Câble-mât sur base Bull-Dozer	Valentini sur base Mercedes (8x6)
Entreprise	Genin	Rinkenbach
Hauteur du mât	13,5 mètres	17,5 mètres (ajustable)
Puissance moteur	260 CV	410 CV
Masse de l'engin	28 tonnes	32 tonnes
Distance de débardage	600 mètres	800 mètres
Capacité de charge	3,5 tonnes	4 tonnes
Diamètre câble porteur	22 mm	22 mm
Diamètre câble tracteur	11 mm	11 mm
Chariot	HUSK 2000 (Stueffer)	SM 4000 (Bergwald)

Tab. 2 : caractéristiques des câbles mis en œuvre sur les chantiers de démonstration

chantiers où l'ensemble des bois ont été sortis par le câble (Chaux et Hauts-Bois), on n'aura noté que 23 % de sol perturbé, dont les 2/3 légèrement (tableau 4). De plus, la **surface circulée est nulle** en comparaison de celle d'un débardage traditionnel dans les parcelles voisines, qui se situe entre 37 et 59 %. Quant à la productivité, elle a été

mesurée entre 7 et 11 m<sup>3</sup>/heure productive, ou 60 à 110 m<sup>3</sup> débarqués par jour (une fois le câble installé), ce qui correspond au travail d'un débusqueur. La grande différence, particulière au câble, tient au temps de montage des lignes qui réduit d'autant le travail productif. Le temps productif a varié entre 33 et 53 % du temps de présence.

Toutefois on a pu noter des pistes d'amélioration possibles : il s'agit principalement de l'organisation de la reprise des bois par le grumier qui, s'il ne vient pas régulièrement, bloque le travail du câble par saturation de la place de dépôt. Ces interférences ont représenté jusqu'à presque 9 % du temps de présence. Ainsi l'organisation complète du chantier et de sa logistique est particulièrement importante.

Un coût de revient « prévisionnel » a donc été calculé intégrant l'ensemble de ces paramètres. Celui-ci, suivant les chantiers de démonstration, varie entre 15 et 18 €/m<sup>3</sup> ce qui est bien sûr beaucoup plus élevé que les prix de prestation pratiqués au débusqueur. Mais sur les trois chantiers, tous les observateurs ont pu noter que le système d'exploitation par câble téléphérique permettait de débarder environ 100 m<sup>3</sup> de bois par jour (d'hiver) alors qu'on imagine facilement les dégâts occasionnés par une machine de débardage conventionnelle sur ce type d'exploitation.

Type de coupe	FD Mormal (59) Secondaire de régénération	FD Chaux (39) Amélioration	FD des Hauts-Bois (54) Amélioration
Densité avant éclaircie	300 tiges/ha	324 tiges/ha	319 tiges/ha
Densité après éclaircie	180 tiges/ha	250 tiges/ha	290 tiges/ha
Prélèvement	40,3 m <sup>3</sup> /ha	86 m <sup>3</sup> /ha	50,5 m <sup>3</sup> /ha
Nombre de lignes	3	1	6
IPC moyen	0,60 m <sup>3</sup> /ml	0,92 m <sup>3</sup> /ml	0,64 m <sup>3</sup> /ml
Volume unitaire	1,61 m <sup>3</sup>	0,789 m <sup>3</sup>	1,78 m <sup>3</sup>
Produits	- Grumes BO 4 à 16 m - Houppiers en 2 m	- BO et bois de chauffage de 3 à 8 m	- BO et BI façonnés en grandes longueurs
Organisation	- BO sorti par le câble - Bois de chauffage sorti plus tard au tracteur (car autre acheteur, hors démonstration).	- Tous les produits sont sortis par le câble. - Ruisseau à franchir impérativement.	- Tous les produits sont sortis par le câble. - Le BO sorti en premier puis BI.

Tab. 3 : caractéristiques des peuplements et coupes des 3 chantiers débarqués au câble



ONF

Le débusquage d'une grume ne provoque qu'une légère « éraflure »

En résumé, les 3 chantiers de démonstration du câble ont fait ressortir : des performances de productivité – hors temps de préparation – tout à fait honorables, voire mieux en améliorant l'organisation des chantiers ; des impacts au sol et aux cours d'eau se situant à des niveaux nuls ou très faibles.

### Le câble, plus cher que le système classique ?

Demeure la question des coûts de revient : structurellement (2 hommes pour gérer un chantier, temps « improductif » préparation de la ligne, abattage manuel) le coût « instantané » d'une exploitation par câble paraît cher alors que ses bénéfices sont considérables. On peut en donner ici une liste, sans classement hiérarchique :

- nul besoin d'installation de franchissement provisoire de cours d'eau : dans le Morvan, il a été montré que la pose de tuyaux PEHD augmentait le coût d'une coupe de 1 à 2 €/m<sup>3</sup> ;

- éventuelle pollution (fluides hydrauliques) sur site fixe – l'endroit où est le câble-mât — donc facile à prévenir ou à maîtriser ;
- pas d'arbres dépérissant le long des cloisonnements ;
- pas besoin de travaux lourds du sol lors de la régénération ;
- une surface circulée nulle : aucune place « perdue » en cloisonnements ;
- un débardage possible quel que soit l'état hygrométrique du sol (il n'y a donc plus aucun arrêt des flux logistiques vers le transformateur) ;
- pas d'ornières à reprendre ;
- pas de fossés de bordure (drainage des routes forestières) ou internes (drainage de la parcelle) à refaire ;

- un travail très silencieux, le moteur du câble étant fixe ;
- des économies d'hydrocarbures : le câble, qui n'actionne pas le poids à vide d'un tracteur ou d'un porteur, n'utiliserait que 50 % du gazole d'un tracteur par m<sup>3</sup> débardé.

Il est indispensable d'évaluer financièrement ces bénéfices pour justifier de façon objective l'intérêt plus ou moins élevé du système d'exploitation par câble. L'exercice est complexe, l'une des difficultés étant que ces bénéfices sont différés dans le temps pour le propriétaire de la forêt et relèvent d'acteurs différents (De Paul, 2006). En première approche, et de façon incomplète, nous avons fait sur ces parcelles sensibles une comparai-

Origine perturbation	% surface de la coupe affecté par des		Total
	perturbations légères	perturbations sévères	
Ligne de câble	1,4	3,1	4,5
Halage	13,5	5,0	18,5
Total	14,9	8,1	23,0

Tab. 4 : perturbations constatées sur les chantiers de Chaux et des Hauts-Bois

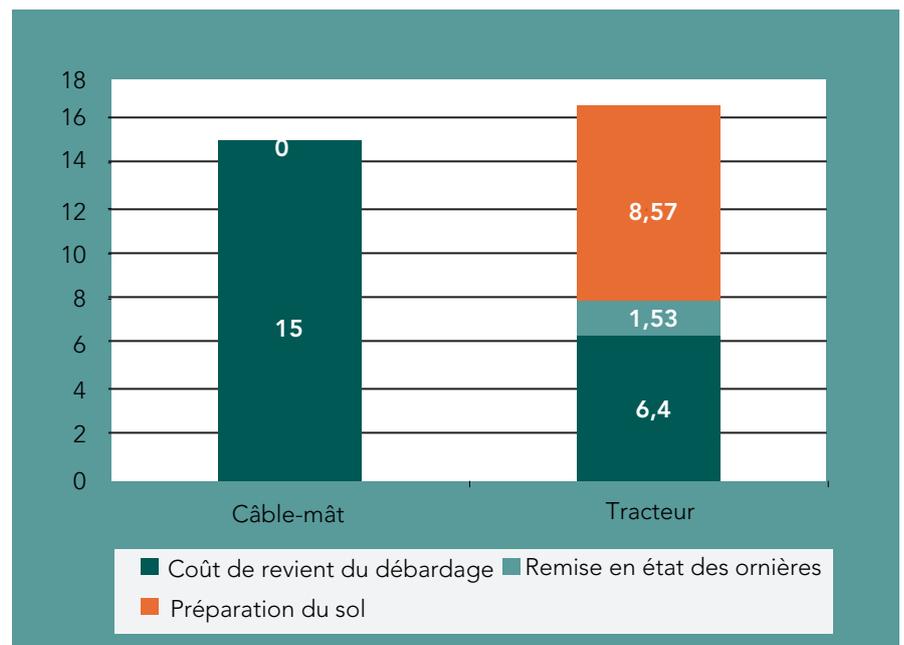


Fig. 3 : comparaison des coûts de revient de l'ensemble des opérations liées à la récolte suivant le système

son entre l'utilisation du câble et celle du tracteur en incluant pour ce dernier des coûts annexes que n'entraîne pas le câble (en cas de tassement prononcé).

Sur la figure 3, les coûts représentés en vert sont instantanés alors que ceux en rouge représentent des coûts différés dans le temps et supportés par le propriétaire suite aux dégâts causés au sol et aux peuplements. Ces chiffres sont sans doute discutables, mais ils montrent que le « vrai » coût du câble reste à être mieux estimé, de la même manière qu'en montagne il faut tenir compte du coût de la desserte forestière pour comparer les différents systèmes de récolte.

### En conclusion

Ces chantiers de démonstration ont eu le mérite de confirmer les avantages environnementaux des techniques alternatives, petite mécanisation ou câble, et de replacer la question des coûts de revient dans un cadre plus large que le seul coût instantané du débardage. Ils ont aussi permis de situer le câble non pas comme un concurrent mais comme un complément des systèmes de récolte actuels pour toutes les forêts sur sols sensibles. Des travaux complémentaires ont été lancés sur les aspects économiques, point capital pour une meilleure compréhension des enjeux de la mobilisation, pour les différents acteurs. (voir article Bruciamacchie *et al.* dans ce dossier)

Ces chantiers ont fait se déplacer quelque 530 visiteurs (dont une centaine d'ETF) lors de journées ouvertes au public qui ont été relayées par 3 émissions de télévision régionales, une émission radio et une quinzaine d'articles de presse (dont 6 dans la presse professionnelle et 1 sur le site du ministère de l'Environnement et du Développement Durable).

Le développement de ces techniques devrait être pris en compte par le propriétaire. Cela demande un travail en communication avec l'ensemble des acteurs (centres de formation, gestionnaires, ETF, exploitants, etc.) et notamment pour identifier les situations dans lesquelles elles sont pertinentes à mener.

**Didier PISCHEDDA**

ONF — DTCB  
département commercial-bois  
didier.pischedda@onf.fr

**Michel BARTOLI**

ONF (retraité)

**Jean-Luc CHAGNON**

technicien exploitation forestière  
FCBA  
Jean-luc.chagnon@fcba.fr

### Bibliographie

CACOT E., PISCHEDDA D., 2007. Reducing impacts of logging operations: looking for practical solution. 3rd Forest Engineering Conference FERIC, Mont Tremblant, Québec, Canada, 1-4 octobre 2007.

DE PAUL M.A., 2006. Le débardage par téléphérage est-il vraiment trop coûteux. Forêt Wallonne, n° 84, pp. 16-29

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

LOYEN S., 2005. Régénération naturelle du hêtre en forêt de Soignes : impact de la compaction des sols. Rendez-vous techniques, n° 8, pp. 44-47

MATTHIES D., ZIESAK M., KREMER J., 2006. Le logiciel Profor® : un outil de prévention pour juger de la praticabilité des sols lors de

l'exploitation forestière. Rendez-vous techniques, n° 6, pp. 3-8

MOBERG L., NORDFJELL T., GABRIELSSON L., 1988. A model for analysing self-employed woodland owners using small-scale equipment in thinnings. Small Scale Forestry, vol. 2, pp.7-14

PISCHEDDA D., 2003. Conférence internationale sur l'ingénierie forestière. CTBA Info, n° 103 et Journal de la Mécanisation Forestière, n° 38

ONF, 2005. Dossier « Tassements du sol dus à l'exploitation forestière ». Rendez-vous techniques n° 8, pp. 23-51

RISBERG S., 1988. Piraya Mini-skidder. Small Scale Forestry, vol. 2, pp. 1-6

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

ROTARU C., 1985a. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. Revue Forestière Française, vol. 37, n° 5, pp. 359-370

ROTARU C., 1985b. Problèmes des interactions exploitation forestière et sylviculture -environnement en France. IXème Congrès Forestier Mondial, Mexico.

ROTARU C., 1989. Récolte de bois et protection du sol forestier. Séminaire du Comité Mixte pour le travail en forêt FAO/CEE/OIT sur les conséquences de la mécanisation des travaux forestiers sur le sol. Louvain la neuve, Belgique.

VENET J., 1956. La mécanisation des exploitations forestières : difficultés, solutions. Revue Forestière Française, vol. 8, n° 6 ; pp. 388-399

# Analyse économique des coûts d'exploitation d'un chantier

L'aspect économique est déterminant dans le choix d'un système d'exploitation : le coût du câble, par exemple, est souvent jugé prohibitif par rapport au débardage classique. Or ce jugement ignore les pertes liées à l'(in)accessibilité des chantiers et à la dégradation des sols et peuplements. La méthode d'analyse proposée ici intègre tous les coûts et montre, malgré les difficultés d'estimation, que le poids des coûts « invisibles » peut démentir le calcul immédiat.

L'objectif de cet article est de donner aux « experts » les outils économiques d'évaluation de la rentabilité de différents modes d'exploitation des bois pour un chantier donné. La démarche pourra être utilisée pour tout type de sol (en particulier pour les sols sensibles) ou lors de la création d'une desserte adaptée à un système d'exploitation (par exemple en montagne entre une desserte à tracteur et une à câble). Elle permet de fournir des éléments de réponse à un propriétaire forestier ou à son gestionnaire qui doit choisir entre deux systèmes d'exploitation. De manière plus générale, elle permet d'identifier les principaux paramètres ayant une influence sur la rentabilité d'une exploitation.

Une analyse économique globale nécessiterait de prendre en compte les aspects environnementaux et sociaux (nuisance sonore, quantité de main-d'œuvre utilisée...). La méthode proposée ne prend pas en compte le point de vue de la société, mais se concentre sur l'ensemble des gains et coûts directement liés au propriétaire. Dans le cas d'un exploitant, une démarche similaire peut être mise en œuvre (cf. variante du bilan économique).

## Liste des coûts

Les différentes composantes du coût global d'exploitation sont présentées dans le tableau 1. Elles peuvent intervenir immédiatement, ou dans l'avenir (coûts différés). L'analyse économique se doit de prendre en compte l'ensemble des coûts en intégrant leur date d'occurrence par le biais de l'actualisation (voir encadré 2). Ces coûts varient selon plusieurs facteurs (tels que la praticabilité, le peuplement, les conditions d'exploitation...). Selon le contexte, certains facteurs de coûts sont sans objet.

Nota : le gestionnaire forestier qui s'interroge sur le système d'exploitation de ses bois peut être amené à le faire dans deux cas qui conduisent à des critères d'évaluation différents :

si l'exploitation se fait sans rénovation de la desserte existante, le propriétaire ou son gestionnaire peuvent choisir le mode de vidange en fonction des dessertes existantes ; le coût de commercialisation (CC) n'inclura aucune dépense en investissement ; si l'exploitation nécessite une rénovation de la desserte existante (souvent en forêt de montagne), il devient nécessaire d'éva-

luer la rentabilité d'un choix d'investissement selon le système d'exploitation et de fournir un échéancier des dépenses d'investissement.

Le présent article se concentre sur le premier cas.

## Bilan économique d'un système d'exploitation

Le propriétaire évalue le gain qu'il peut retirer de la vente de ses bois par la différence entre les recettes de la vente des bois et le coût global d'exploitation. Celui-ci comprend à la fois les coûts directs de mise en œuvre de l'exploitation et les coûts indirects : coûts liés à la desserte (entretien mais aussi parfois investissement), conséquences à court et à long terme de l'exploitation sur le capital producteur comme la dégradation de la productivité des sols, les dégâts aux arbres restants, etc. (Bartoli et al., 2006).<sup>1</sup>

L'analyse est réalisée en considérant que les bois sont vendus bord de route ce qui permet de s'affranchir des particularités (organisation, ancienneté du matériel...) liées à chaque exploitant. Ainsi posé, le bilan peut s'exprimer selon la formule générale explicitée en encadré 1.

<sup>1</sup> Les coûts directs incluent la marge de l'exploitant, correspondant ainsi au prix de prestation facturé. Dans le cas peu fréquent où le propriétaire réalise la prestation en interne (il possède le matériel), les coûts n'incluent pas cette marge.

Coûts pour un chantier donné selon mode d'exploitation		Les coûts peuvent varier selon :
Immédiats	Différés	
<b>Coûts techniques</b>		
Vidange	Débusquage et débardage	- type d'exploitation
Chantier	Installation du matériel, remise en état de la parcelle	- type de sol - situation géographique du peuplement (plaine/montagne) - praticabilité du peuplement (pente du terrain, portance du sol,...)
<b>Pertes de production</b>		
Dégâts au sol	Réduction de croissance des peuplements (sur sols limons acides)	- constitution du peuplement - volume de bois à exploiter
Dégâts au peuplement	Réduction de la valeur du peuplement (pertes des arbres totalement ou partiellement)	
Modification sylviculture	Perte de revenus futurs si exploitation prématurée sans impact réel sur la croissance des arbres restants	
<b>Accès au chantier</b>		
Exploitation et approvisionnement irrégulier	Immobilisation du matériel, gestion main-d'œuvre, stockage des bois ... (perte de production en scierie, voire même de marché)	
<b>Coûts d'investissement pour pouvoir exploiter une parcelle</b>		
<b>Réseau de vidange</b>	Création des pistes, routes forestières, cloisonnement	Entretien des pistes et routes

Tab. 1 : liste des coûts pour un chantier donné, permettant au propriétaire de la parcelle de choisir son mode d'exploitation

Dans le cas où le propriétaire des bois n'exploite pas lui-même, deux scénarios sont possibles :

- il engage les services d'un exploitant et les coûts exploitant ( $C_{i,d} + C_f n + C_v V$ ) correspondent aux services facturés ;
- il vend son bois sur pied (à un exploitant) ; la formule devient alors :

$$\text{Bilan} = \sum V_c P U_{s_c} - CC - CP - CS$$

où  $P U_{s_c}$  est le prix unitaire sur pied. Sauf disposition stipulée par contrat, le mode d'exploitation sera choisi par l'exploitant. Même si le propriétaire ne pourra plus identifier les coûts liés au manque de praticabilité, il les supportera pleinement.

**Variante** : du point de vue de l'exploitant, le bilan devient :

$$\text{Bilan} = \sum V_c (P U_{u_c} - P U_{s_c}) - (C_{i,d} + C_f n + C_v V) - RE - T$$

où  $P U_{u_c}$  est le prix unitaire usine et  $T$  l'ensemble des coûts de transport.

Les coûts indirects engendrés par l'exploitation ( $CC, CP, CS$ ) restent supportés par le propriétaire. Ce dernier devrait être particulièrement vigilant sur la méthode d'exploitation retenue car l'exploitant n'intègre pas ces coûts indirects dans son choix.

## Détails des coûts

Nota : les symboles non explicités dans les paragraphes qui suivent sont ceux de la formule générale de bilan exposée en encadré 1.

### Coûts exploitant

Ils sont décomposés en coûts fixes et coûts variables.

Les **coûts fixes** incluent l'amortissement du matériel, son remisage ainsi que les frais de gestion ( $C_f n$ ) mais aussi les coûts liés au chantier (installation/désinstallation) calculés sur la base des frais de déplace-

ment et des salaires ( $C_{i,d}$ ). Les coûts d'amortissement, d'entretien et les frais de gestion associés au matériel sont fonction du nombre  $n$  de jours du chantier. Lorsque le chantier est impraticable, les jours où le matériel est immobilisé sont comptés dans le nombre total de jours du chantier. Cela permet d'intégrer les coûts liés à la praticabilité du terrain. Le nombre de jours  $n$  pris en compte dans le calcul des différents coûts liés au matériel est donc la somme de trois termes : le nombre de jours d'installation et désinstallation du matériel, le nombre de jours de vidange, le nombre de jours d'intempérie qui correspond au nombre de jours d'immobilisation du matériel.

Les **coûts variables** sont constitués par les carburants et lubrifiants, les consommables et les salaires. Ils incluent les frais d'entretien et de réparation. Ces frais dépendant du nombre d'heures de travail peuvent également être exprimés par  $m^3$  exploité.

### 1 — Expression du bilan économique de l'exploitation

De manière générale la formule suivante peut être utilisée. Les différents paramètres sont détaillés dans le paragraphe suivant.

$$\text{Bilan} = \sum V_c \text{PUB}_c - (C_{i,d} + C_f n + C_v V) - \text{RE} - \text{CC} - \text{CP} - \text{CS}$$

Avec

Recette de la vente des bois

$V_c$  : volume de la catégorie  $c$  (essence, qualité ou dimension)  
 $\text{PUB}_c$  : prix unitaire bord de route. Ils peuvent être influencés par la régularité de l'approvisionnement

Coûts directs supportés par la personne qui fait l'exploitation

$C_{i,d}$  : coût fixe d'installation et désinstallation du chantier (comprend aussi les frais de déplacement)  
 $C_f$  : coût fixe journalier supporté par l'exploitant (amortissement matériel, assurance, remisage, salaire). Ce coût dépend de la praticabilité (nombre de jours dans l'année où le matériel peut être utilisé). Ce coût est généralement fourni en €/jour.  
 $n$  : nombre total de jours de chantier (= nombre de jours de travail effectif plus nombre de jours d'intempérie)  
 $C_v$  : coût variable supporté par l'exploitant (en général proportionnel au volume coupé : carburant, lubrifiant, salaire pour l'exploitation voire le cubage.)  
 $V$  : volume total récolté  
 $\text{RE}$  : coût de la remise en état de la parcelle

Coûts indirects totalement supportés par le propriétaire

$\text{CC}$  : coût de commercialisation supporté par le propriétaire. Exemple, obligation de faire des cloisonnements, rénovation et entretien voirie, cubage contradictoire des bois, mais également coûts liés à l'approvisionnement irrégulier des bois.  
 $\text{CP}$  : coût peuplement (blessure, perte de valeur d'avenir, contrainte de sylviculture...)  
 $\text{CS}$  : coût au sol

Le coût total pour l'exploitant vaut donc :

$$C_{\text{exploitant}} = (C_f n + C_{i,d}) + C_v V$$

et peut être exprimé par  $\text{m}^3$  en divisant le tout par le volume  $V$ .

#### Coûts de commercialisation

Les coûts de commercialisation considérés ici contiennent deux facteurs, les coûts liés à la rénovation et à l'entretien de la desserte et les coûts liés à l'irrégularité des flux des bois.

Si la desserte existante convient, les coûts d'investissement seront nuls. Le coût de mise en place des cloisonnements doit être intégré. Le système d'exploitation influe

sur la densité de la desserte et du cloisonnement.

L'irrégularité des flux des bois due à l'impraticabilité du chantier et à l'insuffisance des aires de stockage peut engendrer des coûts divers. Il peut s'agir des coûts liés à la création et à l'amélioration des aires de stockage, mais également à une moins value sur les prix unitaires ou bien à des pénalités de retard (qui intègrent le manque à gagner des industriels).

Les coûts de commercialisation comprennent également les coûts d'édition du cahier affiche ainsi que le cubage contradictoire des bois. Ces coûts seront supposés indépendants du système d'ex-

ploitation. Ils ne sont donc pas intégrés à cette analyse puisqu'ils vont disparaître lorsqu'on compare deux systèmes d'exploitation.

#### Coûts de remise en état

Le coût de remise en état de la parcelle ( $\text{RE}$ ) dépend avant tout de la qualité des travaux effectués. La remise en état concerne la desserte (incluant les cloisonnements) ainsi que les dégâts, à l'intérieur de la parcelle, qu'il est possible de réparer de manière significative. Ce coût sera considéré comme indépendant de la quantité exploitée, même si cela n'est pas entièrement vrai.

#### Dégâts au sol

Les dégâts au sol sont des dégâts à plus long terme, qu'il est très difficile de réparer. À titre d'exemple le tassement des sols sur limons acides peut être considéré comme irréversible (son éventuelle remise en état ne peut s'imaginer qu'à l'échelle de plusieurs siècles). Ce tassement entraîne une certaine diminution de la régénération et de la croissance des arbres adultes. Il sera pris en compte par le biais d'une réduction de la surface productrice et donc du revenu. La réduction de la surface productrice est fonction de la surface de sol compacté et du degré du compactage. Par simplification, l'importance des dégâts pourra être exprimée par le pourcentage de la surface ayant dépassé une certaine intensité de compactage.

Les coûts induits correspondent au capital générant la perte de revenu. Si le peuplement est en phase d'amélioration, il conviendra de distinguer la phase de transition du régime de croisière.

Le coût de ces dégâts peut être estimé par :

$$\text{CS} = p_{\text{sol}} V (m)$$

où  $p_{\text{sol}}$  la proportion de surface de la forêt tassée lors de l'exploitation et  $V (m)$  la valeur en bloc (ou valeur d'avenir) de la forêt.

L'estimation de cette valeur en bloc se fait différemment selon que la forêt produit un revenu annuel régulier ou que, au contraire, les recettes et dépenses sont irrégulières :

Dans le premier cas  $V(m) = R/r$  où  $R$  est le revenu net annuel et  $r$  le taux d'actualisation (cf. encadré 2) ;

$$\text{sinon, } V(m) = \sum_{i=m}^{a+m-1} R(i) \frac{(1+r)^{a+m-i}}{(1+r)^a - 1}$$

où  $a$  est l'âge d'exploitabilité du peuplement,  $m$  l'âge actuel du peuplement, et  $R(i)$  le revenu net annuel de l'année  $i$  (ce revenu net peut donc être négatif certaines années, et positif d'autres années).

## Dégâts au peuplement

Dans le cas général, les dégâts au peuplement ne concernent qu'une faible part des arbres. Les raisonnements qui suivent reposent donc sur des méthodes par arbre. Ces dégâts peuvent être visibles directement, comme un arbre partiellement cassé ou frotté, ou ne seront visibles qu'au moment de la récolte ultérieure, comme dans le cas du cœur rouge du hêtre.

■ En cas de **perte immédiate**, l'estimation correspond à la différence entre la valeur d'avenir et celle de sauvegarde, pour tous les arbres touchés. La méthode de calcul de la valeur d'avenir est détaillée dans l'encadré 3. La valeur de sauvegarde est la valeur à laquelle on peut vendre, aujourd'hui, les arbres touchés par les dégâts. Le coût des dégâts est alors, lorsque les dégâts conduisent à un taux de sauvegarde<sup>2</sup> de  $\beta$  lors de l'exploitation des arbres touchés :

$$CP_{\text{immédiats}} = \left[ \sum \frac{G_i}{r} - \beta \times PUs \times V_i \right]$$

■ En cas d'**exploitation différée**, elle correspond à la réduction de valeur d'avenir suite à une perte de qualité et/ou d'accroissement. Dans ce cas, la réduction de valeur est incertaine. On peut considérer

## 2 – L'actualisation

Le **principe de l'actualisation** permet de comparer des recettes ou des dépenses intervenant à des dates différentes : il s'agit de ramener une valeur future à une valeur actuelle. Ce principe est basé sur deux éléments essentiels : l'appréciation des flux monétaires (quelles sont mes dépenses et recettes actuelles et futures ?) et le taux d'actualisation (taux de substitution entre le futur et le présent). Le **taux d'actualisation**  $r$  (que l'on pourrait également appeler « prix du temps ») intègre deux notions : la possibilité de placement financier ( $f$  est le taux d'intérêt du marché) et l'évolution des prix à la consommation ( $i$  est le taux d'inflation). Théoriquement,  $r$  est défini de la façon suivante :

$$1 + r = \frac{1 + f}{1 + i}$$

À titre d'exemple, on peut dire que 1 € aujourd'hui équivaut à  $(1+r)^t$  € dans  $t$  années, et inversement, 1 € disponible à la date  $t$  est équivalent aujourd'hui à :

$$\frac{1}{(1+r)^t} \text{ €}$$

## 3 — Calcul de la valeur d'avenir

La valeur d'avenir, ou valeur potentielle d'un arbre  $i$  est déduite du gain annuel de valeur de consommation actualisé. La valeur de consommation d'un arbre  $i$  correspond à la recette obtenue par sa vente immédiate. Le gain annuel  $G_i$  de valeur de consommation peut alors être estimé par (de Turckheim et Bruciamacchie, 2005 ; Peyron, 1999) :

$$G_i = (PUs \times V) \times \frac{dD_i}{dt} \times \frac{1}{5} \left[ \ln \frac{PUs_{D+5}}{PUs_D} + \ln \frac{V_{D+5}}{V_D} \right]$$

où  $(PUs \times V_i)$  est la valeur de consommation (produit entre le prix de vente du bois sur pied,  $PUs$ , et le volume de l'arbre,  $V_i$ ) ;

$\frac{dD_i}{dt}$  est l'accroissement annuel en diamètre,  $\frac{PUs_{D+5}}{PUs_D}$  est l'augmentation relative du prix de vente lorsque l'on passe de la classe de diamètre  $D$  à la classe de diamètre  $D + 5$ ,  $\frac{V_{D+5}}{V_D}$  est l'augmentation relative du volume sur pied lorsque

l'on passe de la classe de diamètre  $D$  à la classe de diamètre  $D + 5$ .

La valeur d'avenir de l'arbre  $i$  est alors estimée par  $\frac{G_i}{r}$ .

## 4 — Perte de la valeur du peuplement lié aux choix sylvicoles

Lorsque l'on coupe prématurément un arbre, sa valeur potentielle (valeur qu'il aurait si on le laissait pousser), est plus grande que sa valeur de consommation (recettes que l'on retire de sa vente immédiate). La coupe prématurée d'un arbre conduit à une perte de valeur du peuplement correspondant à la différence entre la valeur potentielle et la valeur de consommation des arbres exploités. Lorsque la coupe effectuée est une coupe d'éclaircie dans un peuplement relativement dense, elle permet de réduire la concurrence entre arbres pour les arbres et se traduit par une augmentation de la vitesse de croissance des arbres restant sur pied. La perte en valeur des arbres exploités est alors compensée par un gain en valeur des arbres restants. Par contre, lorsque la coupe est effectuée dans un peuplement peu dense, elle aura finalement peu, voire pas, d'effet sur la vitesse de croissance des arbres restants.

<sup>2</sup> Le taux de sauvegarde correspond au rapport entre la valeur de la consommation après et avant dégâts.



FCBA

Débardage tracteur

prix de vente moyen est à 60 €/m<sup>3</sup>. La recette de vente de la coupe (notée  $\sum V_c PUB_c$ ) s'établit donc à 18 000 €. Le propriétaire a le choix entre un débardage par câble ou par skidder, pour lesquels on connaît les frais fixes et variables (tableau 2).

Les frais fixes sont plus élevés pour le câble que pour le skidder, parce que nous avons retenu un coût d'achat du matériel plus élevé pour le câble (320 000 €) que pour le skidder (200 000 €) (De Paul, Bailly, 2006). Les frais variables correspondent au coût des fluides et de la main-d'œuvre nécessaires à l'exploitation. Enfin, pour installer ou utiliser le câble, il faut avoir 2 salariés, contre un seul pour un skidder.

Compte tenu du rendement des 2 types de machine, il faut 4,5 jours de travail pour débarder 300 m<sup>3</sup> avec le skidder et seulement 3 jours de travail pour le câble. Cependant, le skidder ne pourra peut-être pas travailler tous les jours à cause des intempéries. Il est bien évidemment difficile de dire *a priori* quand

que l'arbre sera altéré avec une probabilité  $q$ , son prix de vente sera alors  $PU_{i,altéré}$  au lieu de  $PU_i$ , et le gain annuel de valeur de consommation (cf. encadré 3) vaudra alors  $G_{i,altéré}$ . Le coût des dégâts vaut alors :

$$CP_{différés} = \sum \frac{q(G_i - G_{i,altéré})}{r}$$

Une autre perte de valeur du peuplement est liée au choix sylvicole des forestiers. Selon le mode d'exploitation, le forestier peut être contraint de couper une quantité de bois suffisante pour justifier l'installation du matériel. Évidemment si les consignes de martelage sont identiques pour les différents modes de débardage, cette composante est sans sujet et donc le coût correspondant sera nul.

Le système d'exploitation peut ainsi engendrer une modification de sylviculture nécessitant une récolte prématurée des (ou de certains) arbres. Exploiter prématurément un arbre implique une perte de son capital qui correspond à la différence entre la valeur d'avenir et la valeur de consommation des arbres exploités (voir encadré 4).

### Exemple chiffré

On s'intéresse à l'exploitation d'un chantier hypothétique d'une surface de 6 hectares, pour un volume exploité de 300 m<sup>3</sup>. Il s'agit de hêtre de qualité moyenne, avec un volume unitaire de l'ordre de 1,5 m<sup>3</sup>. Nous supposons donc que le



MEDD

Débardage câble

	Skidder	Câble
Frais fixes, €/jour (noté Cf)	294	462
Frais variables, €/m <sup>3</sup> (noté Cv)	3,39	4,54
Nombre de salariés	1	2
Salaires, €/jour	200	400

Tab. 2 : coûts d'utilisation des matériels d'exploitation (débardage)

	Skidder	Câble
Jours de travail	4,5	3
Jours d'installation et désinstallation		2
Jours d'intempéries (15 % en plus)	0,8	
Nombre total de jours de chantier (n)	5,3	5

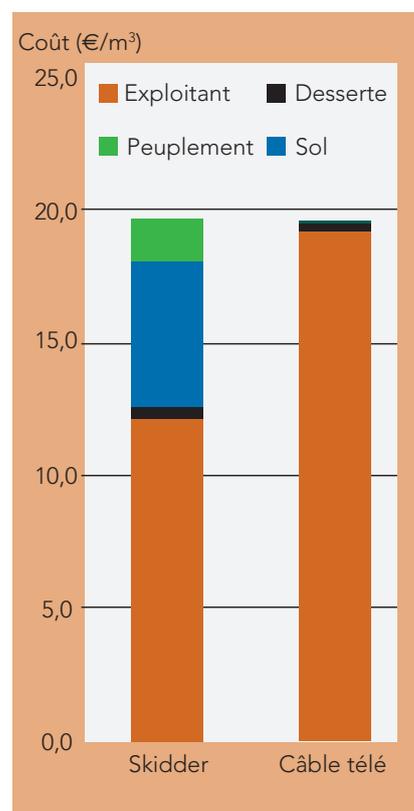
Tab. 3 : calcul du nombre total de jours de chantier (noté n)

En €	Skidder	Câble
Frais fixes (noté Cf. n)	1 554	2 308
Intempéries (salaire/jour x nb jours)	159	
Frais variables (noté Cv. V)	1 018	1 361
Installation/désinstallation (salaire/jour x nb jours), (noté C <sub>i,d</sub> )		800
Frais de déplacement	100	850
Remise en état (noté RE), estimé à 2 % de la valeur de la recette	360	
Coûts de commercialisation (noté CC)		
Cubage	450	450
Entretien de la desserte	120	60
<b>Sous-total des coûts directs</b>	<b>3 761</b>	<b>5 829</b>
Coût des dégâts au sol, 5 % du sol touché (noté CS)	1 650	
Coût des dégâts au peuplement (CP) :		
Pertes immédiates	317	
Pertes différées	148	
Modification de la sylviculture		24
<b>Sous-total des coûts indirects</b>	<b>2 115</b>	<b>24</b>
<b>Coût total</b>	<b>5 876</b>	<b>5 853</b>
<b>Bilan</b>	<b>12 124</b>	<b>12 147</b>

Tab. 4 (et figure) : composantes du bilan

interviendront les intempéries, ce qui n'empêche pas d'en intégrer le coût. Ainsi, si pour environ 15 % du temps annuel les intempéries empêchent d'effectuer les travaux d'exploitation, on peut alors supposer qu'en moyenne chaque chantier dure 15 % de temps en plus que prévu, à cause des intempéries. Par ailleurs, dans le cas du câble, il convient d'intégrer le temps consacré à l'installation et la désinstallation du câble (tableau 3).

Notons que l'avantage du câble est qu'il peut travailler même en cas d'intempéries. Il n'y aura donc pas, par définition, de jours perdus liés à cette cause. L'estimation du nombre total de jours de chantier permet de



calculer les frais fixes totaux, qui incluent les frais fixes associés aux jours de travail et ceux résultant des jours d'installation des machines ou d'immobilisation pour cause d'intempéries. Le coût total intègre les salaires correspondant aux jours d'installation des machines et aux jours d'intempéries. C'est le simple produit des jours par les salaires.

Le coût de commercialisation est composé d'un coût de cubage ainsi que d'un coût d'entretien de la desserte. Sachant que pour le tracteur il faut au moins deux fois plus de route (en ml/ha) que pour le câble, le coût d'entretien de la desserte sera doublé.

Le coût des dégâts au sol est calculé par le produit entre le taux de dégâts (5 %) et la valeur d'avenir de la forêt. On a supposé ici que la forêt a une valeur de 5 500 €/ha<sup>3</sup>. Les pertes immédiates correspondent ici à une hypothèse où une quinzaine d'arbres (chêne et hêtre de qualité C) sont touchés, et où le taux de sauvegarde de ces arbres est en moyenne de 60 %. Les pertes différées correspondent à une hypothèse où une quinzaine d'arbres sont touchés. Enfin, on inclut également un coût de modification de la sylviculture dans le cas du câble qui correspond ici à un cas où le choix du câble conduirait le propriétaire à prélever un peu plus qu'avec le skidder, et plus précisément à exploiter certains arbres prématurément. Pour cet exemple chiffré, le choix du câble conduirait à exploiter 6 arbres qui ne sont pas encore arrivés à leur âge d'exploitabilité. Le calcul de toutes les composantes du coût permet ensuite d'estimer le bilan de cette opération, pour chacune des deux solutions techniques envisagées.

## Conclusion

Cet article propose une méthode pour intégrer tous les coûts connus ou estimés liés à la mise en œuvre d'un chantier de débarquement afin de choisir le mode d'exploitation qui paraîtra le plus rentable.

Lors de la réalisation d'un chantier, certains coûts liés directement à l'exploitation interviennent de manière immédiate et sont souvent bien connus par le gestionnaire (propriétaire ou exploitant). D'autres coûts sont une conséquence directe ou différée de l'exploitation et varient fortement selon le mode d'exploitation choisi. C'est en particulier le cas des dégâts au sol ou au peuplement. Ces coûts sont plus difficiles à chiffrer et à intégrer dans le calcul de rentabilité. L'exemple chiffré proposé montre qu'en intégrant ces coûts indirects, l'écart entre deux modes d'exploitation peut se réduire voire s'inverser selon les coûts d'investissement, les niveaux de dégâts... Qu'ils soient réels ou intégrés sous forme de risque, ils doivent être pris en compte par le propriétaire.

Évidemment, il reste au gestionnaire à les évaluer de façon pertinente et à identifier la meilleure façon de les prendre en compte dans la contrainte technique et économique du moment.

**Max BRUCIAMACCHIE**  
**Sandrine COSTA**  
**Lisette IBANEZ**

Laboratoire d'Économie Forestière  
UMR ENGREF/INRA  
bruciamacchie@engref.fr  
costa@nancy-engref.inra.fr  
ibanez@nancy-engref.inra.fr

## Bibliographie

BARTOLI M., PISCHEDDA D., CHAGNON J.L., 2006. Pour une exploitation respectueuse des sols. Chantiers de démonstration. Rapport final. DGFAR, ONF, CTBA. 75 p., ann.

DE PAUL M.A., BAILLY, M., 2006. Le débarquement par téléphérage est-il vraiment trop coûteux ? Forêt Wallonne, n° 84, pp.16-29

DE TURKHEIM B., BRUCIAMACCHIE M., 2005. La futaie irrégulière : théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Aix-en-Provence : Edisud. 285 p.

PEYRON J.L., 1999. Cours d'économie forestière. Nancy : ENGREF. <en ligne : <http://www.engref.fr/coursenligne/Economie/Economie.html>>

RANGER J., LAMANDÉ M., LEFEVRE Y., 2005. Perturbations au sol liées à l'exploitation forestière et conséquences pour l'écosystème. Rendez-vous techniques, n° 8, pp. 27-35

<sup>3</sup> À titre de comparaison, la valeur moyenne des forêts vendues en 2006 était de 4 920 €/ha (Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations, Marché des Forêts en 2006).

# Évolution des systèmes de mobilisation et protection du sol : quelles sont les perspectives ?

*L'exploitation respectueuse des sols, c'est une question de système d'exploitation, d'organisation des chantiers, et de choix de machines adaptées. Encore faut-il que ce choix soit possible. Connaître les évolutions de la mécanisation, les contraintes et stratégies des entreprises, et faire évoluer nos pratiques pour peser réellement sur les choix techniques et orienter les investissements, tel est maintenant le défi à relever.*

**A** l'heure où les concepts de gestion durable et de protection de l'environnement sont à la une et que dans le même temps les forestiers publics s'engagent de plus en plus dans le développement des bois façonnés et de la contractualisation, il est essentiel de mieux connaître les possibilités réelles des différents systèmes de récolte. Cet article tente de présenter une vision d'ensemble du secteur de la mobilisation et des acteurs concernés pour que nous puissions mieux cerner les évolutions à venir et être à la hauteur de nos engagements.

## Les évolutions de la mécanisation

Depuis la fin des années 50, la récolte du bois fait l'objet d'évolutions de plus en plus rapides pour en faciliter la mécanisation. Ces développements ont été étroitement liés à ceux de la mécanique (1950-1970), de l'hydraulique (1970-1980), de l'électronique (1980-1990) et, dernièrement, de l'informatique, de l'automatisation et de l'ergonomie (conception adaptée) des postes de travail (1990 à nos jours). Le transfert des

informations et les aspects de sécurité sont deux domaines de plus en plus stratégiques pour les entreprises leaders de ces marchés.

Par ailleurs, les cours du bois et les prix de prestation (en euro constant) n'ayant pas évolué significativement ces 20 dernières années, les machines d'exploitation forestière doivent en plus répondre prioritairement à deux objectifs concomitants :

- augmenter leur productivité, soit le nombre de m<sup>3</sup> par heure de travail (puisque le travail est le plus souvent rémunéré au volume travaillé), tout en gardant le niveau de robustesse requis pour travailler dans un milieu très rude ;
- contrôler les coûts de revient pour rester compétitif, sachant que les charges liées à cette activité n'ont pas cessé de croître entre autres après l'externalisation de l'activité de celle de la scierie (dans les années 1970), mais aussi à cause des risques d'accidents particuliers.

En France, les entreprises de travaux forestiers sont le plus souvent de très petite taille, souvent unipersonnelle. Dans ce contexte, les investissements se tournent le plus

souvent vers les concepts de machines les plus robustes et productifs.

Pour rappel, la productivité, en exploitation forestière, est essentiellement liée à deux facteurs : le volume de l'arbre moyen et le prélèvement à l'hectare. Les exploitants regardent de très près ces informations sur les fiches articles lors des ventes de bois pour estimer le coût de mobilisation.

Ainsi ces dernières années, les machines de bûcheronnage abattent et façonnent des arbres de plus en plus gros et les porteurs débarquent des charges les plus importantes possibles. Ainsi, le diamètre maximum de travail des abatteuses est aujourd'hui de 60 à 80 cm pour les plus grosses têtes de façonnage alors qu'il n'était que de 40 cm en 1980. De même, les porteurs ou débardeurs peuvent charger leur propre masse à vide : les plus gros matériels déplacent jusqu'à 36 tonnes en charge.

Toutefois, et contrairement à ce que beaucoup pensent, les gammes de machines forestières proposées par les constructeurs (principalement scandinaves, américains et allemands ; la France ne

## Un constructeur finlandais attentif au besoin en machines pouvant évoluer sur sols sensibles

Le 10 octobre dernier, le constructeur finlandais PONSSE et l'établissement forestier d'état (Metsähallitus) publiaient un communiqué sur les résultats de travaux de développement concernant la récolte de bois sur sols peu portant.

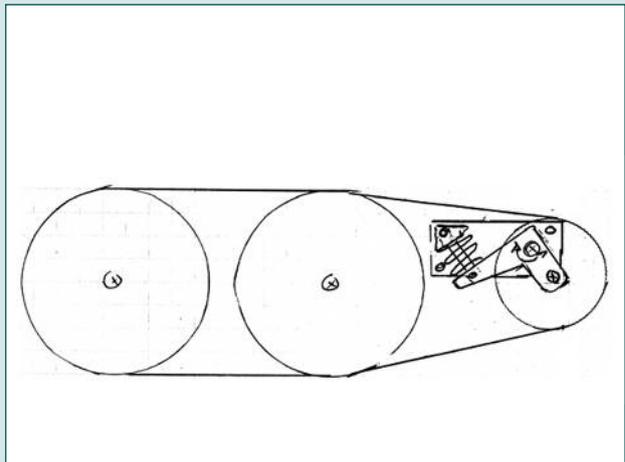
Pour nos collègues finlandais, l'enjeu est de taille : le cinquième de leurs volumes annuels vient de sols sensibles, particulièrement d'anciennes tourbières drainées dans les années 60-70 pour boisement ; d'autre part, la demande en bois finlandais augmente suite aux taxes sur les bois russes et le changement climatique réduit ces dernières années la période d'exploitation sur sol gelé.

Le projet s'est concentré sur deux stratégies : allonger la période d'exploitation pour les machines existantes, tout en observant mieux les consignes environnementales ; développer des machines adaptées aux sols sensibles.

**La première stratégie** consiste à baisser la pression au sol en augmentant la surface de contact tout en veillant à ce qu'elle soit la moins agressive possible. Les développements se font sur la largeur et la structure des pneus ou sur l'augmentation de la largeur des différents types de chenilles métalliques ou tracks (sachant que la largeur totale d'une machine est limitée au regard des impacts sur les arbres restants), ou bien sur l'installation de roues auxiliaires, utilisables en cas de besoin et permettant la pose de tracks.

**La deuxième stratégie** consiste à développer une machine spécialisée. Le prototype d'un porteur à 5 ponts (soit dix roues) équipé de tracks spéciaux a été construit et testé (photo). La pression au sol est considérablement réduite par rapport aux machines habituelles. Il est question maintenant d'étendre ce système novateur à l'ensemble des porteurs de la marque. Le lancement devrait se faire l'été prochain.

Au-delà de ces développements technologiques, le projet s'est aussi attaché aux procédures de gestion forestière des zones sensibles pour la sélection des parcelles à exploiter, la programmation des sites de récolte et la planification du travail. La réflexion vise aussi l'amélioration du niveau de compétence et de qualification des entreprises de travaux forestiers.



Principe de la roue auxiliaire (avec track)

Photo et dessin T. Högnäs, Metsähallitus



Prototype du porteur à 10 roues

Ponsse Oyj

compte plus que 2 constructeurs) restent plus variées qu'il n'y paraît. La spécialisation des machines existe. Certaines sont conçues pour les premières éclaircies et d'autres pour les coupes finales, en tenant compte des deux critères cités précédemment.

Mais dans l'environnement économique décrit plus haut et particulièrement pour la France, c'est le plus souvent l'adage *qui peut le plus peut le moins* qui l'emporte... malheureusement.

Or, comme nous l'avons vu dans ce dossier, l'utilisation d'une machine peu adaptée peut avoir des conséquences très négatives sur le milieu forestier. Il faut donc intégrer à nos logiques sylvicoles les limites de la mobilisation du bois (moteur économique de nos pratiques) ; cela ne peut que renforcer notre professionnalisme vis-à-vis de nos partenaires et par là même nos objectifs de gestion durable.

### Évolution des modes de mise en marchés et mutation des stratégies d'approvisionnement des scieries

Des évolutions ont eu lieu aussi sur les modes de ventes en France. Et pour cause : il existe un lien étroit entre l'organisation de la récolte, son coût et les responsabilités de chacun dans la chaîne de mobilisation, en fonction du type de vente.

Par tradition, nous avons plutôt utilisé jusqu'ici la vente des bois en bloc et sur pied directement aux exploitants forestiers et/ou scieurs, alors que nos voisins germaniques et scandinaves vendent plus généralement leur bois façonné bord de route. Ils intègrent dès lors dans leurs concepts et choix de gestion forestière les modes de récoltes les plus adaptés au type de peuplement, à la

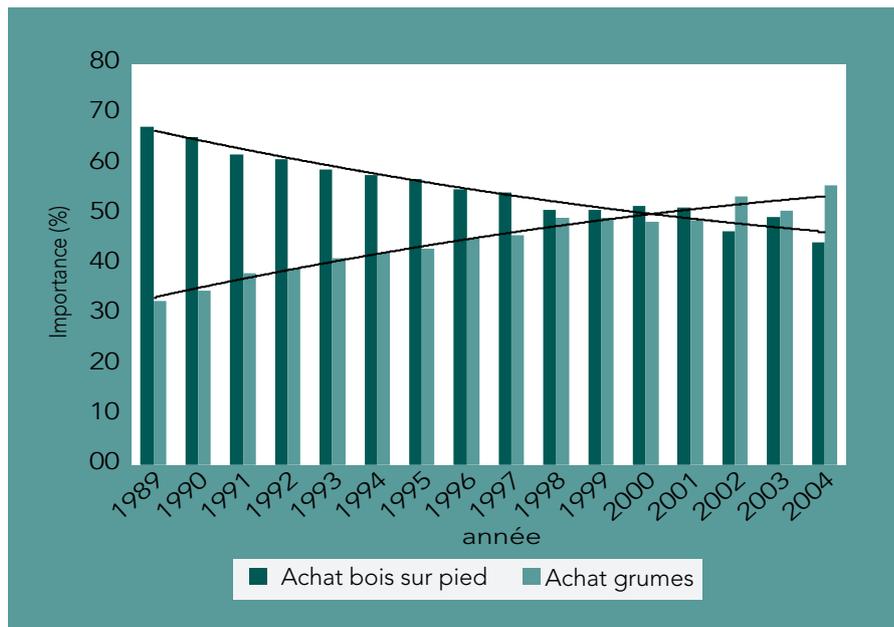


Fig. 1 : évolution de l'origine des approvisionnements des scieries françaises (source FCBA et EAB)

desserte existante, à la pente... et maîtrisent ainsi le choix des systèmes de mobilisation qu'ils mettent en œuvre, en interne ou par sous-traitance.

Cependant, les achats de bois sur pied diminuent, toutes forêts confondues (publiques ou privées). Les approvisionnements des transformateurs sont passés, en moins de 20 ans, de 70 % des bois achetés sur pied à moins de 50 % aujourd'hui (figure 1).

Comment peut-on interpréter cette évolution ?

Tout d'abord, il faut savoir que le poids de la matière première est de plus en plus lourd pour les industriels (55 à 60 % de leurs chiffres d'affaires). De plus, leurs rayons d'approvisionnement augmentent plus vite que l'accroissement de leurs besoins, dans un contexte de morcellement de la forêt française qui tend le plus souvent à limiter la taille des lots de bois. Par ailleurs, ils s'orientent de plus en plus vers une matière première calibrée et livrée en flux tendu pour se développer vers

leur cœur de métier. Enfin, la diminution des coûts de non-qualité (diamètres, longueurs et qualités non adaptés, délais de livraison incertains...) est pour un industriel une préoccupation constante qui est d'ailleurs étroitement liée à son type d'outils de transformation et à ses marchés de produits bois (sciages, panneaux, papiers et cartons...). D'où le besoin de définition de la matière première, en dimension et en qualité (en référence à une norme de classement ou un cahier des charges), et la nécessité de livraison avec des cadencements définis.

Le choix du système de mobilisation des bois est donc partie intégrante de cet ensemble. D'ailleurs Ciréron Rotaru, ingénieur du CTBA, parlait dès les années 1980 des « interactions sylviculture – exploitation forestière – environnement », en liant les systèmes de mobilisation à la fois aux contraintes sylvicoles sur le long terme, économiques avec le ou les type(s) de produits à livrer, et environnementales liées à la station et au milieu naturel (Rotaru, 1985).

## Un défi à relever par les gestionnaires forestiers

La notion de développement durable ou plutôt soutenable (si l'on traduit plus fidèlement le terme anglais « *sustainable development* ») contient trois piliers essentiels : le respect de l'environnement, des contraintes économiques et des aspects sociaux, entre autres ceux liés aux conditions de travail des entreprises mobilisatrices.

Confronté aux évolutions de la filière, le gestionnaire forestier doit s'organiser pour contrôler à la fois la qualité des exploitations et le service fourni qui consiste à livrer aux industriels une matière première répondant à leurs besoins. Le défi à relever est celui de la gestion intégrée de la sylviculture, de l'exploitation forestière et de l'environnement naturel, pour permettre à la fois la valorisation du bois, éco-matériau par excellence, et l'optimisation du contexte environnemental. Cela passe entre autres par des procédures internes adaptées de mise en marché et par une meilleure connaissance des techniques de mobilisation et de l'ensemble des coûts directs et indirects liés à la production forestière et aux conditions de sa récolte (voir Bruciamacchie et al. dans ce dossier).

Le Grenelle de l'Environnement et l'accord passé entre France Nature Environnement et France Forêt vont dans ce sens avec le leitmotiv « Mobiliser plus en préservant mieux l'environnement ». L'Établissement, qui est particulièrement sensible aux questions relatives à la qualité de l'exploitation forestière, a franchi un premier pas avec l'adoption dernièrement des nouvelles *Cluses Générales de Ventes* et du *Règlement National d'Exploitation Forestière* par de conseil d'administration de l'ONF et le comité technique paritaire central fin décembre 2007.



ONF

Diffuser les enseignements des chantiers de démonstration PROSOL (ici en FD des Hauts Bois)

L'ensemble des partenaires internes et externes ont été consultés et ont pu apporter leurs contributions. Ainsi ce règlement d'exploitation, de portée nationale pour les forêts publiques, entrera en vigueur dès juillet 2008 et il s'appliquera à tous les intervenants en forêt (exploitants forestiers, entrepreneurs de travaux forestiers, affouagistes et cessionnaires ainsi que nos propres ressources internes) ce qui lui donne un caractère équitable, quel que soit le statut de l'intervenant. Il définit le cahier des charges de nos attentes en termes de qualité et de professionnalisme pour l'ensemble de ce secteur et de ses entreprises.

L'étape suivante, à court terme, sera de mieux cibler les consultations d'entreprises par une typologie des situations de travail (pour pouvoir peser sur le choix des systèmes de mobilisation) et contractualiser de façon plus pérenne avec les entreprises. C'est la

condition *sine qua non* pour influencer sur leurs investissements à venir, lesquels devront être mieux adaptés aux besoins et aux diverses situations forestières. Ainsi, c'est en connaissant à la fois les contraintes forestières et celles des entreprises que l'on pourra peser sur l'évolution du parc de machines forestières.

### Le cas des sols sensibles

Comme on l'a vu au fil de ce dossier, la protection des sols est un des éléments essentiels de la production forestière. Même si les surfaces concernées restent encore à être mieux définies, il semble que leur proportion, à l'échelle nationale, soit relativement importante vu les types de sols qui caractérisent la forêt française.

Il existe des systèmes complémentaires pour mieux protéger les sols, qui ont fait l'objet de chantiers de démonstration dans le cadre du projet PROSOL (Bartoli

et al., 2006) et les constructeurs offrent une gamme beaucoup plus large, que ce qui peut sembler au premier abord, pour y répondre (voir l'encadré sur le constructeur finlandais).

Ainsi la démarche doit être globale et passe naturellement par :

- la création et la gestion des voies de circulation nécessaires pour les machines forestières dans les peuplements (cloisonnements d'exploitation) ;

- la mise en œuvre, quand cela est possible en résineux, du système de sortie des bois en courtes longueurs, moins impactant sur le sol et les arbres restants (Cacot, 2006) ;

- l'utilisation de débusqueurs à grues plutôt qu'à pinces, ce qui permet à la fois de garder un environnement ergonomique de qualité pour les opérateurs et de limiter la surface circulée. Cela nécessite toutefois une consigne d'abattage directionnel vers les cloisonnements ;

- la coordination des moyens d'exploitation pour éviter les goulots d'étranglement qui abaissent la productivité de l'ensemble de la chaîne de mobilisation (relations entre le bûcheronnage et le débardage ; relations entre le débardage et la reprise par camion ; points noirs des réseaux routiers...) ;

- dans certains cas particuliers, l'utilisation combinée des options de la petite mécanisation (cheval, cheval de fer, mini-débardeur) et des machines traditionnelles quand cela est nécessaire (voir page 38, figure 1) ;

- le développement du câble téléphérique, qui permet de sortir les bois sans dommage au sol, en toute saison et donc d'assurer ainsi des flux logistiques constants ;

- l'estimation des ressources mobilisables par système d'exploitation (au tracteur avec des cloisonnements ou au câble téléphérique en particu-

lier) : cela permet de garantir à la fois des volumes suffisants en cas d'investissement et d'optimiser les coûts de la récolte.

Ces réflexions font déjà l'objet d'initiatives dans plusieurs agences, ce qui montre bien l'intérêt des forestiers autour de ce sujet qui a un impact fort sur la forêt et sur notre image.

Par ailleurs, un kit de vulgarisation des enseignements du programme PROSOL est en cours de finalisation par la direction technique (diffusion fin du premier semestre 2008). Il est composé d'un film de 5 minutes sur le débardage par câble en plaine et d'un guide pratique sur le thème d'une exploitation forestière respectueuse du sol et de la forêt. Ce kit sera distribué à l'ensemble des acteurs de la filière, des centres de formation aux professionnels (forestiers et ETF) en passant par les organismes partenaires et syndicats professionnels ainsi que les ministères de tutelles.

### En guise de conclusion

Pour répondre à nos engagements environnementaux concernant la gestion durable des espaces forestiers, pour être en phase avec les attentes de nos clients et partenaires industriels ou environnementalistes et pour répondre aux conclusions du Grenelle de l'Environnement, le développement des compétences de notre métier de sylviculteur et de celles liées à la mobilisation des produits de la forêt est bien une réponse pertinente et efficace. La mise en place de ces nouvelles compétences sera bien évidemment accompagnée par les formations et informations nécessaires à l'ensemble des personnels concernés.

**Didier PISCHEDDA**

ONF — DTCB

département commercial-bois

didier.pischedda@onf.fr

### Bibliographie

BARTOLI M., PISCHEDDA D., CHAGNON J.L., 2006. Pour une exploitation respectueuse des sols. Chantiers de démonstration. Rapport final. DGFAR, ONF, CTBA. 75 p., ann.

CACOT E., 2006. Observatoire des bonnes pratiques environnementales en exploitation forestière. Rapport final. AFOCEL 80 p.

ROTARU C., 1985. Problèmes des interactions exploitation forestière et sylviculture-environnement en France. IX<sup>ème</sup> Congrès Forestier Mondial, Mexico.

# Conserver les ressources génétiques du sapin pectiné en France : pourquoi, comment ?

Nouvel épisode de la série sur les réseaux de conservation *in situ* des ressources génétiques des espèces forestières en France : après la philosophie du dispositif général et la conception du réseau pin sylvestre (RDVT n° 17), puis la présentation du réseau épicéa (RDVT n° 18), examinons le cas du sapin.

## Une essence majeure du paysage forestier montagnard

Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) est la principale essence résineuse de l'étage montagnard humide de l'Europe moyenne et méridionale (figure 1). On le rencontre de 400 à 1 800 m d'altitude entre les isothermes 0 et 8 °C. Il occupe en France 820 000 ha soit 5,5 % de la surface forestière de production. 68 % de ces forêts sont constituées de peuplements mélangés. Avec 156 millions de mètres cubes, il représente 6,6 % du volume disponible de bois sur pied et 17,6 % du volume total des conifères (Source : IFN 2006).

Les populations espagnoles et françaises correspondent à l'extrémité occidentale de l'aire naturelle. En France, ces populations occupent une large gamme de milieux dans les Vosges, le Jura, les Alpes, le Massif Central, les Pyrénées, la Normandie et la Corse. La diversité des habitats naturels de sapinières (encadré) traduit la capacité de ces sapinières à développer des spécificités adaptatives locales à une large gamme de conditions édaphiques et climatiques.

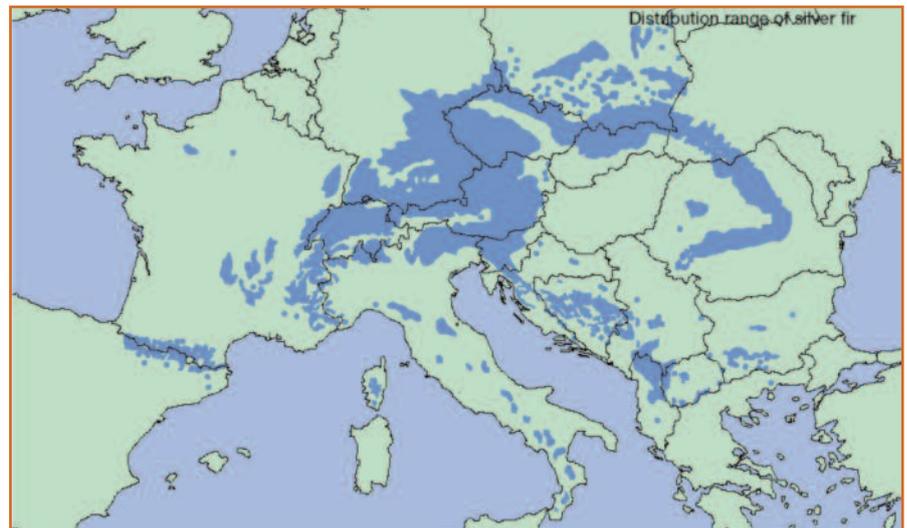


Fig. 1 : aire naturelle de distribution du sapin pectiné et zones d'autochtonie en France. (Wolf, 2003)

## Reconquêtes postglaciaires et répartition actuelle

La succession d'épisodes glaciaires alternant avec des périodes plus tempérées a généré des phases de contraction des espèces dans des zones refuges, suivies de phases d'expansion. Lors des phases de repli, la diminution des tailles des populations et leur isolement ont pu provoquer des différenciations génétiques entre ces îlots relictuels de sapinières. Les périodes de réchauffement ont permis de recoloniser, à partir de ces îlots,

les terres libérées par les glaces. La combinaison de ces flux et reflux a fortement influencé la distribution actuelle de la diversité génétique de l'espèce en Europe. La dernière phase d'expansion géographique du sapin pectiné remonte à 11 000 ans et les limites actuelles de l'aire de répartition ont été atteintes il y a 6 000 ans environ.

Des études palynologiques et des analyses par marqueurs moléculaires ont mis en évidence la persistance d'au moins cinq îlots de sapin pectiné durant la dernière

**Habitats naturels de sapinières présents en France**  
(Typologie Corine Biotope)

- 42.1 Sapinières
  - 42.11 Sapinières neutrophiles
    - 42.111 Sapinières neutrophiles intra alpines
      - 42.1111 Sapinières à *Oxalis*
      - 42.1112 Sapinières à hautes herbes
      - 42.1113 Sapinières à *Troschicantes*
    - 42.112 Sapinières neutrophiles de la zone du hêtre
    - 42.113 Sapinières intra pyrénéennes
  - 42.12 Sapinières calciques
    - 42.121 Sapinières calcicoles intra alpines
    - 42.122 Sapinières calcicoles de la zone du hêtre
  - 42.13 Sapinières acidiphiles
    - 42.131 Sapinières acidiphiles intra alpines
    - 42.132 Sapinières acidiphiles de la zone du hêtre
    - 42.133 Sapinières à *Rhododendron*
      - 42.1331 Sapinières pyrénéennes à *Rhododendron*
      - 42.1332 Sapinières alpiennes à *Rhododendron*
      - 42.1333 Sapinières à *Rhododendron* sur rocailles
  - 42.14 Sapinières Corses
  - 42.1B Reboisement en sapins (dans l'aire naturelle)
    - 42.1B1 Reboisement en *Abies alba* (dans l'aire naturelle)

glaciation (Konnert et Bergmann, 1995). La sapinière européenne actuelle est principalement issue de deux d'entre eux, situés l'un dans les Balkans et l'autre en Italie centrale (figure 2). Les sapins alpins sont probablement originaires d'un refuge situé dans le nord du massif des Apennins ou dans les Alpes Ligures, les autres

populations résiduelles n'ont participé que de manière limitée à la reconquête du reste de l'Europe.

Ainsi, les îlots glaciaires pyrénéens et calabrais (zones 1 et 2, figure 2) ont uniquement contribué à la reconquête localisée des massifs où ils avaient survécu (Terhüner-Berson et al. 2004, Vendramin et

al. 1999). Les sapins corses, dont on ignore encore s'ils proviennent d'un refuge distinct, semblent assez proches génétiquement de ceux rencontrés dans l'arrière-pays niçois (Fady et al. 1999). De même les sapinières du Massif Central pourraient s'être développées localement à partir d'un îlot résiduel (Konnert et Bergmann, 1995) et certaines similitudes avec les populations du Jura et des Vosges pour des marqueurs isozymes laissent supposer une contribution du Massif Central à la recolonisation de ces deux autres massifs. Pour le sapin de Normandie, on ne dispose que de peu d'éléments démontrant son caractère relictuel et autochtone. Citons l'étude entomologique de Ste Claire Deville (1933) démontrant la présence de 15 coléoptères subalpins ou celle de M. Guinier (1938) qui note l'existence de taxons accompagnant le sapin en montagne parmi les associations végétales compagnes des sapinières du Pays d'Ouche. Enfin, des sapinières productives semblent connues avant la révolution de 1789 (Sapaie de Raveton).

Aux carrefours de ces voies d'expansion vers le nord, existent des zones dites d'introggression où des sapins originaires de refuges distincts ont pu se rencontrer et se croiser. Tel est le cas des sapins des Vosges et du Jura dont les populations actuelles proviennent de recolonisations à partir de refuges à la fois italiens et français.

**Une structuration marquée de la diversité génétique au niveau national**

La diversité génétique actuelle des populations naturelles de sapins est le résultat combiné de la différenciation de « pools » génétiques dans des refuges glaciaires distincts, de rencontres entre ces pools, de l'évolution, des mutations et des pressions de sélection

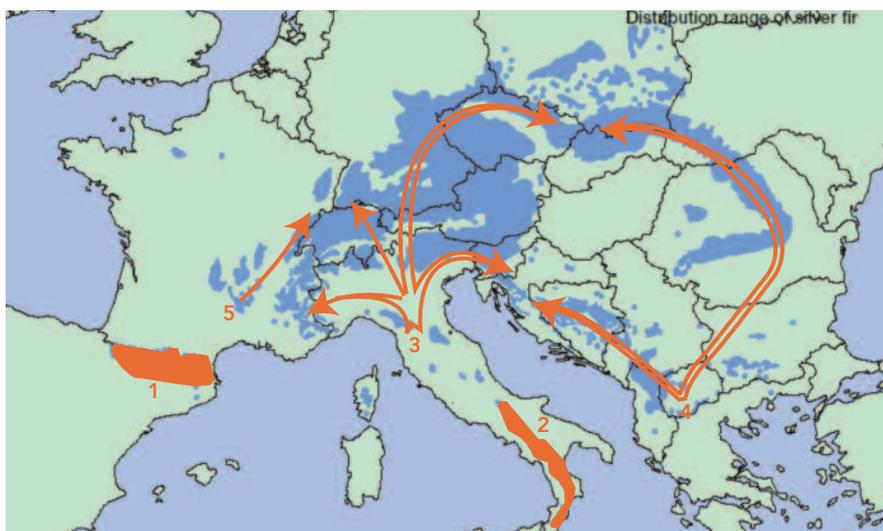


Fig. 2 : refuges glaciaires du sapin pectiné et principales voies de recolonisation, d'après Konnert et Bergmann (1995)

Marqueurs ou type d'étude	Référence	Populations étudiées	Résultats	Interprétation
Étude comparative en pépinière	Arbez, 1969	21 provenances françaises	Faible variabilité individuelle. Le choix de la provenance est très important	Possibilité d'adaptation restreinte
Étude palynologique	G Jalut <i>et al.</i> , 1998	Chaîne pyrénéenne 20 populations françaises	Dans le développement postglaciaire du sapin, net gradient est-ouest	Existence de refuges aux 2 extrémités de la chaîne. Certains peuplements pourraient être issus d'un faible nombre de semenciers.
Tests de comparaison de provenances	INRA depuis une quarantaine d'années	92 provenances de l'ensemble de l'aire, testées sur 10 sites	Une forte variabilité inter-provenances sur la vigueur et le débourrement Mise en évidence de cercles d'apparement en régénération naturelle	
Isozymes	Fady <i>et al.</i> , 1999	28 populations françaises	Même origine postglaciaire pour les peuplements alpins et nord est de la France	L'origine Massif Central est liée à l'histoire alpine.
Isozymes et terpènes	Sagnard <i>et al.</i> , 2002	16 populations des Alpes du sud françaises	Définit 3 groupes : Alpes externes sèches, Alpes intermédiaires, Alpes sous influence ligure	Nous sommes en limite d'aire, les populations présentent des caractères adaptatifs particuliers.
Terpènes	Beyhaut, 1990	54 populations françaises	La provenance Normandie est proche du groupe Donon, Gérardmer. Dans le massif Central, le Velay Vivarais est distinct des autres. Différence entre P. O. et Aude.	
Terpènes	Moreau, 1989	FD Celles sur Plaine dans les Basses Vosges	Structuration du peuplement en groupes de génotypes. Forte consanguinité	

Tab. 1 : principaux résultats d'analyses et d'études sur la diversité et la variabilité génétiques du sapin pectiné en France

exercées dans des contextes pédoclimatiques divers.

À l'échelle du territoire national, les sapins alpins peuvent être séparés en trois groupes distincts (Alpes externes sèches, Alpes intermédiaires, Alpes sous influence ligure), grâce à des marqueurs terpéniques et isozymes (Sagnard *et al.* 2002). Fortement différenciés des autres populations françaises, les sapins pyrénéens ne semblent toutefois pas constituer un groupe homogène, les peuplements des Pyrénées orientales se distin-

quant de ceux d'un groupe Hautes-Pyrénées et Aude. Par ailleurs, la diversité génétique réduite des populations pyrénéennes peut être interprétée comme la conséquence d'effectifs passés très réduits lors des dernières glaciations (Vendramin *et al.* 1999). Même si les Vosges et le Jura forment un ensemble géographique, les provenances du Jura apparaissent génétiquement différentes de celles du groupe Basses Vosges gréseuses, Donon, Gérardmer (Beyhaut 1990). Le sapin de Normandie

enfin, présent essentiellement sur la partie nord du Perche et sur l'est du Pays d'Auge, se trouve en situation géographique et écologique marginale de plaine (altitude allant de 180 à 310 m), avec une température moyenne élevée et une pluviométrie inférieure à 900 mm/an. Ces populations coupées du reste de l'aire principale ont évolué indépendamment et forment peut-être un écotype très particulier. Une résistance exceptionnelle de ce sapin aux sécheresses de 1803 et 1834 a ainsi été constatée.

Chez le sapin pectiné, la variabilité de caractères adaptatifs comme la vigueur, le débourrement et la résistance à la sécheresse est plus importante entre individus d'un même peuplement qu'entre différents peuplements (Barberot, 1998, Sagnard et al. 2002). La pérennité de cette variabilité est essentielle pour préserver dans la durée les capacités d'adaptation aux conditions locales. Elle passe par le maintien d'un effectif suffisant de reproducteurs non apparentés et par un fonctionnement dynamique du système de reproduction des peuplements limitant l'autofécondation et assurant un brassage génétique important.

## Pourquoi créer un réseau de conservation pour le sapin pectiné ?

### Des causes anciennes

Les peuplements actuels ont été très fortement influencés par l'activité humaine en particulier par une phase de surexploitation du 16<sup>e</sup> au 18<sup>e</sup> siècles. La pression pastorale et le charbonnage ont conduit à une réduction sévère des surfaces des sapinières montagnardes et subalpines. Cette diminution des surfaces boisées, couplée à un morcellement des populations aggravé par la topographie en zone de montagne, a contribué à accentuer l'isolement des peuplements en limitant les flux de gènes entre eux. Réduction de surface et diminution d'effectifs par suite des prélèvements passés sont allés de pair (Bonhôte, 1998). En conséquence, les peuplements actuels sont souvent issus d'un faible nombre de semenciers (FD de Prémol, des Fanges, du Canigou).

### Des causes actuelles

Le recours à la régénération artificielle et ses conséquences en termes de transferts de graines et

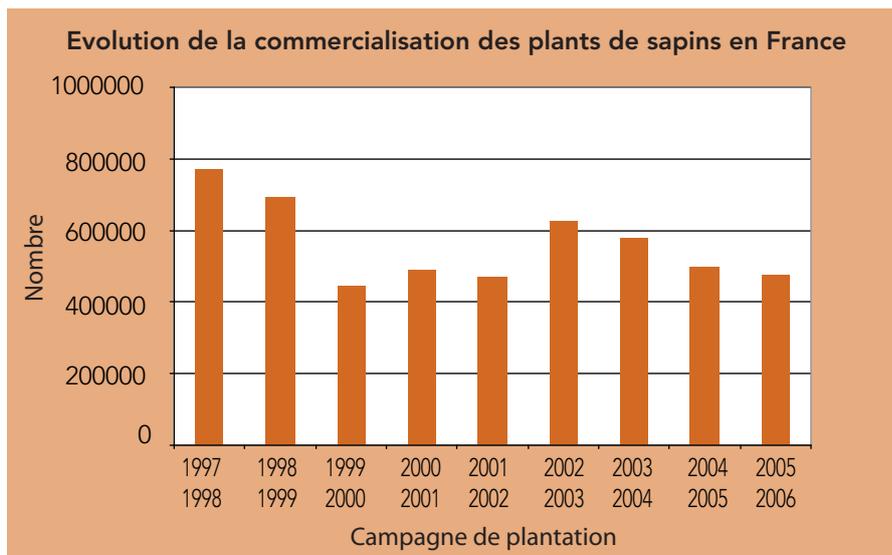


Fig. 3 : évolution du nombre de plants de sapin vendus en France (Source Sreaf Auvergne)

plants n'ont pas eu que des effets bénéfiques. Des provenances ont ainsi été introduites à des distances importantes de leur zone naturelle, comme le sapin de l'Aude planté massivement dans le Massif Central ou les nombreuses introductions de provenances allochtones réalisées en Normandie. Il s'ensuit un brassage génétique infiniment plus vigoureux que celui obtenu par voie naturelle et un risque réel de modification des écotypes locaux.

Encore abondamment planté (figure 3), le sapin pectiné bénéficie de régions de provenances et de peuplements sélectionnés. Cependant, les disponibilités en graines et plants une année donnée ne correspondent pas toujours aux demandes des reboiseurs. Cette inadéquation entre offre et besoins locaux, plus fréquente pour les petites régions de provenance, conduit à privilégier quelques sources d'approvisionnement qui ne sauraient représenter l'ensemble du patrimoine génétique de l'espèce. De plus, les récoltes de cônes par grimpage d'un nombre parfois très limité de reproducteurs peu-

vent également contribuer à réduire la base génétique des semences utilisées.

Les pratiques sylvicoles peuvent elles aussi influencer très fortement sur la composition du patrimoine génétique des peuplements, en particulier au stade de la régénération naturelle, étape clé de la transmission du patrimoine génétique d'une génération à l'autre. La qualité génétique de la reproduction dépendra de la maîtrise de deux types de risques :

- **risque d'autofécondation**, lié à la quantité de pollen produit une année donnée et à son accessibilité en fonction de la densité du peuplement. Une faible densité de semenciers augmente les apports de pollen en provenance d'individus éloignés mais accroît également le risque d'autofécondation, surtout chez les sapins à forte floraison mâle (Sagnard, 2001).

- **risque d'hybridation** lié à la présence de plantations de sapins exotiques. Des mouvements de pollen ou de graines provenant de plantations de sapins méditerranéens (*A. bornmulleriana*, *A. cephalonica*, *A. cilicica*, *A. numidica*, *A. nordman-*

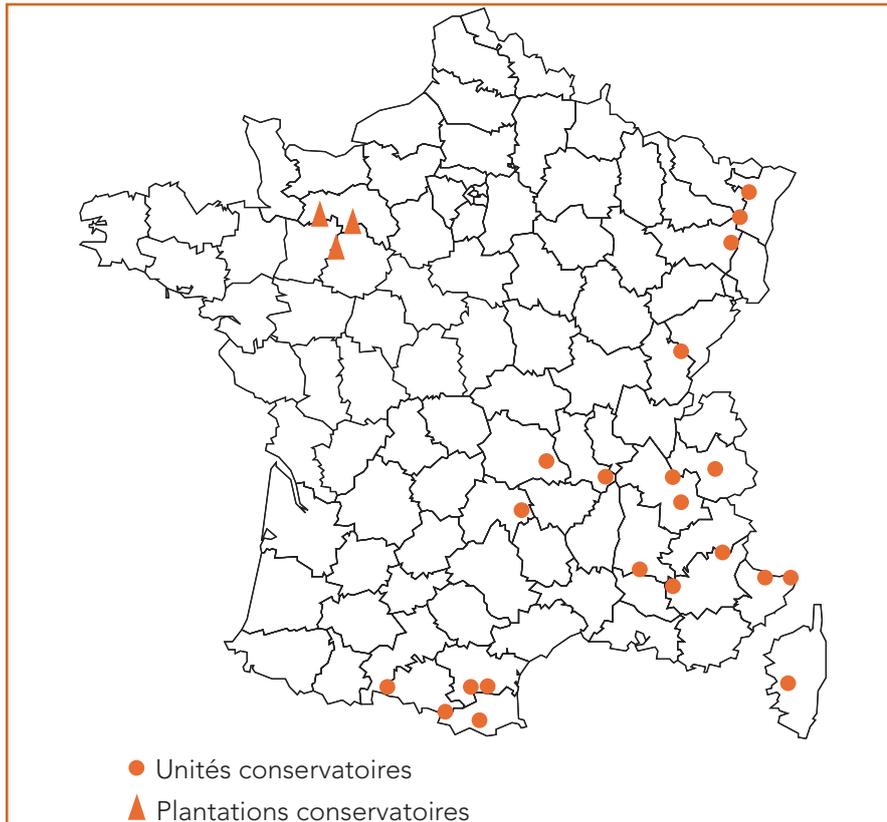


Fig. 4 : répartition géographique des unités du réseau de conservation *in situ* du sapin pectiné et des plantations conservatoires de provenance (au 1<sup>er</sup> janvier 2007)

*niana*, *A. pinsapo*) interfertiles avec *A. alba*, souvent sur de longues distances, peuvent provoquer une pollution génétique par croisement avec la souche locale de sapin.

### Un réseau national d'unités conservatoires

#### Constitution du réseau sapin pectiné

Les réseaux de conservation *in situ* du sapin et hêtre ont été les premiers créés (Balsemin, 2004). Les peuplements pré-retenus en 1989 représentaient les 7 grandes zones où le sapin est présent (Vosges, Jura, Alpes, Massif Central, Pyrénées, Normandie, Corse). Le choix de l'échantillon de départ se basait uniquement sur les résultats des tests de comparaison de provenances INRA en âge de fournir des informa-

tions. Une enquête lancée auprès des personnels de l'ONF (note de service n° 89.G.212 du 11/09/1989) aboutit à une sélection de 24 sites. Six étaient des peuplements porte-graines classés en catégorie contrôlée et dix-huit autres classés en catégorie sélectionnée. La nécessité d'affiner le réseau pour le Massif Central et la Franche Comté et de diminuer la représentation du Massif Vosgien conduisit à une liste de 18 unités conservatoires (UC) arrêtée par la Commission nationale des ressources génétiques fin 1993 puis dûment validée. Des études génétiques et phyto-écologiques complémentaires menées par l'INRA sur des populations du Sud-Est (Fady *et al.* 1999 ; Sagnard *et al.* 2002) aboutirent à l'ajout de trois nouvelles UC (Beaumont du Ventoux, Saint Martin Vésubie et La

Brigue) en 2005 (tableau 2 page suivante, figure 4).

### 21 Unités Conservatoires en 2007

La surface du noyau central varie de 5,17 ha (La Fage et le Réal) à 35,02 ha (Gérardmer), celle de la zone tampon de 48 ha à 319,35 ha. Ces écarts importants sont liés à la topographie des sites et au parcellaire forestier. Le critère d'autochtonie est avéré sur la majorité des UC mais on peut mentionner des introductions de sapin pectiné artificielles sur l'UC des Fanges ou encore des introductions de sapins méditerranéens susceptibles d'hybridation à proximité des UC du Canigou ou de Cruis. Les 18 premières unités conservatoires retenues sont toutes situées dans des contextes favorables au sapin et on ne note de problème de régénération naturelle que pour les UC du Donon et de La Joux. Certaines UC sont issues de phénomènes de colonisation très récente (UC de St Étienne) et d'autres sont des reconstitutions de peuplements surexploités et dégradés (UC du Canigou, des Corbières Occidentale) à partir d'un très faible nombre de semenciers.

À cet effort national de conservation *in situ*, il convient d'ajouter une action complémentaire de conservation du seul peuplement porte-graines de Normandie (Beaufai) — d'ailleurs détruit par la tempête de décembre 1999 -, sous la forme de 3 plantations de provenances authentifiées (surface totale de 23 ha) installées, après récoltes de semenciers de Beaufai, en FD d'Écouves, Andaines et Sillé en 1993-94 (figure 4). Cette méthode de conservation peut être qualifiée « d'*ex situ* dynamique » car les plantations réalisées sont soumises aux pressions de sélection exercées par le milieu et par la gestion du forestier.

Dept	Commune (s) de situation	Forêt	Alt. (m)	Pmm (mm)	Régions IFN
67	Grandfontaine	FD du Donon	510 à 800	1670	Hautes Vosges gréseuses
15	Védrines-Saint-Loup	FS la Fage et le Réal	1080 à 1105	1166	Margeride
63	Echandelys	FD du Livradois	970 à 1094	1043	Livradois
2A	Ciamanacce et Tasso	FD de Punteniellu	1310 à 1851		Renoso incudine
39	Supt	FD de la Joux	725 à 812	1800	Pentes Intermédiaires Jura
11	Arques	FD des Corbières Occidentales	550 à 830	950 à 350m	Corbières Occidentales
11	Arques	FC d'Arques	640 à 800	950 à 350m	Corbières Occidentales
11	Puilaurens	FD des Fanges	900 à 1000	1198	Pays de Sault
66	Casteil	FD du Canigou	1300 à 2060		Conflent
88	Celles sur Plaine	FD de Celles	450 à 778	1400	Vosges gréseuses
88	Gerardmer	FD de Gerardmer	650 à 907	1850	Vosges cristallines
9	Mijanes	FD des Hares	1530 à 1620	878	Quérigut
9	Saint — Lary	FD de Saint Lary	1300 à 1600	1249	Haute chaîne pyrénéenne
4	Cruis	FD de Cruis	1446 à 1630	1100	Montagne de Lure
5	Crots	FD de Boscodon	1400 à 1450	950	Embrunais
38	St Pierre de Chartreuse	FD de la Grande Chartreuse	700 à 1400	2191	Chartreuse
38	Vaulnaveys-le-Haut	FD de Prémol	1100 à 1450	1500	Belledone
42	Tarentaise	FC de St Étienne	1150	1048	Coteaux du Nord Vivarais
73	Notre Dame de Briançon	Léchère Doucy	700 à 1283	1234	Belledone, basse Maurienne
73	Notre Dame de Briançon	Léchère Notre Dame de Briançon	700 à 960	1234	Belledone, basse Maurienne
84	Beaumont du Ventoux	FC de Beaumont du Ventoux	980 – 1420	1600	Ventoux
<b>Peuplements en cours d'intégration dans le réseau :</b>					
06	Saint Martin Vésubie	FC de Saint Martin de Vésubie	1519 – 2200	1500	Alpes Niçaises
06	La Brigue	FC de la Brigue	1260 – 1708	1075	Alpes Niçaises

Tab. 2 : liste des peuplements du réseau de conservation in situ du sapin pectiné

## Bilan et perspectives

## Mieux échantillonner la variabilité génétique

Le choix des UC repose encore largement sur le découpage du territoire national en régions de provenances (15/21). Cette sélection purement phénotypique, outre la confusion qu'elle entraîne auprès des gestionnaires de terrain entre conservatoire et peuplement sélectionné pour la récolte de matériels forestiers de reproduction (MFR) exclut des populations présentant parfois une moins bonne venue mais possédant des caractères adaptatifs exceptionnels à des conditions extrêmes : sapinières subalpines à *Rhododendron ferrugineum*, sapinières en situation sèche de basse altitude de l'Aude ou de l'Ariège (Ste Croix Volvestre ; Bétouze d'Agly), sapinière de plaine (Normandie). Les différents types d'habitats naturels de sapinières, qui traduisent la diversité des pressions de sélection que peut exercer le milieu naturel, ne sont donc pas nécessairement représentés dans le réseau de conservation actuel. Des peuplements manifestement bien adaptés à des conditions pédoclimatiques aujourd'hui marginales au sein de l'aire naturelle, peuvent en effet représenter un potentiel adaptatif intéressant dans une perspective de changement climatique et à ce titre constituer des ressources génétiques originales à préserver.

## Mieux échantillonner la diversité génétique

La diversité génétique (neutre) des sapinières est fortement marquée par la dynamique de recolonisation qui a suivi la dernière glaciation. L'éclairage de travaux récents laisse supposer l'existence de deux refuges glaciaires distincts de part et d'autre de la chaîne pyrénéenne. On peut donc supposer que les sapinières les plus occidentales (Hautes-Pyrénées,

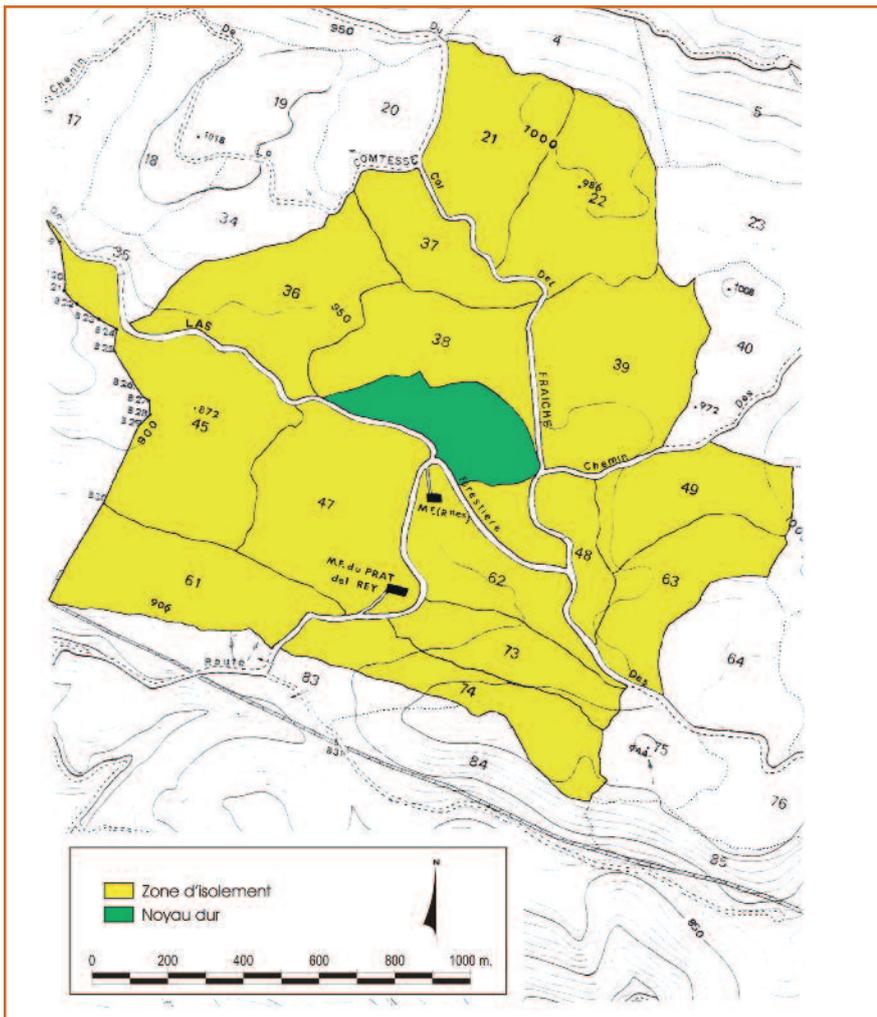


Fig. 5 : unité conservatoire de sapin pectiné en FD des Fanges (11)

## Les critères de sélection des unités conservatoires

sont les suivants :

- une zone centrale où le sapin doit être l'essence dominante ;
- un historique connu permettant d'affirmer l'autochtonie du boisement ;
- un nombre (> 500) et une densité (> 60 tiges/ha) minimum de tiges reproductrices ;
- une régénération naturelle possible et dynamique avec le maintien d'un équilibre sylvo-cynégétique ;
- la possibilité de récolter des cônes.

Une UC comprend 2 compartiments avec des objectifs et des niveaux de contraintes différents (figure n° 5) :

1. Le noyau central, d'une surface assez grande (5 à 10 ha) pour garantir la présence d'un nombre de semenciers suffisant. Il constitue la véritable zone de conservation et doit être régénéré naturellement en priorité. Aucune introduction de sapins allochtones n'est autorisée
2. La zone d'isolement ou zone tampon (100 à 150 ha) qui assure la protection du noyau central. Elle doit jouer un rôle de filtre vis-à-vis des flux de pollen et de graines extérieurs (largeur minimale de 400 m).



Fig. 6 : une régénération naturelle après dépressage dans l'unité conservatoire des Hares (09)

Pyrénées-Atlantiques) présentent des particularités génétiques liées à leur refuge glaciaire distinct. Or cette partie ouest des Pyrénées n'est pas représentée dans le réseau actuel. L'ajout au réseau *in situ* d'une sapinière subalpine pyrénéo-occidentale comblerait à la fois cette lacune et l'absence d'unités conservatoires de haute altitude. La sapinière normande reste également à intégrer au réseau.

### Contrôler la transmission du patrimoine génétique

Si les contraintes fixées par le cahier des charges de gestion des UC sont volontairement faibles, cela ne signifie pas que les pratiques sylvicoles sont sans effet sur le patrimoine génétique de chaque unité (Valadon et Musch, 2007). Les méthodes de régénération naturelle, étalées ou concentrées dans le temps et dans l'espace, avec un nombre variable d'arbres reproducteurs efficaces, les traitements sylvicoles (réguliers ou irréguliers) et les consignes d'éclaircies appliqués font évoluer

la répartition spatiale et les effectifs des sapins reproducteurs (figure 6). Ces interventions peuvent modifier sensiblement le régime de reproduction et affecter par contrecoup la qualité génétique des graines et semis obtenus (Pichot *et al.* 2006).

L'étude de la variabilité du système de reproduction et de la structuration spatiale à échelle fine de la diversité génétique est donc indispensable à la compréhension du fonctionnement génétique des peuplements conservatoires de sapin pectiné. Le suivi génétique de la reproduction devient aussi nécessaire pour juger du bon fonctionnement des UC analysées. Il permet de :

- quantifier les niveaux de pollution génétique : les résultats récents sur les dynamiques des flux de pollen et de graines contribuent à préciser l'ampleur des flux de gènes et à évaluer l'efficacité en tant que filtre de la zone tampon de chaque UC ; son périmètre, fixé jusqu'alors empiriquement, pourrait être ajusté en

fonction des caractéristiques du milieu (vents dominants, localisation de boisements allochtones ou exotiques) ;

- quantifier les taux d'autofécondation, donc d'évaluer la qualité génétique de la production de graines et de semis ; améliorer la qualité génétique de la régénération d'une UC passe par des pollinisations croisées entre un maximum de tiges ;

- détecter la présence de zones d'apparement marqué entre semis recrutés, que les interventions sylvicoles ultérieures (dépressages, éclaircies) devront s'efforcer de gommer ; il semble qu'une répartition en agrégats des semenciers réduise le risque d'apparition de taches de semis fortement apparementés (Sagnard, 2001) ;

- comparer la diversité génétique de la génération en place, celle des semenciers, avec celle de la génération suivante (régénération naturelle). En allongeant la phase de mise en régénération (en traitement régulier), on permet alors à un maximum de semenciers de transmettre leur patrimoine génétique et on limite la contribution des quelques reproducteurs les plus prolifiques.

Des recherches sur ces sujets sont en cours par l'INRA dans les UC de Beaumont du Ventoux et de Cruis.

La qualité génétique des descendants produits au cours des cycles de reproduction constitue un bon indicateur du maintien (ou non) d'un niveau de diversité conforme aux objectifs du réseau de conservation du sapin pectiné, et donc de sa pérennité. Répétées à intervalles réguliers, les études de la diversité des descendants naturels d'un peuplement et de la façon dont ces descendants ont été obtenus (le système de reproduction) constituent un instrument pertinent et fiable de suivi temporel de la diversité génétique des unités conservatoire. Le suivi temporel du réseau de conservation *in situ* du sapin pec-

tiné peut ainsi constituer un observatoire à long terme de l'évolution des potentiels adaptatifs des sapinières, sous la double pression des forces évolutives et de l'action du sylviculteur.

**Guillaume PLAS**

ONF – DT Auvergne-Limousin  
guillaume.plas@onf.fr

**Alain VALADON**

ONF – Conservatoire Génétique  
des Arbres Forestiers Orléans  
alain.valadon@onf.fr

**Bruno FADY**

INRA, UR629, Unité des Recherches  
Forestières Méditerranéennes,  
Avignon  
fady@avignon.inra.fr

## Bibliographie

- ARBEZ M., 1969. Étude comparative en pépinière de quelques provenances françaises de sapin pectiné. Premier aperçu de la variabilité infraspécifique et mise au point sur le sapin de l'Aude. *Annales des Sciences Forestières* vol. 26, n° 4, pp. 475-509
- BARBEROT C., 1998. Relation entre diversité génétique et résistance à la sécheresse en fonction de l'origine géographique intra- et inter-peuplements chez le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) en région méditerranéenne française. Rapport de stage du DEA "Biosciences de l'Environnement et Santé, option Milieux Continentaux", Université Aix-Marseille III. 34 p., ann.
- BEYHAUT G., 1990. Étude de la variabilité géographique du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans son aire naturelle française. Rapport de stage de DEA, Université de Pau et des Pays de l'Adour. 41 p., ann
- BONHOTE, 1998. Forges et forêts dans les Pyrénées ariégeoises : pour une histoire de l'environnement. *Estadens : PyrGraph*. 337 p.
- FADY B. *et al.*, 1999. Genetic differentiation in *Abies alba* populations from south-eastern France. *Forest Genetics*, vol. 6, n° 3, pp. 129-138.
- IFN, 2006. La forêt française : les résultats de la campagne de levé 2005. Nogent-sur-Vernisson : IFN. 113 p.
- JALUT G. *et al.*, 1998. Histoire des forêts du versant nord des Pyrénées au cours des 30 000 dernières années. *Journal de botanique de la Société Botanique de France*, n° 5, pp. 73-84
- KONNERT M., BERGMANN F., 1995. The geographical distribution of genetic variation of silver fir (*Abies alba*, *Pinaceae*) in relation to its migration history. *Plant Systematics and Evolution*, vol. 196, pp.19-30
- MOREAU M.C., 1989. Contribution à l'étude de la structure génétique d'un peuplement de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) des Basses Vosges. Rapport de stage de DEA, Université de Pau, INRA de Bordeaux. 55 p.
- PICHOT C. *et al.*, 2006. Déterminants et conséquences de la qualité génétique des graines et semis lors de la phase initiale de régénération naturelle des peuplements forestiers. In « Des ressources partagées », BRG Ed., Les Actes du BRG, La Rochelle, pp. 277-297
- SAGNARD F., 2001. Dynamique de recolonisation des pinèdes pionnières par la hêtraie-sapinière : étude de la structure des peuplements forestiers et de l'évolution génétique des populations de sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) sur le Mont Ventoux. Thèse de doctorat en sciences, Université Aix-Marseille III. 212 p.
- SAGNARD F., BARBEROT C., FADY B., 2002. Structure of genetic diversity in *Abies alba* Mill. From southwestern Alps : multivariate analysis of adaptive and non-adaptive traits for conservation in France. *Forest Ecology and Management*, vol. 157, n° 1-3, pp. 175-189
- TERHURNE-BERSON R., LITT T., CHEDDADI R., 2004. The spread of *Abies* throughout Europe since the last glacial period : combined macrofossil and pollen data. *Vegetation History and Archaeobotany*, vol. 13, n° 4, pp. 257-268
- VALADON A., MUSCH B., 2007. Les réseaux de conservation *in situ* des ressources génétiques forestières en France : contribution de l'ONF. *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n°17, pp. 3-10
- VENDRAMIN GG. *et al.*, 1999. High level of variation at *Abies alba* chloroplast microsatellite loci in Europe. *Molecular Ecology*, vol. 8, n° 7, pp. 1117-1126
- WOLF H., 2003. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for silver fir (*Abies alba*). Rome, Italy : International Plant Genetic Resources Institute. 6 p.

## Aperçu sur les sapins méditerranéens en France

Les « sapins méditerranéens » forment un groupe assez méconnu des forestiers français, sauf peut-être en zone méditerranéenne. Mais le contexte des changements climatiques soulève à leur égard un regain d'intérêt du fait de leurs aptitudes autécologiques. Sans traiter les questions au fond, Thierry Lamant donne ici un aperçu de l'origine de ces sapins, de leur situation en France et des perspectives et difficultés les concernant, ainsi que des éléments pratiques de détermination.

**A** l'heure où l'on se préoccupe des impacts forestiers du changement climatique, l'idée d'éventuelles essences de substitution fait partie de la réflexion. Parmi celles que l'on peut qualifier de potentiellement éligibles, on trouve le groupe des « sapins méditerranéens ». Cette dénomination familière aux forestiers est d'ailleurs assez symptomatique des difficultés de leur identification puisque l'on parle d'un groupe composé de 10 espèces comme d'une seule entité.

Seul sapin autochtone en France, le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) appartient lui-même à ce groupe où il occupe une position singulière puisque son aire s'étend bien au-delà du bassin méditerranéen (figure 1). Dans cet article, nous allons évoquer la situation actuelle et l'intérêt des autres sapins méditerranéens dans les forêts françaises puis présenter leurs critères d'identification et l'état de leurs populations au sein de leur aire naturelle.

### Bref historique de la présence des sapins méditerranéens en France

À l'exception d'*Abies alba*, les sapins méditerranéens sont actuellement assez peu présents en France même

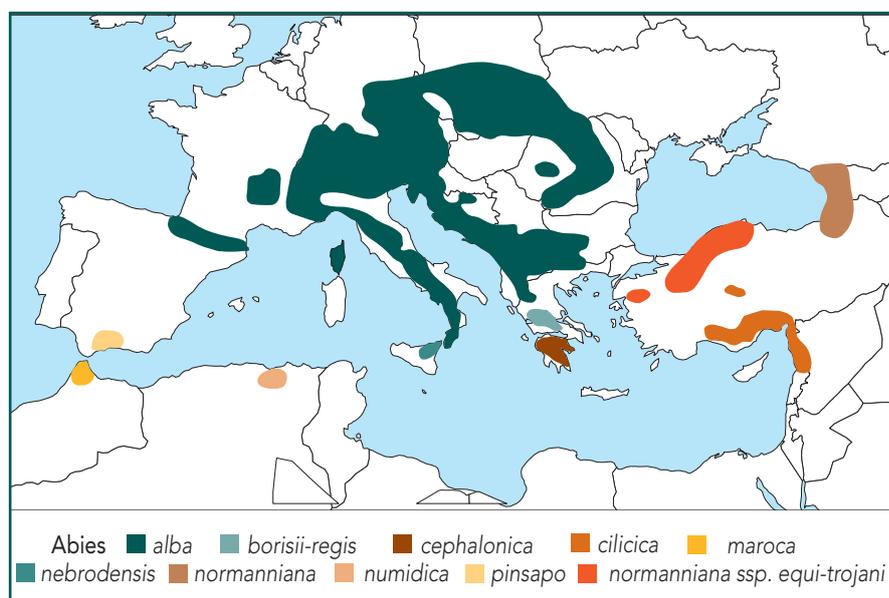


Fig. 1 : carte sommaire de répartition des sapins méditerranéens

si plusieurs d'entre eux sont apparus à la fin du 19<sup>e</sup> siècle dans nos forêts à l'occasion des boisements RTM (restauration des terrains en montagne).

C'est surtout dans la partie méridionale de la France que l'on peut

les observer, même si les premières introductions eurent lieu principalement en région parisienne et dans l'arboretum des Barres (Loiret). On les trouve en arbres isolés aux carrefours de forêts souvent domaniales, en petits effectifs dans des

#### Qu'entend-on par « sapin méditerranéen » ?

Le groupe des « sapins méditerranéens » regroupe 10 taxons (voir tableau), dont une sous-espèce et une variété, selon une nomenclature internationalement reconnue. Ce sont des espèces montagnardes réparties sur la quasi-totalité du pourtour méditerranéen, à l'exception d'une zone comprise entre la Tunisie et le sud du Liban, en populations souvent disjointes dispersées (notamment *A. pinsapo*, *A. pinsapo* var. *marocana* et *A. numidica*).

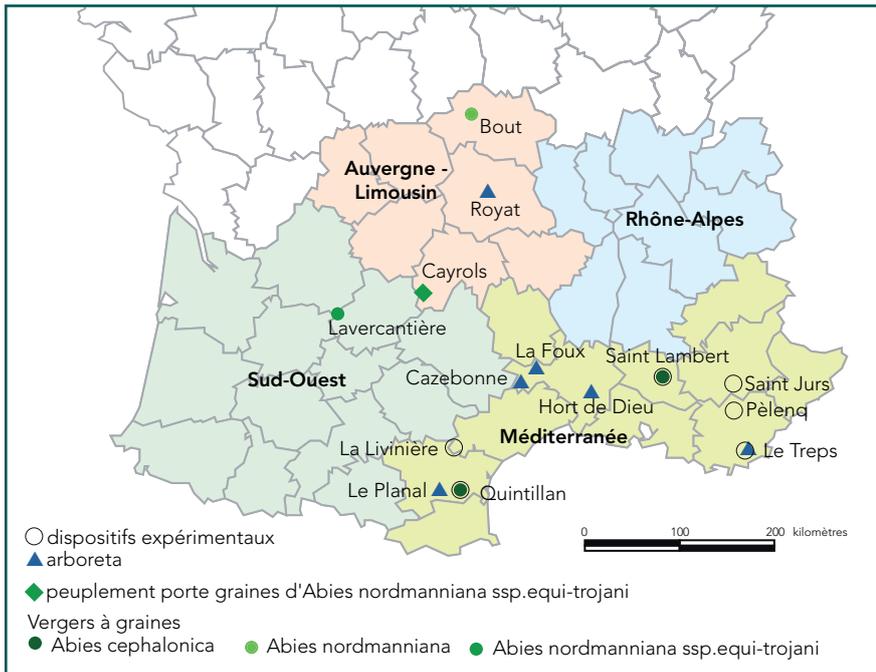


Fig. 2 : carte des vergers à graines et sites du dispositif expérimental « sapins méditerranéens »

arboreta (notamment à proximité de l'Aigoual ainsi que dans les arboreta dits d'élimination comme celui du Trep, dans les Maures). Depuis 1970 (puis 1981 pour la 2<sup>e</sup> tranche), ils font l'objet du dispositif expérimental « sapins méditerranéens » suivi par l'INRA d'Avignon et la direction territoriale ONF Méditerranée. Enfin, trois vergers à graines leur sont aussi consacrés (figure 2).

### Aptitudes écologiques et aire d'utilisation potentielle

Les sapins méditerranéens non autochtones présentent en France un réel intérêt dans la zone méditerranéenne *sensu largo*, à partir de l'étage supra méditerranéen (de 500 à 900 m d'altitude sur le continent et 600 à 1 300 m en Corse) comprenant la chênaie pubescente et la hêtraie thermophile. En dehors de ce secteur géographique, ils pourraient même concerner les zones de limite écologique du sapin pectiné en termes de sécheresse, d'hygrométrie et d'altitude.

La plupart d'entre eux sont parfaitement rustiques vis-à-vis du froid (sauf quelques exceptions au niveau de la sensibilité aux gelées tardives) et pareillement aptes à supporter les fortes chaleurs estivales dont les excès, selon les prévisions des météorologues, devraient être accrus et répétés, y compris dans les montagnes méditerranéennes où les amplitudes thermiques sur l'année sont déjà assez larges. De plus, ils sont tous capables de se développer convenablement sur sols calcaires.

En termes de croissance ils se montrent vigoureux et, jusqu'à la fin 2007, nous n'avons pas enregistré de traumatismes consécutifs à l'été 2003, qui fait référence pour la chaleur excessive et le taux d'hygrométrie très faible, ou aux saisons sèches qui ont suivi. On peut aussi ajouter que le houppier du sapin, très ombrageant, limite le sous-étage et par conséquent le risque de propagation des incendies.

De surcroît, la qualité du bois des sapins méditerranéens en général est comparable à celle du sapin

pectiné, et ils pourraient donc constituer une intéressante perspective dans les montagnes méditerranéennes ou du sud du massif central, à condition de **respecter deux règles, liées au risque particulier d'hybridation incontrôlée** :

- ne pas les installer en présence de populations autochtones de sapin pectiné ;
- ne pas faire cohabiter plus d'une espèce de sapin méditerranéen sur un même site ou à portée de pollen d'autres espèces sachant que la « distance de sécurité » reste à évaluer précisément (seule donnée aujourd'hui connue sur ce sujet, la moitié du pollen d'*Abies alba* tombe à moins de 30 m de l'arbre émetteur : B. Fady comm. pers.).

### Des arbres difficiles à identifier

Dans les dispositifs expérimentaux, le doute éventuel sur l'identification des sujets est dissipé par l'origine des graines et les protocoles rigoureux de récolte, de culture et d'installation. Mais les sujets isolés ou présents dans des arboreta posent souvent des problèmes de détermination qui peuvent s'expliquer comme suit.

■ Ces espèces ont une lointaine origine commune et ont ensuite évolué séparément, souvent à l'intérieur d'aires restreintes. On retrouve alors évidemment des caractères morphologiques similaires, notamment au niveau des cônes et des rameaux.

■ La variabilité intraspécifique est très élevée. Elle peut être parfois liée aux hybridations dans les zones d'introggression de deux espèces (*A. cephalonica* avec *A. borisii-regis*). Le recours à l'ADN est alors un moyen de discrimination : les travaux de Ziegenhagen et al. (2005) ont montré qu'il était possible de séparer quelques groupes de sapins sur la base d'un gène porté par l'ADN mitochondrial.

Taxon	Insertion des feuilles sur le rameau	Longueur des feuilles	Apex de la feuille* (rameau stérile)	Position des stomates face sup.*	Nature des bourgeons*	Longueur du cône	Aspect des bractées du cône*	Couleur des cônes avant maturité	Couleur et pubescence des rameaux
<i>Abies alba</i> Mill.	disposées en peigne, en V très ouvert sur le dessus	15 à 30 mm	échancré	non présentes	non résineux	10 à 16 cm	saillantes et réfléchies	vert brunâtre puis brun	courte pubescence roussâtre à gris foncé
<i>Abies borisii-regis</i> Mattf.	disposées en V sur le dessus	20 à 30 mm	aigu, occasionnellement arrondi ou échancré	non présent ou discrètes vers l'apex	non ou peu résineux	11 à 21 cm	saillantes et réfléchies	vert ou vert pourpré puis brun violacé	brun jaunâtre pâle, très pubescent puis un peu moins
<i>Abies cephalonica</i> Loudon	en écouvillon ou demi-écouvillon	15 à 35 mm	effilé, piquant	très peu vers l'apex	empâté de résine	12 à 16 cm	saillantes et habituellement réfléchies	vert puis brun, brun rougeâtre ou violacé	brun jaunâtre ou brun rougeâtre, glabre
<i>Abies cilicica</i> Carr.	en brosse un peu rabattue sans cacher le rameau	20 à 45 mm	arrondi ou un peu échancré	non présent ou discrètes	non ou peu résineux	15 à 30 cm	incluses	vert puis brun rougeâtre	verdâtre, brun jaunâtre ou brun grisâtre, glabre ou glabrescent
<i>Abies nebrodensis</i> Mattei	en brosse dressée, perpendiculaire au rameau pouvant former un V dessus	10 à 22 mm	mucroné, piquant ou arrondi / échancré	très peu vers l'apex	résineux	8 à 20 cm	saillantes et réfléchies	vert ou jaune vert puis brun	gris jaunâtre ou brun jaunâtre, glabre rapidement
<i>Abies nordmanniana</i> Spach	en brosse rabattue vers l'avant en cachant le rameau	15 à 35 mm	arrondi ou échancré	non présent	non résineux	12 à 20 cm	saillantes et réfléchies (en général assez petites)	vert jaunâtre puis brun violacé ou vert pourpré	brun verdâtre ou gris verdâtre puis brun clair, glabrescent puis glabre rapidement mais parfois pubescent le premier hiver
<i>Abies nordmanniana</i> ssp. <i>equi-trojadi</i> Coode & Cullen	en brosse plus ou moins rabattue vers l'avant en cachant le rameau	15 à 40 mm	arrondi ou échancré	vers l'apex	résineux	15 à 20 cm	saillantes et réfléchies (assez grosses)	vert rougeâtre ou vert jaunâtre puis brun violacé	brun rougeâtre, glabre
<i>Abies numidica</i> De Lannoy	en demi-écouvillon ou écouvillon	10 à 25 mm	arrondi ou échancré	vers l'apex	non résineux	12 à 20 cm	incluses	vert jaunâtre puis brun rougeâtre ou brun gris	brun ou brun rougeâtre, glabre
<i>Abies pinsapo</i> Boiss.	en écouvillon	8 à 20 mm	non ou un peu piquant	discontinue	très résineux (entièrement empâté de résine)	8 à 16 cm	incluses	vert jaunâtre puis brun pourpre et un peu glauque,	brun rougeâtre, glabre
<i>Abies pinsapo</i> var. <i>marocana</i> Ceballos & Bolano	en écouvillon	10 à 20 mm	un peu piquant ou très piquants sur jeunes et à l'ombre	surtout vers l'apex	empâté de résine mais écailles libres visibles	10 à 22 cm	incluses	vert jaunâtre puis brun pourpre et nettement glauque	brun rougeâtre, glabre

\* caractères les plus déterminants

Tab. 1 : critères de détermination des différents sapins méditerranéens

■ Comme pour la grande majorité des taxons du genre *Abies*, les fructifications apparaissent dans la partie sommitale de l'arbre et, sachant que les cônes se désarticulent à maturité, les prélever pour déterminer l'espèce est quelque peu problématique. Avec un peu d'habitude on peut néanmoins évaluer la nature des bractées en ramassant des écailles tombées au sol... ou en s'équipant de jumelles !

■ Enfin, tous ces sapins ont la faculté de s'hybrider très facilement entre eux. Ainsi, dans les massifs forestiers, comprenant des arboreta, où plusieurs espèces ont été plantées à des fins ornementales ou forestières, le gestionnaire, ignorant ces questions d'hybridation et les risques de pollution génétique, a longtemps laissé s'installer les régénérations. On se retrouve donc aujourd'hui face à une foule d'hybrides spontanés, quand il ne s'agit pas d'individus plantés sous une identité précise mais dont les semences ont été récoltées encore récemment en arboretum (lieu éminemment propice aux hybridations) !

### Les critères d'identification

Les descriptions qui suivent concernent les 10 taxons qui composent le groupe des sapins méditerranéens et incluent donc le sapin pectiné, à titre de comparaison notamment. L'identification précise est ardue, et les caractères les plus déterminants sont les suivants : disposition et forme de l'apex (extrémité) de la feuille, lequel peut être piquant et aigu ou échancré voire arrondi ; présence ou non de stomates sur la face supérieure des feuilles (il y en a toujours en face inférieure) ; présence, plus ou moins abondante, de résine sur les bourgeons ; morphologie des bractées des cônes, donnant un aspect « lisse » ou « hérissé ». On peut y ajouter éventuellement la couleur des rameaux de l'année ; les autres

éléments du tableau sont utiles pour confirmation - impression visuelle d'ensemble - mais à ne pas utiliser en priorité.

L'écorce et le port, sauf éventuellement chez les vieux *Abies numidica*, ne sont pas des critères fiables. Les observations relatives aux rameaux (y compris insertion des feuilles et observation des feuilles elles-mêmes) ne doivent être effectuées ni à l'ombre ni en partie sommitale de l'arbre, là où se trouvent habituellement les feuilles des pousses fructifères. Celles-ci sont bien souvent piquantes mêmes pour les espèces dont les feuilles sont décrites comme ne l'étant pas ! Enfin, les individus observés présentant des caractères morphologiques très variés doivent bien évidemment faire pencher vers l'hypothèse de l'hybridation qui est, rappelons-le, extrêmement courante.

### Description des sapins méditerranéens

Sont brièvement évoqués, pour chaque espèce : l'aire naturelle de répartition et son évolution, les traits caractéristiques (ou différences caractéristiques avec une espèce d'apparence très proche), les peuplements remarquables en France et les peuplements ressources (peuplements porte-graines, vergers à graines), ainsi que le comportement et les particularités autécologiques (vigueur, sensibilité au gel...). On ne trouvera pas ici de données chiffrées issues de tests de comparaison et autres dispositifs expérimentaux (pour cela, voir B. Fady et J. Pommery, 1998).

***Abies alba* Mill.** : le sapin pectiné occupe une aire vaste et pas exclusivement méditerranéenne, ce qui constitue une exception chez les sapins méditerranéens. Elle va des Pyrénées aux Monts Rhodope (Bulgarie) en passant par les Carpates, la Corse et le sud de l'Italie entre 400 et 2 000 m d'alti-

tude. L'espèce se caractérise par ses rameaux finement pubescents, ses feuilles non piquantes disposées en peigne de part et d'autre du rameau et ses cônes à bractées saillantes.

En France méditerranéenne, il est conseillé de visiter les belles populations méridionales de la forêt du Riassesse, dans l'Aude, situées en basse altitude (entre 560 et 850 m) et globalement soumises à des conditions proches de celles des autres sapins méditerranéens.

***Abies cephalonica* Loudon** : le sapin de Grèce (ou de Céphalonie) est endémique des montagnes calcaires de ce pays entre 700 et 1 800 m et son aire s'étendait, avant les grands incendies de juillet 2007 (faisant suite à ceux de 1972), sur 229 000 hectares.

C'est l'espèce méditerranéenne dont les feuilles sont les plus piquantes. Elles sont effilées et parfois porteuses de quelques rares bribes de stomates face supérieure. Ses bourgeons sont fortement résineux, ses rameaux sont jaunâtres ou rougeâtres et ses cônes portent des bractées nettement saillantes.

On peut en admirer de superbes spécimens dans l'arboretum de la Foux, en forêt domaniale de l'Aigoual. Ce sapin est assez fortement représenté dans les dispositifs expérimentaux de l'INRA comme celui situé en forêt domaniale de Saint Lambert (Vaucluse), où se trouve aussi l'un des deux vergers à graines le concernant, l'autre étant à Quintillan des Corbières, dans l'Aude. Il traîne, depuis son introduction, une réputation de sensibilité aux gelées printanières, mais des essais ont permis avec succès de tester sa vigueur, de constater sa forte croissance initiale et de repérer deux provenances du Péloponnèse à débourrement tardif.



Feuillage d'*Abies cephalonica*



Cône d'*Abies nordmanniana* ssp. equi-trojani



Feuillage d'*Abies nordmanniana*

***Abies nordmanniana* Spach** : ce sapin est originaire du nord de la Turquie et de l'Ouest du massif caucasien (Abkhazie, Géorgie) sur sols d'origine calcaire où il forme de vastes peuplements, associé à *Fagus orientalis* et *Picea orientalis*, entre 900 et 2 100 m.

Ses feuilles non piquantes sont disposées en brosse rabattue vers l'avant et cachent assez bien le

rameau. Les bractées du cône, saillantes, sont identiques à celles d'*Abies alba*. Il débourre un peu plus tard que notre sapin autochtone et supporte davantage les sécheresses estivales.

Il est assez fréquent dans les forêts du Massif Central, avec notamment un verger à graines à Bout (Allier). Il est devenu populaire en France du fait de nombreux reboi-

sements à des altitudes souvent plus basses que ce qui convient à *Abies alba* et de son emploi récent comme arbre de Noël.

***Abies nordmanniana* ssp. equi-trojani Coode & Cullen** : connu plutôt sous le nom d'*Abies bornmuelleriana*, il est parfois considéré comme un hybride naturel fixé entre *Abies cephalonica* et *Abies nordmanniana*. Originaire des montagnes calcaires du nord-ouest de la Turquie entre 1 100 et 1 800 m, il se différencie du précédent par ses rameaux de l'année brun rougeâtre, ses feuilles davantage relevées sur le dessus du rameau avec des lignes stomatiques à l'apex de la face supérieure ainsi que ses bourgeons résineux (ce qui empêche généralement de le déterminer précisément entre le printemps et le milieu de l'été) ; son débourrement est encore plus tardif et sa tolérance à la chaleur est également meilleure. À l'instar d'*A. nordmanniana*, il peut tout à fait être cultivé comme arbre de Noël.

Il existe un peuplement porte-graines (issu de récoltes effectuées

T. Lamant, ONF

T. Lamant, ONF

T. Lamant, ONF



T. Lamant, ONF

Cône d'Abies pinsapo

en Turquie en 1967) à Cayrols, dans le sud-ouest du Cantal, ainsi qu'un verger à graines à La Vercantière dans le Lot. Cette espèce fait l'objet de suivis dans des plantations comparatives d'espèces et de provenances de l'INRA et de l'ONF. Les résultats, en termes de croissance - au moins initiale - par rapport à *A. nordmanniana* et de comportement vis-à-vis des gelées tardives et de la sécheresse estivale, en font une espèce particulièrement prometteuse, même hors secteur méditerranéen.

**Abies pinsapo Boiss.** : le sapin d'Espagne est endémique de la Sierra de Grazalema (province de Cadix), de la Sierra Bermeja et de la Sierra de Las Nieves (province de Malaga) en Andalousie ; son aire n'excède pas 50 km<sup>2</sup> et se limite à 3 sites et 8 populations situées entre 1 000 et 2 000 m, et l'espèce est menacée par l'extension de projets touristiques de luxe puisant fortement dans les réserves en eau du sol.

On le reconnaît facilement à ses feuilles verdâtres à bleutées dont



T. Lamant, ONF

Feuillage d'Abies pinsapo

l'aspect fait penser à de la matière plastique. Les feuilles, parfois piquantes, sont disposées en écouvillon (tout autour du rameau) et leur rigidité permet parfaitement de s'en servir comme d'une brosse à cheveux. Elles portent des lignes discontinues de stomates à la face supérieure. Les



T. Lamant, ONF

Feuillage d'Abies numidica

bourgeons sont résineux. Les cônes à bractées incluses sont assez semblables à ceux d'*Abies numidica*.

Il a été abondamment planté en arboretum et en sujets isolés en forêt domaniale à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. On peut aussi en admirer de beaux et vieux spécimens dans bon nombre de parcs en région Languedoc-Roussillon et notamment un sujet plus que centenaire à l'arboretum du Planal (Aude). Il a aussi été installé en dispositifs expérimentaux par l'INRA. Il peut subir des dommages (gélivures, bris de branches) lors d'hivers très rudes comme ceux de 1985 et 1986. Inversement, sa tolérance à la chaleur et à la sécheresse est remarquable comme c'est le cas chez *A. numidica* et *A. cephalonica*.

**Abies numidica De Lannoy** : le sapin de Numidie ne se rencontre qu'en petites populations dans les montagnes kabyles en Algérie (Monts Babor et Tababor) entre 1 300 et 2 000 m. La totalité de son aire naturelle ne couvre qu'environ



T. Lamant, ONF

Port colonnaire d'un vieil Abies numidica



T. Lamant, ONF

Feuillage d'*Abies cilicica*



T. Lamant, ONF

Feuillage d'*Abies borisii-regis*

250 hectares et il est gravement menacé par l'exploitation sauvage et surtout le pâturage qui détruit les régénérations d'arbres de plus en plus vieillissants et donc de moins en moins fructifères.

On le reconnaît à ses feuilles assez courtes, disposées en écouvillon (ou demi-écouvillon) et dotées de stomates bien visibles à l'extrémité de la face supérieure des feuilles. Ses bourgeons ne sont pas résineux et les bractées de ses cônes sont incluses. Bien que de croissance initiale un peu plus lente que les autres, c'est probablement l'un des sapins méditerranéens les plus intéressants, car de loin l'un des plus résistants au froid et celui dont le débourrement est le plus nettement tardif. Habituellement, son port est nettement colonnaire, montrant son adaptation à l'enneigement.

Assez présent dans les collections botaniques françaises, on peut notamment signaler un beau peuplement de 0,5 ha installé en 1943 dans l'arboretum de Royat (Puy de Dôme), ainsi que ça et là des sujets centenaires, en particulier dans les arboreta de Cazebonne et de l'Hort de Dieu (Gard) ainsi bien entendu que dans celui des Barres. Il est plus rare que les trois espèces précé-

dentes dans le dispositif « sapins méditerranéens » de l'INRA : la difficulté d'obtenir de la semence depuis 1992 (début des troubles politiques qui rendent les montagnes kabyles périlleuses encore aujourd'hui) explique en grande partie cet état de fait.

**Les espèces qui suivent** ne sont pas testées à ce jour en dispositifs expérimentaux dans notre pays, mais sont néanmoins présentes — ou l'ont été — dans les arboreta gérés par l'ONF.

***Abies cilicica* Carr.** : le sapin de Cilicie est originaire du Taurus en Turquie (en compagnie de *Cedrus libani*), du nord du Liban et du nord-ouest de la Syrie entre 1 200 et 2 100 m ce qui constitue l'aire la plus vaste de ce groupe de sapins après celle d'*A. alba*. C'est l'espèce méditerranéenne qui possède les feuilles les plus longues (jusqu'à 4,5 cm), de surcroît non piquantes.

***Abies borisii-regis* Mattfeld** : le sapin du Roi Boris est habituellement considéré comme un hybride fixé entre le sapin pecciné et celui de Céphalonie et son aire est contiguë à celle d'*A. cephalonica* au nord de la Grèce et à celle d'*A. alba* en Bulgarie.

On le rencontre en Macédoine et dans la partie frontalière contiguë en Grèce ainsi que dans les Monts Rhodope entre 700 et 1 800 m. Rare sur notre territoire, on peut néanmoins observer de jeunes sujets au sylvetum du Clos Gaillard, en forêt communale de Nîmes.

***Abies pinsapo* var. *marocana* Ceballos & Bolano** : cette forme géographique du sapin andalou se différencie principalement par ses bourgeons très empâtés de résine (les pointes des écailles s'en échappent alors qu'ils sont complètement empâtés chez *A. pinsapo*). On ne le rencontre qu'à l'extrême nord du Maroc, dans le Rif (Jebel Tissouka et Jebel Tazaot), entre 1 200 et 2 100 m sur substrat calcaire. Les populations du Mont Tazaot, estimées à 2 500 arbres adultes, sont même reconnues par certains botanistes comme un taxon séparé (*A. pinsapo* var. *tazaotana* Pourtet). *Abies marocana* est très rare hors de ses frontières et pas toujours correctement identifié.

***Abies nebrodensis* Mattei** : le sapin de Sicile est le plus rare conifère européen et l'une des espèces emblématiques pour les-



Feuillage d'*Abies nebrodensis*

T. Lamant, ONF

## Bibliographie

ARBEZ M., 1997. Les ressources génétiques forestières en France. Tome 1 : les conifères. Paris : INRA et BRG. 236 p.

CALLEN G., 1977. Les conifères cultivés en Europe. Vol. 1 et 2. Paris : Baillière. 903 p.

FADY B., 1993. Caractéristiques écologiques et sylvicoles des sapins de Grèce dans leur aire naturelle et en plantation dans le sud de la France : perspectives pour le reboisement en région méditerranéenne. Revue Forestière Française, vol. 45, n° 2, pp. 119-133

FADY B., POMMERY J., 1998. Adaptation et diversité génétique des sapins méditerranéens : bilan des tests de provenance de sapins de Céphalonie dans le sud de la France et perspectives en matière d'hybridation. Forêt Méditerranéenne, tome 19, n°2, pp. 117-123

HOCH J., 2006. Le sapin des Nébroses, le plus rare conifère européen. Revue de l'Association des parcs botaniques de France, n°42, pp. 52-59

DEBAZAC E.F. 1977. Manuel des conifères. Nancy : ENGREF. 172 p.

FARJON A. 1998. World checklist and bibliography of conifers. Kew : Royal Botanic gardens. 316 p.

ZIEGENHAGEN B. *et al.*, 2005. Differentiating groups of *Abies* species with a simple molecular marker. *Silvae Genetica*, vol. 54, n° 3, pp. 123-126

Consulter aussi les sites :  
[www.conifers.org](http://www.conifers.org)  
[www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)

quelles une partie du patrimoine génétique est maintenue en arbo-retum. Il ne reste que 29 individus dans la nature dont 23 sont fructifères, principalement sur le Mont Scalone entre 1 374 et 1 690 m. Victime de déboisements colossaux et d'incendies, il est aussi susceptible d'être pollué génétiquement par la présence sur cette île d'autres sapins plantés à des fins économiques comme *A. alba* et *A. cephalonica*. Cette espèce est notamment visible dans les arboreta nationaux des Barres et de Chèvreleoup.

### Pour conclure

Les essais concernant les principales espèces de sapins méditerranéens en France sont encore récents mais commencent à apporter des résultats. Ces sapins sont au moins adaptés à nos montagnes méditerranéennes et pourraient à l'avenir accompagner le cèdre de l'Atlas dans le contexte de la réflexion sur les changements climatiques.

Mais l'implantation de telles espèces se heurte au problème de l'hybridation et des risques subséquents de pollution génétique. On peut s'en affranchir en ne plantant pas d'espèces exogènes à proxi-

mité de populations de sapin pectiné ; tant que les distances de pollinisation sont mal connues, cela revient à ne pas les planter dans le même massif forestier (en plaine) ou dans la même vallée (en montagne).

Enfin, l'installation de sapins méditerranéens s'inscrit dans le rôle, parmi d'autres, de conservation *ex situ* des arboreta, à condition là aussi de ne pas faire cohabiter différentes espèces dans un périmètre trop restreint ou bien de développer l'installation de vergers à graines. Cela permettrait de sauvegarder une partie du patrimoine génétique de certaines espèces particulièrement menacées au vu de leur aire naturelle restreinte et des pressions environnementales qu'elles y subissent.

**Thierry LAMANT**

Animateur du réseau arboreta de l'ONF  
[thierry.lamant@onf.fr](mailto:thierry.lamant@onf.fr)

### Remerciements

L'auteur remercie Guillaume Plas, Bruno Fady, Jean Hoch, Frédéric Bauny, Keith Rushforth, Aljos Farjon, Michael Frankis et Francisco Vazquez-Pardo.



*Port d'Abies alba en FD du Riالسسه (11)*

## à suivre

n° 20 - printemps 2008

**Prochain dossier : la forêt et la lutte contre le changement climatique**

parution : mai 2008

Ce dossier rappellera le cadre « politique » international et les principes et mécanismes financiers qui en découlent, avant de s'intéresser plus particulièrement aux questions en débat sur le rôle de la forêt et aux projets conduits par l'ONF.

**Retrouvez RenDez-Vous techniques sur intraforêt**

Tous les textes de ce numéro sont accessibles au format PDF dans la rubrique qui lui est désormais consacré 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  
Christine Micheneau  
Tél. : 01 60 74 92 25  
Courriel : rdvt@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

