

t

RenDez-Vous techniques

n° 15 - hiver 2007

patrimoine
sylviculture
progrès

connaissances

économie

forêts et société

environnement

biodiversité

gestion durable



Dossier
p.13

Le bois-énergie

Renécofor : évolution des dépôts acides

p.3



Rendez-vous techniques

Directeur de la publication

Jacques Valeix

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Joseph Behaghel, Yves Birot, Jean-Marc Brézard, François Chièze, Jean-Luc Dunoyer, Didier François, Xavier Gauquelin, Claude Jaillet, Olivier James, Pierre Leroy, Alain Macaire, Patrice Mengin-Lecreulx, Rémy Metz, Frédéric Mortier, Jérôme Piat, Thierry Sardin, Jacques Valeix

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

page de couverture

En haut : A. Richter

En bas : E. Ulrich, ONF

Page d'ouverture de dossier : A. Richter, P. Goupil ("médaillon" du milieu)

Périodicité

4 numéros par an, et un hors série

Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par abonnement auprès de la cellule de documentation

technique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtech-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

prix au numéro : n° ordinaire : 10 € ; hors série : 20 €

abonnement : 35 € : 1 an = 4 numéros ordinaires

(prix du hors série pour les abonnés = 15 €)

Dépôt légal : mars 2007

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

s o m m a i r e

n° 15 - hiver 2007

- 3 connaissances
Évolution de l'acidité, des concentrations de soufre et de l'azote dans les précipitations analysées dans le réseau Renécofor
par Erwin Ulrich, Marc Lanier, Luc Croisé
- 9 connaissances
Comparaison des dépôts atmosphériques en soufre sous pinède et hêtraie en forêt domaniale de Brotonne – Un projet Renécofor
par Sébastien Cecchini, Erwin Ulrich, Nicolas Barry
- 13 **dossier pratiques**
Le bois énergie
- 56 connaissances
Bilan de quatre arboreta de comportement en Centre-Ouest : quels résultats ?
par Sandrine Verger
- 64 connaissances
Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat : ce que Renécofor nous a appris
par François Lebourgeois

éditorial

Pour cette édition, nos Rendez-vous techniques consacrent leur dossier à un thème de saison : le bois-énergie, sujet d'une grande actualité, à la fois sociétale, environnementale, économique et technique.

Face au changement climatique et au tarissement annoncé des ressources fossiles, l'Union Européenne précise ainsi ses engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre mais aussi, tout récemment, à l'occasion du dernier sommet des chefs d'Etat, les premières grandes lignes de sa politique énergétique.

Le contexte européen et le contexte national, compte tenu en effet de l'importance et de l'augmentation continue des ressources forestières françaises, s'avèrent donc particulièrement propices au développement de la filière « bois-énergie », tendance de fond qui dépasse sans doute un simple effet de mode.

Encore faut-il bien intégrer cette remarquable opportunité dans les processus de gestion durable des forêts : en estimant par exemple encore plus précisément les ressources forestières disponibles, en raisonnant les prélèvements selon les caractéristiques et la sensibilité des sols ou encore en adaptant les modalités d'exploitation aux particularités du produit recherché.

C'est tout l'enjeu de ce dossier : donner aux forestiers un éclairage lucide, mesuré et pratique sur une nouvelle filière qui influence déjà ou fera évoluer leurs pratiques de gestion.

Ce numéro présente par ailleurs les nouveaux enseignements du réseau « Renecofor », qui célèbre cette année ses 15 ans d'existence et qui en fera le bilan à l'occasion du colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers », organisé les 9, 10 et 11 mai 2007 à Beaune.

Le Directeur technique et commercial bois
Jacques VALEIX

Évolution de l'acidité, des concentrations de soufre et de l'azote dans les précipitations analysées dans le réseau Renécofor (période 1993 à 2005)

Après 15 ans d'existence, le réseau Renécofor permet de dresser un bilan encourageant en ce qui concerne l'acidité des précipitations et les dépôts soufrés. Pour autant, la vigilance ne doit pas faiblir : les apports azotés et leurs conséquences à long terme sur les écosystèmes restent préoccupants ; par ailleurs les émissions des pays dits émergents sont en augmentation vertigineuse.

Le suivi général de la qualité des précipitations est un des volets importants de la surveillance de la qualité de l'air en France et en Europe. Ce suivi est devenu incontournable avec l'impact important des émissions industrielles, automobiles, domestiques et agricoles. Ces émissions ont augmenté très fortement entre les années 60 et le début des années 80 (voir Croisé et al, 2005, *Rendez-vous techniques* n° 7). Depuis, afin d'éviter des effets néfastes à long terme sur la population et les écosystèmes, d'importants efforts ont été accomplis dans les limites des possibilités techniques et financières. Aujourd'hui les émissions de soufre ne sont plus que de 30 à 40 % de leurs valeurs des années 80. Mais ce n'est pas le cas pour toutes les sources, notamment celles qui émettent de l'azote...

En France, il n'existe que deux réseaux nationaux analysant en continu depuis 1993 la qualité des précipitations : le réseau Mera (Mesure des retombées atmosphériques), géré par l'École des Mines de Douai pour l'Ademe* et le sous-réseau Cataenat* du réseau Renécofor*, qui s'intègre dans le suivi européen des écosystèmes

forestiers. Cataenat a également comme vocation de contribuer de manière précise à l'établissement des charges critiques* en composés acidifiants (acidité directe, sulfates, nitrates, ammonium), eutrophisants (surtout azote) ou conta-

minants (métaux lourds) sur les forêts.

Dans Cataenat, les précipitations* sont analysées depuis fin 1992 dans 27 des 102 sites du réseau Renécofor (figure 1) aussi bien

Dépôts

- Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- Cataenat : Charge acide totale d'origine atmosphérique sur les écosystèmes naturels terrestres
- Renécofor : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers
- Charge critique : c'est le seuil de contamination au-delà duquel des effets nocifs peuvent survenir ; voir article « Le suivi des dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers en France » par L. Croisé, E. Ulrich, P. Duplat et O. Jacquet, dans *Rendez-vous techniques* n° 7, pages 4-10, 2005.
- Les précipitations comprennent la pluie, la neige, la grêle, la rosée, le givre, les dépôts secs sous forme de gaz ou de particules.
- Dépôt annuel : c'est le produit de la concentration (en milligramme par litre = mg/L) et de la pluviosité (en millimètre, avec 1 mm = litre au m²). Il s'exprime donc en mg/L x mm = mg/m² (une concentration de 1 mg/L apporte 1 mg de dépôt par m² pour 1 mm de précipitation) ou, en divisant par 100, en kg/ha.
- Le pH est la valeur négative de l'exposant de la concentration des protons (H⁺). Par exemple un pH de 7 est égal à une concentration de protons de 10⁻⁷, et un pH de 4 est à 10⁻⁴.

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

- l'acidité, qui a longtemps été considérée comme l'élément phare de l'acidification des sols et comme la source du « dépérissement » des forêts en Europe (elle n'est selon nos connaissances actuelles qu'une petite partie des causes des problèmes phytosanitaires),

- le soufre, qui était alors souvent à l'origine de l'essentiel de cette acidité et qui est majoritairement d'origine industrielle et domestique et

- l'azote, dont l'effet eutrophisant s'est révélé être à l'origine de réactions lentes mais profondes des forêts.

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

Recueil des données

Les précipitations sont récoltées sur le terrain dans deux collecteurs hors couvert et une série de trois gouttières sous le couvert forestier (voir photos dans l'article suivant, Cecchini et al). Les résultats présentés ici regroupent les prélève-

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

Types de résultats présentés

Les mesures de concentrations dans les échantillons de précipitation ne sont pas directement comparables entre sites et entre

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

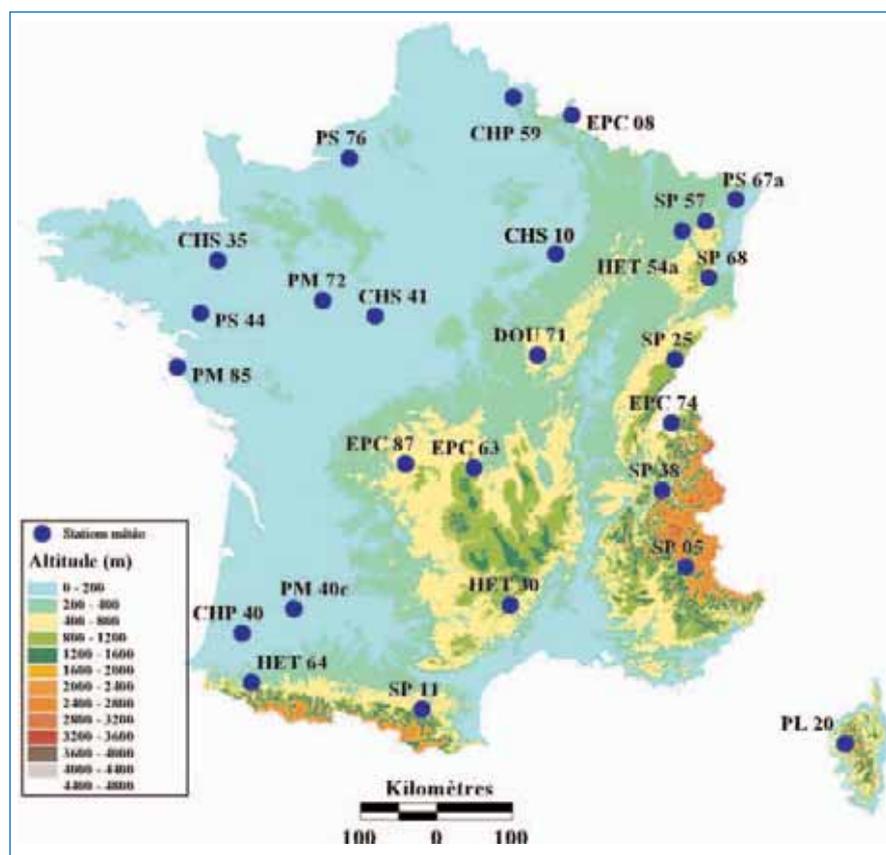


Fig. 1 : localisation des 27 sites de mesure des dépôts atmosphériques humides (sous-réseau Cataenat) faisant partie des 102 placettes permanentes d'observation du réseau Renécofor.

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

Diminution de l'acidité directe

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

Dans le réseau Cataenat, l'amplitude de pH est comprise entre 3 et 8 (figure 2a), mais 99 % des pH hors couvert et 98 % sous couvert forestier se situent entre 4,5 et 7. Les précipitations récoltées sous le couvert forestier sont moins

acides car elles profitent de l'effet neutralisant des poussières à contenu souvent basique (éléments terrigènes, comme le calcium et le magnésium). Le pH naturel, c'est-à-dire en prenant en compte l'équilibre de l'eau pure avec le CO_2 dans l'air (qui se dissout pour former dans l'eau l'acide carbonique, H_2CO_3) serait de 5,6. Un pH au-dessus de ce seuil, est le résultat d'un déplacement de l'équilibre dans l'eau en faveur des éléments basiques (par exemple magnésium, calcium, potassium, ammonium) qui témoignent entre autres d'apports sous forme de poussières ou d'eau de mer, près des côtes. Un pH en dessous de ce seuil résulte d'apports plus importants d'acides par exemple sulfuriques, nitriques ou organiques.

Dans la Figure 2b, seule la fréquence annuelle des pH plus acides que 5,5 et 4,5 a été présentée. Pour l'ensemble des précipitations à $pH < 5,5$, nous constatons deux périodes : la première entre 1993 et 1996, avec une fréquence annuelle de 56 à 74 % et la deuxième entre 1997 et 2005, où la fréquence reste toujours au-dessous de 60 %. Si l'on s'intéresse aux précipitations les plus acides ($pH < 4,5$, Figure 2b), une diminution relativement importante de leur fréquence est obser-

vée. Entre 1993 et 2005, la fréquence annuelle est tombée en plein champ de 5,5 % en 1993 à 1,1 % en 2005 et sous le couvert forestier de 15,2 % à 2,7 % respectivement.

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

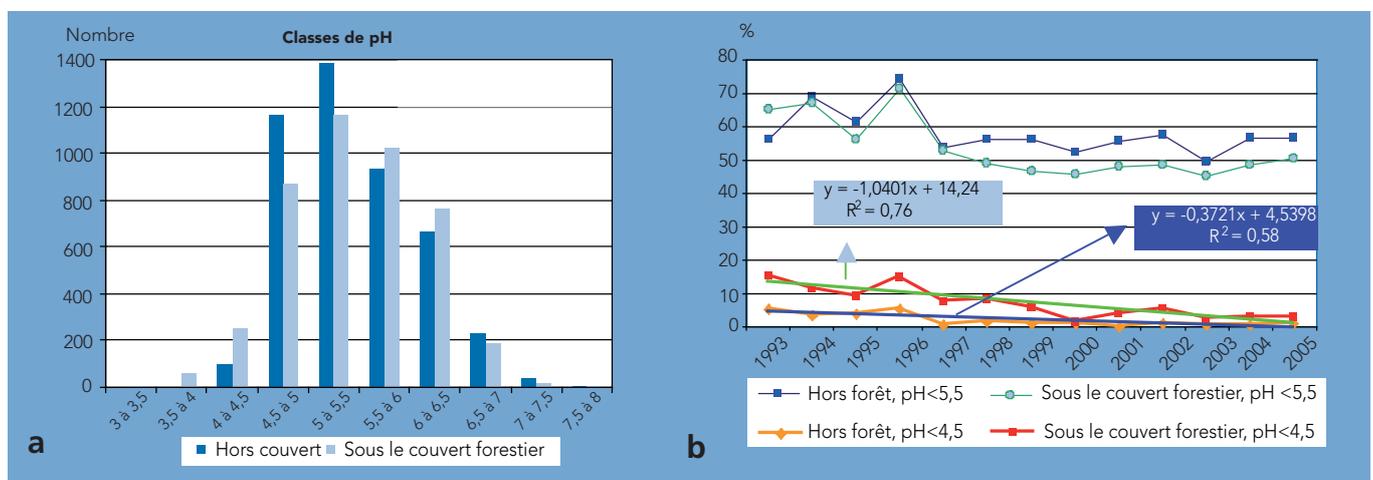


Fig. 2 : fréquence des classes de pH dans les précipitations récoltées hors (clairière) et sous couvert forestier pour la période 1993 à 2005 (a) et évolution annuelle du pourcentage d'échantillons ayant un pH < 5,5 et < 4,5 pour la même période (b)

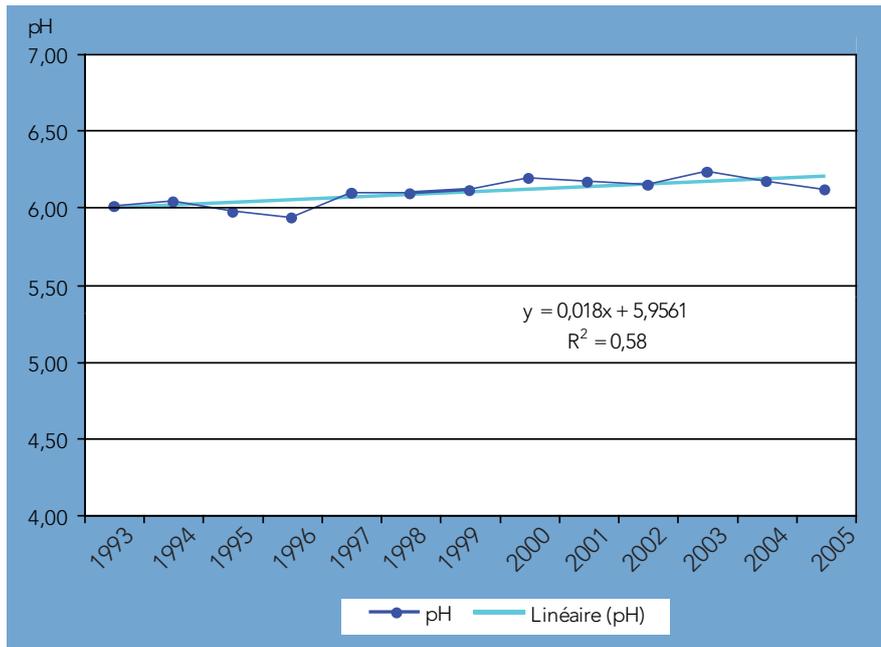


Fig. 3 : évolution de 1993 à 2005 du pH moyen « national » dans les précipitations en plein champ, pondéré par la pluviosité, des 27 sites Cataenet

Forte diminution des concentrations et dépôts de soufre

L'origine du soufre est double : surtout anthropique (raffinerie, etc. ; voir article suivant, Cecchini et al), mais également naturelle (essentiellement marine ou venant des volcans).

Au début des mesures, les concentrations moyennes du soufre sous forme de sulfate ($S-SO_4$) étaient respectivement de 0,71 et 1,77 mg/L en moyenne annuelle hors et sous couvert forestier (figure 4a et b). En fin de période, elles ont diminué hors couvert de 35 à 40 % et sous forêt de 45 à 53 %. Les dépôts annuels moyens des 27 sites diminuent encore plus fortement. Mais ici la pluviosité annuelle intervient et influence les valeurs, car en fin de période (2003 à 2005), la pluviosité a été bien en dessous de la moyenne des 10 premières années (figure 5). Ainsi hors couvert forestier les apports annuels passent de 8,0 kg de soufre par hectare et par an à 4,3 kg/ha/an (Figure 4c), ce qui représente une diminution de

47 %. Sous le couvert forestier, où évolution sylvicole et diminution de la pluviosité se conjuguent, la baisse est de 56 % en 13 ans (de 13,5 à 5,8 kg). Il est très probable que de futures années plus pluvieuses rééquilibreront ces valeurs un peu vers le haut, sans remettre en question le phénomène de la baisse généralisée, lié aux efforts importants de diminution des émissions. Ces observations sont encourageantes, car elles permettent d'envisager une amélioration de la fertilité des sols, si la diminution des dépôts de soufre se maintient ou si au moins les valeurs se stabilisent au niveau actuel. Elles représentent également un exemple remarquable des effets positifs des mesures de réduction des émissions de polluants dans l'atmosphère.

Stabilité des concentrations et dépôts de nitrate

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

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

Évolution contrastée de l'azote ammoniacal

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

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

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

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

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

Les valeurs en tant que telles ne disent rien sur l'effet eutrophisant que l'azote peut avoir. Mais si l'on considère que les écosystèmes forestiers reçoivent en moyenne au minimum 10 kg d'azote par hectare et par an (nitrate + ammonium) et en consomment par l'immobilisation dans les arbres et les autres plantes environ 5 kg/ha/an (il s'agit ici surtout de peuplements âgés, les jeunes peuplements pouvant immobiliser en moyenne selon l'essence et la station entre 5 et 15 kg d'azote/ha/an jusqu'à 40 ans environ), les 5 kg restant

sont en excès. En 20 ans, les peuplements auront ainsi cumulé 100 kg/ha d'azote. Cette quantité est très importante, car elle correspond à une vraie fertilisation azotée continue, non sans conséquence sur la composition floristique et le rythme de croissance des arbres. De nombreux projets scientifiques se préoccupent à ce jour des conséquences que l'azote a ou aura sur la faune, la flore et l'eau via l'accumulation dans les écosystèmes.

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



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

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

Conclusions

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

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

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

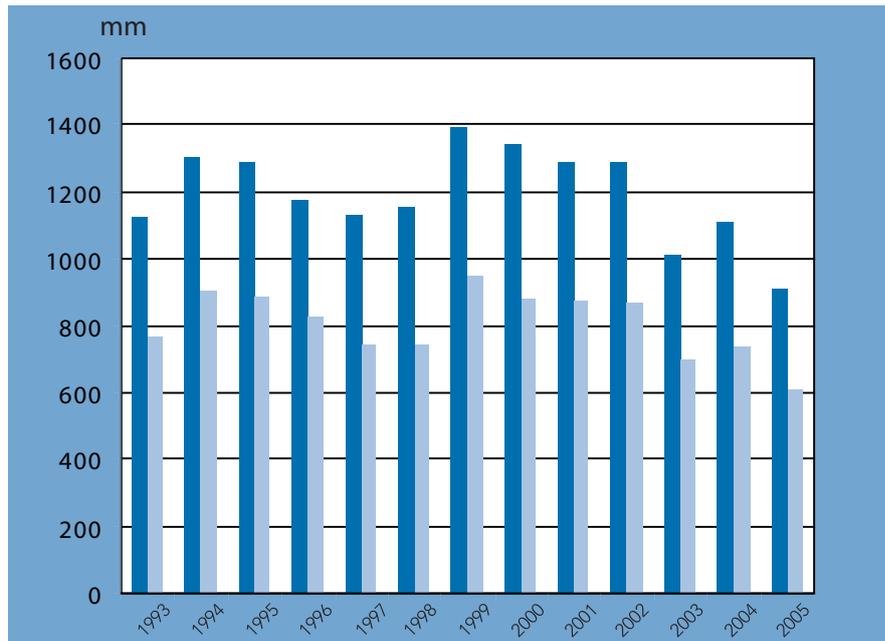


Fig. 5 : pluviosité moyenne annuelle des 27 sites en plein champ (bleu foncé) et sous le couvert forestier (bleu clair) en mm

tion semble réaliste, d'autant plus que les émissions à venir seront bien plus importantes que ce que nous avons connu de la part des États-Unis (facteur d'environ 4 de la population entre les deux pays).

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

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

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

Remerciements

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

Erwin ULRICH
Marc LANIER
Luc CROISE

ONF, direction technique
Département recherche
Réseau Renécofor
erwin.ulrich@onf.fr
marc.lanier@onf.fr
luc.croise@onf.fr

Comparaison des dépôts atmosphériques en soufre sous pinède et hêtraie en forêt domaniale de Brotonne

Un projet Renécofor

Après l'analyse de l'évolution des dépôts à l'article précédent, intéressons-nous au site particulier de la forêt domaniale de Brotonne, cerné par les émissions industrielles et triste champion des dépôts de soufre. Cette situation en fait un excellent laboratoire pour étudier l'influence des essences (ici pin sylvestre et hêtre) sur ces dépôts acidifiants.

Les études menées suite aux dépérissements forestiers des années 1980 en Europe ont permis de déceler les effets négatifs des dépôts atmosphériques acidifiants sur le fonctionnement des forêts. Lorsque ces dépôts retombent sur des sols pauvres et déjà acides, ils peuvent entraîner des dysfonctionnements dans l'alimentation en éléments minéraux des végétaux, en raison du lessivage du calcium, du magnésium et d'autres éléments nécessaires pour neutraliser les acides. Le soufre sous forme de sulfate est l'un de ces composés acidifiants.

Pourquoi s'intéresser à la forêt de Brotonne ?

La forêt de Brotonne est située entre les deux grands ports du Havre et de Rouen, qui assurent plus du tiers des échanges maritimes français. En raison de ces ports, la région dispose d'une activité industrielle très importante, concentrée autour de Rouen, de Port-Jérôme et du Havre (voir figure 1). Les secteurs industriels sont la pétrochimie, la construction automobile, le travail des métaux, la fabrication des engrais, la confection de papiers et électroniques, etc. Cette forte industrialisation est une source

importante de pollution atmosphérique.

En Haute-Normandie, le soufre est une préoccupation majeure ; il est issu principalement des raffineries (Total, Mobil, Esso et Shell raffinent ici le tiers du pétrole brut importé en France) et des installations de combustion (EDF possède au Havre l'une des plus puissantes centrales électriques thermiques de France). Selon les estimations du Citepa (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), 139 478 tonnes de soufre ont été émises en 1994 dans la région de Haute-Normandie, dont 94 % en Seine-Maritime. 54 % de ces rejets (soit 75 589 tonnes, en 1994) concernent les régions de Rouen et du Havre, sachant que l'extraction et le transfert d'énergie sont à l'origine de 82 % des émissions

(soit 62 333 tonnes en 1994). La forêt de Brotonne est soumise principalement aux vents dominants d'ouest qui amènent les polluants rejetés par les usines du Havre et de Port-Jérôme.

Lors des premiers traitements des données recueillies sur le réseau Renécofor (sous réseau Cataenat) (Ulrich et al., 1998), le site de Brotonne est remarqué par ses forts dépôts en soufre sous forêt (voir figure 2). Actuellement ces dépôts semblent se stabiliser autour de 15 kg/ha/an. Ce niveau reste élevé comparé à l'ensemble des 170 sites de mesures européens (Fischer et al., 2005).

Le site de mesure du réseau Renécofor

Depuis 1993, un dispositif Renécofor est implanté en forêt domaniale de



Fig. 1 : localisation des grands sites industriels, autour de la forêt de Brotonne

(points bleu = site de Brotonne, points rouges = sites industriels)

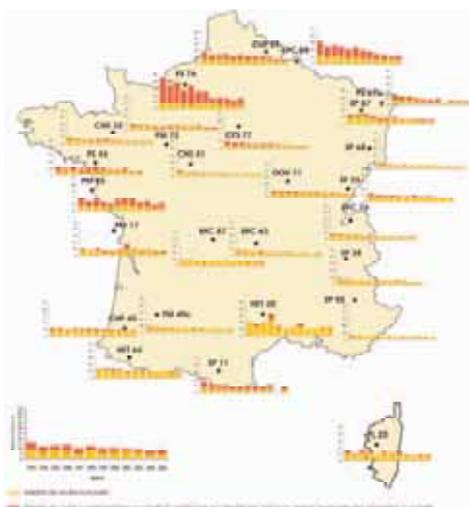


Fig. 2 : dépôts atmosphériques annuels de soufre

(en kg de sulfate par hectare et par an), hors forêt (jaune) et sous forêt (jaune + rouge) mesurés de 1993 à 2004 dans 27 sites du réseau Renécofor (PS 76 = site de Brotonne)

Brotonne à 45 km à l'est du Havre, à 70 m d'altitude. Il se situe dans un peuplement régulier de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de 55 ans, mélangé avec quelques rares hêtres (*Fagus sylvatica*) en sous étage, sur un sol brun lessivé à micropodzol, et reçoit en moyenne (de 1993 à 2004) 635 mm de pluie sous forêt par an. Les précipitations annuelles moyennes hors forêt sont de 960 mm. Sur ce site, les dépôts de soufre sont nettement plus élevés sous forêt qu'en plein découvert, car les houppiers retiennent les dépôts secs (aérosols et dépôts sous forme gazeuse) transportés par les vents d'ouest et lors des précipitations, ils sont lessivés et entraînés au sol. Le

sol déjà très appauvri reçoit des quantités importantes de composés acidifiants, susceptibles de réduire sa fertilité.

Pourquoi comparer les dépôts atmosphériques sous pinède et sous hêtraie ?

La forêt de Brotonne étant composée à environ 60 % de hêtres, la direction technique de l'ONF a souhaité mettre en place un programme de comparaison des dépôts atmosphériques en soufre sous pinède et sous hêtraie, afin de caractériser les différences du rôle de filtre du feuillage de ces deux essences. En été, le feuillage plus dense des hêtres peut retenir plus de dépôts secs, mais en hiver, une fois défeuillés, ils interceptent moins que les pins sylvestres qui gardent leurs aiguilles. Les dépôts sous couvert de hêtre ne seraient pas égaux à ceux enregistrés sous les pinèdes et la répartition saisonnière devrait être très différente.

L'expérimentation prévue pour cinq ans s'appuie sur les dispositifs de collecte des eaux de pluies hors et sous forêt du site de mesure Renécofor. Cette placette est équipée, pour la mesure hors forêt des précipitations, d'un pluviomètre à lecture directe et, pour la récolte des échantillons analysés, de deux collecteurs (voir photo). Sous forêt, la mesure et l'échantillonnage des pluiolessivats (= précipitations ayant traversé les cimes des arbres) sont effectués avec

L'origine des dépôts atmosphériques

Une faible part des dépôts atmosphériques est d'origine naturelle : biologique liée à l'activité des organismes vivants, marine (sodium, chlorure, magnésium, sulfate,...), terrigène par érosion (calcium, potassium, magnésium...) et volcanique (soufre...). Une partie, variable selon la situation géographique, provient de l'activité humaine. À partir de la seconde moitié du 19^e siècle l'industrialisation est à l'origine des premières fortes émissions dans l'atmosphère (soufre...). Puis après la seconde guerre mondiale ces rejets industriels sont augmentés par ceux provenant de l'agriculture intensive (azote...) et du développement des transports terrestres et aériens (azote,...).

Le réseau Renécofor

En 1992, Renécofor (réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers) et son sous réseau Cataenat (charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres, 27 des 102 placettes Renécofor) ont été créés en vue du suivi des écosystèmes forestiers pendant au moins 30 ans. Ce réseau, géré par l'ONF, s'intègre dans un ensemble de réseaux européens. L'objectif principal de ce réseau est de détecter d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers et de mieux comprendre les raisons de ces changements.



Dispositif de collecte de la pluviosité et des dépôts atmosphériques hors forêt (point jaune = Pluviomètre à lecture directe, points rouges = Collecteur de dépôts atmosphériques)

N. Barry ONF

trois gouttières (voir photo). En 1999, cette installation a été complétée par un doublement du système de gouttières au sein du peuplement de pin sylvestre, afin d'avoir une idée de la variabilité spatiale. Au même moment, un deuxième dispositif a été installé dans une hêtraie proche



E. Ulrich, ONF

Dispositif de collecte des pluviolessivats sous forêt (hêtraie)



E. Ulrich, ONF

Dispositif de collecte des ruissellements de tronc sous hêtraie

de la pinède, avec un système de récolte sous forêt doublé. L'ensemble représente donc quatre sous-placettes expérimentales, deux dans chaque type de peuplement. Enfin, le hêtre ayant une écorce particulièrement lisse, une proportion notable des précipitations est canalisée vers le sol par ruissellement le long des troncs : chaque sous-placette de hêtraie a donc en outre été équipée de deux collecteurs de prélèvement du ruissellement sur les troncs (voir photo).

Résultats

Comparaison de la pluviométrie annuelle

Les dépôts atmosphériques sous forêt étant apportés par les précipitations, il est intéressant de comparer la pluviométrie sur chacune des quatre sous placettes, afin d'observer si les différences éventuelles de dépôts sont dues aux précipitations ou aux concentrations en soufre. Les hêtraies récoltent légèrement plus d'eau que les pinèdes, sauf en 2000 où l'inverse est observé (voir figure 3). Ce cas particulier peut s'expliquer par les dégâts de la tempête du 26 décembre 1999 dans la pinède. Durant trois mois il n'y avait plus aucun arbre au-dessus du dispositif 1 de collecte et plus que deux au-dessus du dispositif 2, donc moins d'interception par les houppiers. Par la suite ces deux dispositifs ont été réimplantés sous des peuplements complets.

tations, il est intéressant de comparer la pluviométrie sur chacune des quatre sous placettes, afin d'observer si les différences éventuelles de dépôts sont dues aux précipitations ou aux concentrations en soufre. Les hêtraies récoltent légèrement plus d'eau que les pinèdes, sauf en 2000 où l'inverse est observé (voir figure 3). Ce cas particulier peut s'expliquer par les dégâts de la tempête du 26 décembre 1999 dans la pinède. Durant trois mois il n'y avait plus aucun arbre au-dessus du dispositif 1 de collecte et plus que deux au-dessus du dispositif 2, donc moins d'interception par les houppiers. Par la suite ces deux dispositifs ont été réimplantés sous des peuplements complets.

Comparaison des dépôts annuels de soufre

Malgré des précipitations sous forêt légèrement plus importantes dans les hêtraies, les dépôts atmosphériques en soufre y sont plus faibles que sous les pinèdes (voir figure 4). La différence se fait durant la période où les hêtres sont défeuillés (voir figure 5a) et s'observe par les plus faibles concentrations dans l'eau (voir figure 5b). Pendant la saison de végétation, les dépôts et les concentrations sous hêtraies et sous pinèdes sont un peu plus proches (voir figure 6).

Les différences de dépôts entre la pinède 1 et 2 s'expliquent par un couvert un peu plus dense dans le premier peuplement. Les houppiers filtrent plus les dépôts secs, ce qui entraîne un léger enrichissement des pluviolessivats.

Conclusion

Ce dispositif de suivi illustre en forêt domaniale de Brotonne les écarts entre les retombées atmosphériques en soufre des hêtraies et des pinèdes. Ce phénomène est lié à la présence permanente ou temporaire du feuillage, entraînant un enrichissement plus ou moins important des concentrations dans l'eau mesurées sous forêt. Pendant l'année, les hêtres filtrent l'air différemment des pins sylvestres. Durant la période de végétation, les feuillages des hêtres et des pins retiennent les dépôts secs, qui sont lessivés et enrichissent l'eau qui traverse les houppiers.

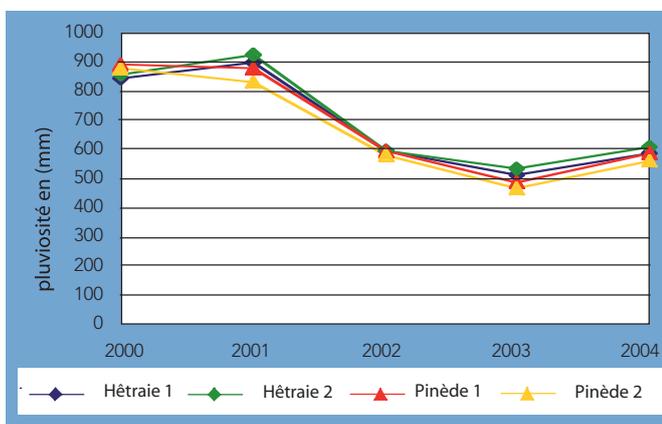


Fig. 3 : pluviométrie sous forêt

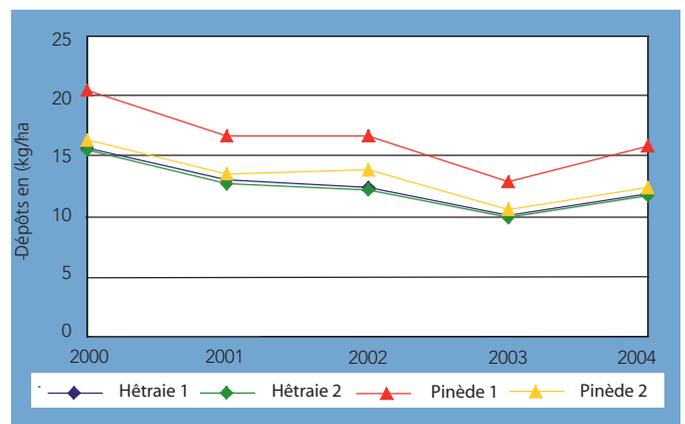


Fig. 4 : dépôts annuels de soufre sous forêt

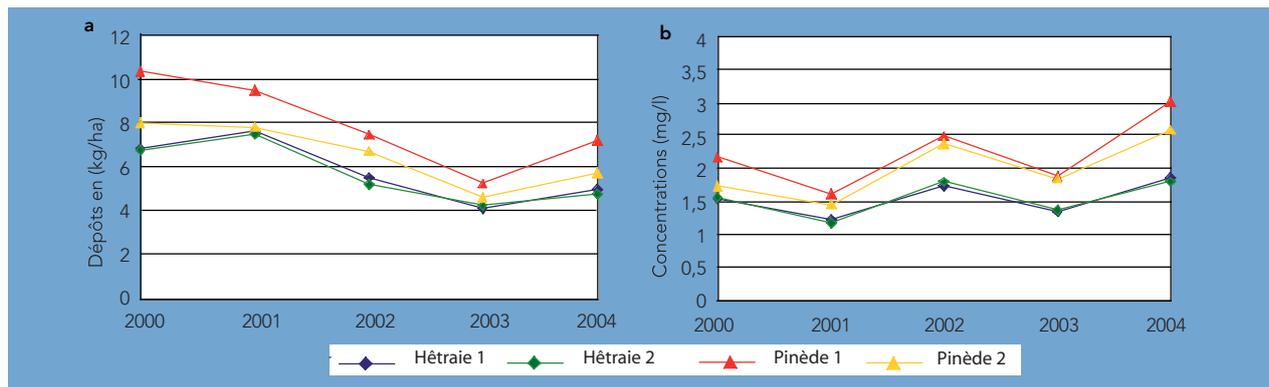


Fig. 5 : dépôts de soufre (a) et concentration en soufre dans les précipitations (b) sous forêt hors période de végétation

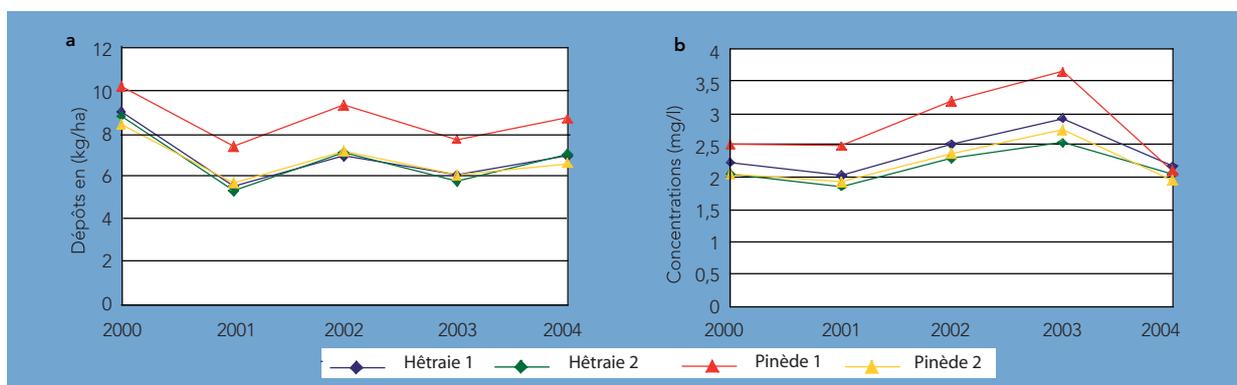


Fig. 6 : dépôts de soufre (a) et concentration en soufre dans les précipitations (b) sous forêt durant la période de végétation

Hors période de végétation, les hêtres une fois défeuillés interceptent moins de dépôts secs que les pins sylvestres qui gardent leurs aiguilles, cela entraîne des concentrations des eaux sous hêtraies plus faibles.

Nous pouvons donc estimer que le site de mesure permanent sous pinède du réseau Renécofor mesure plutôt la gamme haute de dépôts de cette forêt. Toutefois, afin d'observer si ce phénomène est généralisable à l'ensemble des peuplements forestiers, il faudrait répéter ces mesures sur d'autres sites, sur d'autres essences et prendre en compte précisément le facteur densité des houppiers.

Sébastien CECCHINI
Erwin ULRICH
 ONF, direction technique
 Département recherche
 Réseau Renécofor
 sebastien.cecchini@onf.fr
 erwin.ulrich@onf.fr

Nicolas BARRAY
 ONF, DT Ile-de-France - Nord-Ouest
 agence Haute-Normandie
 UT Brotonne Vallée de Seine
 nicolas.barray@onf.fr

Bibliographie

ULRICH E., LANIER M., COMBES D., 1998. Renécofor — Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous réseau Cataenat) : rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. Fontainebleau : ONF, Département des Recherches Techniques. ISBN 2-84207-134-4. 135 p.

CROISE L., ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2005. Le suivi des dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers en France. Rendez-vous technique, n°7, pp. 4-10

QUENEL P., CASSADOU S., DECLERCQ C., EILSTEIN D., FILLEUL L., LE GOASTER C., LE TERTRE A., MEDINA S., PASCAL L., PROUVOST H., SAVIUC P., ZEGHOUN A., 1999. Surveillance épidémiologique air et santé : surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire 148p.

FISCHER R., BATSRUB-BIRK A.-M., BECKER R., CALATAYUD V., DIETRICH H.-P., DISE N., DOBBERTIN M., PANNATIER E.-G., GUNDERSEN P., HAUBMANN T., HILDIGSSON A., LORENZ M., MÜLLER J., MUES V., PAVLEND A., PETRICCIONE B., RASPE S., SANCHEZ-PEÑA G., SANZ M., ULRICH E., VOLZ R., WIJK S., 2005. The condition of forests in Europe : 2005 Executive Report. United Nations Economic Commission for Europe, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, PCC of ICP-Forests. ISSN 1020-587X. 32 p.

Dossier



Le bois-énergie

Ce dossier coordonné par Ambroise Graffin a mobilisé de nombreux auteurs impliqués à des titres très divers dans le domaine du bois-énergie, pour éclairer une actualité un peu confuse à partir des questions suivantes : pourquoi développer la filière bois-énergie en France ? Sur quelle ressource forestière peut-on réellement compter et dans quelles conditions ? Quelles sont les perspectives sylvicoles et leurs limites (gestion durable) ? Comment faire le lien entre les estimations volume du forestier et les exigences en pouvoir calorifique des utilisateurs ?

- p. 14 Panorama de la filière bois-énergie en France par Ambroise Graffin
- p. 19 Évaluer la ressource bois-énergie par Thierry Bélouard, Stéphanie Lucas, André Richter, Delphine Pierrat
- p. 25 Élaboration d'un plan d'approvisionnement en plaquettes forestières : méthode et exemples par Ambroise Graffin et Sophie Pitocchi
- p. 28 Opportunités sylvicoles de production bois-énergie par Damien François et Laurent Descroix
- p. 33 Particularités de l'exploitation pour le bois-énergie plaquette par Luc Libault
- p. 36 Bois-énergie : maîtriser les impacts article collectif coordonné par Manuel Nicolas
- p. 46 Maîtriser les caractéristiques des plaquettes forestières de l'arbre sur pied à la livraison du combustible par Jean-Pierre Laurier et Florence Maire
- p. 50 Trois exemples de projets et chantiers bois-énergie à l'ONF par Dominique Darphin, Luc Libault et Philippe Goupil

Panorama de la filière bois-énergie en France

Le bois : un combustible renouvelable et propre

Le bois est considéré comme une énergie renouvelable. En effet, sous nos latitudes, on considère qu'un peuplement forestier se reconstitue en volume sur une période d'environ 150 ans, ce qui est bien éloigné des millions d'années nécessaires à la genèse de gisements fossiles, pétrole ou gaz. Par ailleurs, la combustion de bois dans des chaudières automatiques émet nettement moins de gaz à effet de serre que les combustibles fossiles (cf. tableau 1). Au niveau de l'inventaire des gaz à effet de serre et dans un contexte de gestion durable des forêts, ce qui est bien le cas en France, le bilan des flux sur des chaufferies ou centrales à bois est comptabilisé comme nul : on considère en effet que les émissions sont compensées par la croissance des arbres qui fixent le CO₂ via la photosynthèse. Enfin, il faut souligner que les chaudières bois automatiques utilisent aujourd'hui des technologies performantes et fiables avec des rendements énergétiques très satisfaisants, supérieurs à 80 %.

Par rapport aux combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), le bois souffre cependant de sa faible densité : pour le même contenu énergétique, le bois occupe 3 à 4 fois plus d'espace. L'usage de combustible bois est donc plus complexe dans des zones où l'habitat est dense (agglomérations) et son transport doit être limité pour rester compétitif (y compris du point de vue écologique).

Les différentes voies de valorisation énergétique du bois

La valorisation énergétique du bois peut s'effectuer à travers plusieurs voies : production de chaleur « simple », transformation d'une partie de cette chaleur en électricité (cogénération) ou production de biocarburant. Ces différentes voies présentent des rendements plus ou moins performants selon la maturité des technologies utilisées. Aujourd'hui, l'usage le plus répandu demeure la simple production de chaleur. Elle fait appel à des dispositifs divers (cheminées, inserts, poêles, chaudière automatique...) selon les usagers (particuliers, collectivités, industriels...) qui déterminent des combustibles

spécifiques (bûches, granulés, plaquettes...). Dans cette filière « production simple de chaleur », les chaudières automatiques offrent des rendements supérieurs à 85 %.

Tout ou partie de la chaleur produite peut aussi être transformée en électricité. *A priori*, deux grandes voies technologiques existent pour assurer cette conversion : combustion dite directe ou gazéification. L'option gazéification n'est pas encore bien stabilisée. Il existe peu d'unités utilisant cette technologie à grande échelle au niveau mondial. En France, un prototype d'1 MWe (Mega Watt électrique) vient d'être installé à Moissanes (Haute Vienne) par la société EBV – Eneria. Aujourd'hui, la filière cogénération optimisée peut atteindre des rendements d'environ 65 %, alors que la valorisation électrique seule plafonne à 25 %.

La production de biocarburant à partir de ressource lignocellulosique constitue un axe de recherche à moyen et long terme, qui pourrait être opérationnel à partir de 2015. Cependant la priorité demeure aujourd'hui la production de biocarburants dits de première génération à partir de cultures agricoles, oléagineuses principalement (colza...). Pour ce type d'installation, les rendements énergétiques prévisionnels à partir de ressource lignocellulosique sont de l'ordre de 30 à 50 %.

La connaissance des différentes filières de valorisation énergétique du bois est très importante pour optimiser l'utilisation de cette ressource. Aujourd'hui l'ONF participe de manière active à la réflexion et au développement de ces différentes filières.

	SO ₂	NO _x	C _x H _y	CO	CO ₂	Poussières
Chaudière fioul	140	40	10	50	78 000	5
Chaudière gaz naturel	0	40	5	50	52 000	0
Chaudière charbon	340	70	10	4 500	104 000	60
Chaudière à bois bûche traditionnelle	10	50	1 000	6 000	0	70
Chaudière à bois bûche moderne	10	42	9	366	0	14
Chaudière à bois déchiqueté	10	45	2	16	0	4

Tab 1 : émissions de CO, NO₂ et SO₂ lors de production de chaleur en kg/TJ (ou mg/MJ) - [source BLT Autriche]

Avec SO₂ = dioxyde de soufre ; NO_x = oxydes d'azote ; C_xH_y : composés organiques volatiles ; CO = monoxyde de carbone ; CO₂ = dioxyde de carbone.



A. Graffin, ONF

Plaquette forestière (plusieurs cm)



Ademe

Granulés (1 cm)



P. Goupil, ONFE

Bûches (1 m)

Implication de l'ONF dans les filières de valorisation énergétique du bois

Production simple de chaleur - Approvisionnement direct en plaquettes forestières d'une vingtaine de chaufferies automatiques, soit une consommation totale d'environ 40 000 t/an.

Cogénération - Conseils et élaboration de plans d'approvisionnement en plaquettes forestières pour l'installation de centrales de cogénération (métropole et Guyane).

Production de biocarburants - Participation au Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) et consultation sur divers projets pilotes (CEA Lorraine - Tenerrdis Rhône Alpes).

Un contexte international et national incitatif

La diminution des gisements d'énergie fossile et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre nous conduisent à modifier nos comportements énergétiques. La prise en compte de ces deux évolutions se traduit par deux grands types d'actions :

- Réduire en priorité notre consommation globale d'énergie ;
- Développer les énergies renouvelables au détriment des énergies fossiles.

Après une phase de prise de conscience au cours des décennies 1980-2000, un cadre réglementaire au niveau international, avec des

déclinaisons nationales, s'est mis en place progressivement pour développer les énergies renouvelables. Cette réglementation s'appuie en bonne partie sur les engagements pris par les pays industrialisés dans le Protocole de Kyoto, dans le but de lutter contre l'effet de serre. Sur notre territoire, le combustible bois occupe une place de choix dans les énergies renouvelables et le développement de ces énergies dépendra fortement de l'essor de la filière bois-énergie. En France, les principaux objectifs et engagements dans le domaine de l'énergie figurent dans la Loi d'Orientation sur l'Énergie approuvée en juillet 2005.

Pour atteindre ces objectifs chiffrés, l'État a mis en place une série de mesures, dont voici les principales pour ce qui concerne le développement de la filière bois-énergie :

■ **Plan Bois Énergie de l'Ademe** - De 2000 à 2006, l'Ademe et les Régions ont financé l'installation

de 1 400 chaufferies collectives et 480 chaufferies industrielles. Le parc des chaufferies collectives en fonctionnement fin 2006 représente ainsi 670 MW de puissance thermique installée et correspond à une consommation d'environ 1,9 Mt de combustible bois. Un nouveau plan pour la période 2007-2013 est en cours d'élaboration.

■ **Appels d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)** - Cette commission offre des tarifs préférentiels de rachat de l'électricité produite à partir de biomasse. Un premier appel d'offres lancé en 2004 a approuvé 14 projets pour une puissance installée totale de 216 MW, avec une consommation estimée d'environ 600 000 t de plaquettes forestières à partir de 2008. Un deuxième appel d'offres vient d'être lancé en décembre 2007 et devrait concerner une consommation au moins aussi importante de plaquettes forestières, à partir de 2010.

Principaux objectifs chiffrés de la Loi d'Orientation sur l'Énergie (juillet 2005)

- Division par 4 ou 5 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050
- Réduction de 2 % par an en moyenne d'ici 2015 de l'intensité énergétique finale (rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique)
- Production de 10 % des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergie renouvelable d'ici 2010 (4 % en 2005) :
 - Production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21 % de la consommation en 2010 (14 % en 2005).
 - Développement des énergies renouvelables thermiques pour permettre d'ici 2010 une hausse de 50 % de la production de chaleur d'origine renouvelable.
 - Incorporation de biocarburants et autres carburants d'origine renouvelable à hauteur de 5,75 % d'ici 2006 (0,84 % en 2004).

■ **Certificats d'économie d'énergie, crédits carbone** - En sus des instruments existants (réglementation, fiscalité etc.), ces systèmes fondés sur une logique de marché ont été mis en place pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre fixés par le Protocole de Kyoto. La demande provient des obligations d'économies ou de substitution d'énergie imposées aux vendeurs ou aux gros consommateurs d'énergie. L'offre provient des entreprises ou collectivités publiques qui engageront des actions, au-delà de leur activité habituelle, visant à économiser ou substituer l'énergie. Le marché permettra de s'assurer que tous les acteurs potentiels sont mobilisés, pour identifier tous les gisements d'économies ou de substitution d'énergie les moins coûteux. Ces systèmes demandent à gagner en lisibilité, surtout les certificats d'économie d'énergie.

NB : les mesures fiscales (TVA, crédit d'impôt...) ne sont pas abordées ici.

La filière bois-énergie française en chiffres

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse) représentent 4 % de

l'énergie primaire consommée en France, soit 18 Mtep¹. Le bois participe à hauteur de 50 % à ce total, soit près de 9 Mtep. Cette participation s'effectue surtout à partir de bois bûche (7,3 Mtep), de produits connexes et de bois de rebut (1,6 Mtep) et plus récemment de plaquettes forestières (<0,1 Mtep).

Deux plans bois-énergie successifs (1994-2000 et 2000-2006) impulsés par l'Ademe ont permis d'installer un réseau de chaufferies bois conséquent sur le territoire au niveau de collectivités et d'industriels. Lors du premier plan bois-énergie (1994-2000) l'essor des chaufferies bois s'est surtout appuyé sur de la ressource « produits connexes », disponible et meilleur marché. En revanche le deuxième plan a vu l'émergence de la plaquette directement issue de forêt en raison du tarissement du gisement connexes et bois de rebut. En 2000, seules quelques milliers de tonnes de plaquettes forestières étaient commercialisées. En 2006, la commercialisation de plaquettes forestières a concerné 150 000 tonnes.

Pour atteindre l'objectif de division par 4 de nos émissions de gaz à effet de serre à horizon 2050, le plan national biocom-

bustible prévoit une valorisation énergétique supplémentaire de la biomasse de l'ordre de 50 Mtep (cf. tableau 2). Cette mobilisation supplémentaire reposerait en grande partie sur des cultures énergétiques (30 Mtep) puis en second lieu sur de la plaquette forestière (4,5 Mtep).

Caractéristiques du marché actuel de la plaquette forestière

La simple comparaison du prix des combustibles « rendus à l'entrée de la chaudière » montre que le bois, et plus particulièrement la plaquette forestière, constitue le combustible le moins cher pour l'utilisateur. Mais cette analyse est incomplète : une chaudière bois automatique nécessite un investissement 2 à 3 fois supérieur à celui d'une chaudière classique à fioul ou gaz. Aujourd'hui la grande majorité du réseau de chaufferies bois n'a pu être réalisée que grâce à des subventions accordées par l'Ademe et les collectivités territoriales (conseils généraux et régionaux). Aujourd'hui ces subventions représentent 40 à 70 % de l'investissement total.

Le « cours » du marché pour les combustibles biomasse « entrée chaudière », en intégrant les subventions, oscille aujourd'hui entre 13 et 15 €/MWh, soit environ 40 €/t à 40 %. Depuis 1998, ce cours est en hausse constante, d'environ 8 % par an : il s'agit d'un marché en pleine expansion. Néanmoins, pour le producteur de bois, le cours actuel reste en deçà des coûts moyens de production de plaquette forestière qui se situent entre 16 et 19 €/MWh. Comment « placer » de la plaquette forestière dans ce contexte ? Pour être compéti-

Types de ressources	Valorisation énergétique 2005	Prévision 2010	Perspectives 2030/2050
Biodéchets organiques (concentrés)	~ 1 Mtep/an	~ 1,2 Mtep/an	~ 3 Mtep/an
Produits connexes du bois (concentrés)	~ 1,6 Mtep/an	~ 1,8 Mtep/an	~ 3 Mtep/an
Pailles et coproduits agricoles (diffus)	N.S.	~ 0,5 Mtep/an	~ 1,5 Mtep/an
Bois bûche	~ 7,5 Mtep/an	~ 7 Mtep/an	~ 6,5 Mtep/an
Plaquettes forestières (diffus)	moins de 0,1 Mtep/an	~ 2 Mtep/an	~ 4,5 Mtep/an
Nouvelles cultures ou plantations dédiées	N.S.	~ 1 Mtep/an 13 (200 000 ha)	~ 30 Mtep/an (6 Mha)
Potentiel total (arrondi)	~ 10 Mtep/an	~ 13 à 14 Mtep/an	~ 45 à 50 Mtep/an

Tab. 2 : perspectives de valorisation énergétique de la biomasse (Plan National Biocombustible – Contexte baril de pétrole à 50 USD)

¹ Source : Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières – Ministère de l'Industrie. Mtep : million de tonne équivalent pétrole

Positionnement de l'ONF dans la filière bois énergie

L'ONF est impliqué depuis la fin des années 90 sur des approvisionnements en plaquettes forestières de chaufferies communales. Cela concerne des communes forestières, pour lesquelles l'ONF assure une prestation de maîtrise d'œuvre pour l'exploitation des bois et leur transformation en plaquettes forestières jusqu'à la livraison en chaufferie. Puis en 2003, un réseau bois-énergie a été créé au sein de l'ONF avec un coordinateur national, ce réseau ayant pour objectif principal de définir et de mettre en œuvre la politique de l'établissement en matière de bois-énergie. Dans la foulée, un guide marketing « Bois Energie » a été élaboré pour encadrer les actions menées dans le domaine au sein de l'office.

En 2005, une nouvelle étape a été franchie en positionnant l'établissement sur la fourniture directe de plaquettes forestières avec notamment l'approvisionnement de la chaufferie de Planoise à Besançon, correspondant à une livraison de 5 000 tonnes par an. Ce positionnement traduit une volonté de développer la filière bois-énergie en harmonie avec les autres filières classiques (bois d'œuvre, bois de trituration) et d'adapter nos pratiques sylvicoles toujours dans le respect de la gestion durable des forêts. Ce positionnement répond aussi à la demande du Ministère de l'Agriculture qui souhaite que l'ONF joue un rôle moteur et fédérateur dans le développement de la filière bois-énergie.



De même, l'inscription dans le contrat Etat-ONF du projet « 1 000 chaufferies bois en milieu rural » porté par la Fédération Nationale des Communes Forestières constitue un encouragement supplémentaire au développement de l'activité bois-énergie au sein de l'établissement.

Enfin en 2006, une filiale spécifiquement dédiée à la commercialisation de plaquettes forestières, ONF Energie, a été créée. Cette création a été motivée par le retour d'expérience sur la période 2004/2005. En effet, le positionnement en tant que fournisseur direct de plaquettes forestières se heurtait à différentes contraintes liées aux statuts de l'ONF :

- impossibilité de faire du négoce de bois et donc de proposer des « mixtes produits » ou de couvrir certaines défaillances d'approvisionnement en achetant ponctuellement du combustible bois à des tiers ;
- obligation de recourir au code des marchés publics pour contractualiser les prestations de travaux pour la production de plaquettes (exploitation, broyage et transport). Ceci entravait la fidélisation de partenariat avec des entreprises de travaux, fidélisation pourtant nécessaire pour optimiser les circuits logistiques.

La création de la filiale a permis de lever ces obstacles, de rendre l'ONF plus réactif face aux multiples sollicitations en matière d'approvisionnement en plaquettes et enfin de conforter son positionnement en tant que fournisseur direct de combustible bois.

L'objectif principal de l'ONF en matière de bois-énergie est d'être un acteur structurant au profit du développement de la filière. Pour jouer ce rôle, l'ONF a mis en place une organisation interne adaptée (réseau interne, filiale ONF Energie) et a développé des partenariats étroits avec d'autres acteurs du monde forestier, notamment la Fédération Nationale des Communes Forestières et l'Union de la Coopération Forestière Française. Cette stratégie s'appuie sur la conviction que le développement de la filière bois-énergie doit être maîtrisée par les producteurs-gestionnaires des espaces forestiers pour garantir une gestion harmonieuse et durable des forêts.

Cette volonté de jouer un rôle majeur se traduit concrètement par une série d'actions, à différents niveaux :

- « **réflexion** » sur le rôle du secteur forestier dans la politique énergétique française à travers différents groupes de travail ou études (Programme National de Recherche sur les Bioénergies, Plan National Biocombustible, Etude de l'impact de la récolte des rémanents sur la fertilité des sols...) ;
- « **conseil et expertise** » pour orienter les porteurs de projets bois-énergie avec l'élaboration d'étude ressource ou de plan d'approvisionnement. Sur la période 2004-2006, l'ONF a réalisé plus d'une dizaine d'études ressource ou plan d'approvisionnement ;
- « **réalisation** » : approvisionnements et gestion de plateforme (ONF Energie). ONF Energie approvisionne aujourd'hui une quinzaine d'unités pour un total d'environ 40 000 tonnes de plaquettes forestières.

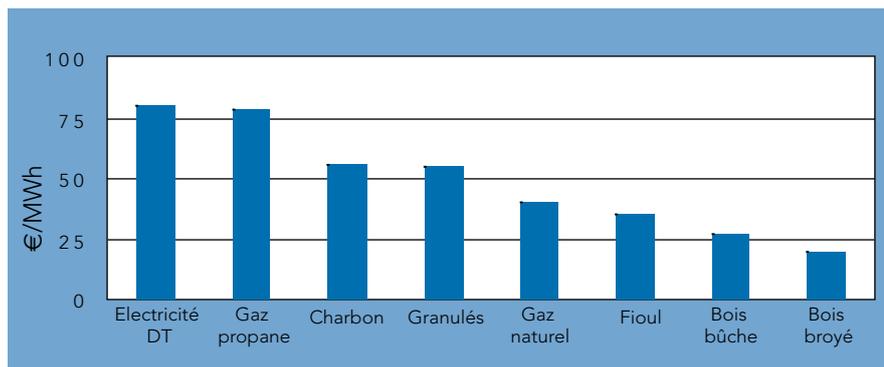


Fig. 1 : prix moyen (rapporté au MWh produit) des combustibles entrée chaudière, d'après ITEBE 2002

tive, la plaquette forestière doit le plus souvent être mélangée à d'autres combustibles de moindre valeur (produits connexes, déchets industriels banals, bois de rebut, bois d'élagage...).

Parmi les biocombustibles potentiels, la plaquette forestière (bois broyé) est bien placée en termes de compétitivité économique. Néanmoins, la dimension du gisement mobilisable dépendra fortement de la compétitivité des biocombustibles alternatifs, notamment des cultures énergétiques (taillis à courte rotation, cultures agricoles plantes entières). De même, les possibilités d'importation de biomasse, à partir d'Amérique du Sud ou des pays de l'Est, influenceront ce marché.

Cette mobilisation accrue de combustible bois dans les années à venir entraîne une réflexion plus générale sur le développement harmonieux des différentes filières de valorisation du bois. Plus concrètement, on observe une demande à la hausse sur les petits bois dont les cours ont progressé de 30 à 70 % sur les exercices 2005-2006. De même, les produits connexes ont connu une valorisation certaine depuis quelques années. Comment expliquer ces tendances ? L'augmentation de

point de vue

La hausse brutale du coût des énergies fossiles jusqu'au 3^e trimestre 2006 a certes favorisé l'émergence de projets de chaufferies bois collectives (réseau de chaleur) ou industrielles. Elle s'est accompagnée de fortes tensions sur le marché du bois de chauffage et de trituration avec deux conséquences principales :

- difficulté pour trouver la ressource à un coût d'exploitation acceptable et sans perturber la demande des usages concurrents (papetiers, panneauteurs) ;
 - forte hausse du coût de la biomasse se traduisant directement dans le coût des plaquettes forestières après transformation.
- Les porteurs de projet, en particulier les industriels du chauffage, n'ont pas encore totalement intégré que la plaquette forestière avait un coût devant permettre la juste rémunération des détenteurs de ressources et de la chaîne de transformation. Le marché reste néanmoins porteur dans l'avenir sous réserve d'une stabilisation des cours du bois permettant une meilleure lisibilité sur l'évolution des prix.

P. Goupil,
Président d'ONF Énergie

la demande en bois bûche et en plaquettes d'industrie (connexes) explique en bonne partie ce phénomène. Les industries de la trituration s'inquiètent de cette évolution. Pour tempérer cela, l'ONF propose des contrats d'approvisionnements pluriannuels aux industries de la trituration permettant de lisser ces secousses de prix et recherche de nouveaux gisements non concurrentiels pour le développement de la filière bois-énergie plaquettes (dépressages, surbilles...).

Ambroise GRAFFIN

ONF-DMD, chargé de mission bois-énergie
ambroise.graffin@onf.fr

Bibliographie

ROY C, 2006. Plan Biocombustible. Coordination interministérielle Biomasse, 93 p.

Ministère de l'Industrie, 2006. Programmation Pluriannuelle des Investissements de production de chaleur. Ministère de l'Industrie, 107 p.

Ademe, 2006. Programme national bois énergie 2000-2006 : rapport d'activités 2000-2005. Angers : Ademe, 113 p.

Évaluer la ressource bois-énergie

Dans un contexte désormais porteur, l'évaluation de la ressource bois-énergie, à différentes échelles, est indispensable pour organiser la (les) filière(s), les politiques locales et concevoir des projets pertinents... Éclairage en trois exemples choisis : l'évaluation nationale du gisement brut, présentée par Thierry Bélouard et Stéphanie Lucas (IFN), et les études ressource de la région Lorraine et du département de Haute-Marne, respectivement exposées par André Richter et Delphine Pierrat.

Estimation du gisement brut en plaquettes forestières en France, à partir de données IFN

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) souhaite promouvoir et développer l'utilisation du bois-énergie en particulier par le biais des plaquettes forestières. Pour cela, il était essentiel de disposer d'une estimation des disponibilités de ce produit à l'échelle nationale. Cette mission a été confiée à l'Inventaire forestier national (IFN), qui a réalisé ce travail à partir de ses données aux niveaux national et régional en 2004-2005. L'évaluation est faite sous forme de **gisements potentiels bruts**, c'est-à-dire qu'elle ne tient pas compte des contraintes techniques (accessibilité à la ressource...) ni d'aucun critère économique.

Quelques principes

L'estimation du gisement s'est concentrée sur le compartiment « non-commercial » de l'arbre, c'est-à-dire hors découpe commerciale (voir encadré). L'étude utilise le terme de rémanents pour désigner les produits (petit bois, menu bois et branches) qui peuvent être issus de ce compartiment, soit des produits compris entre une découpe bois fort commerciale (14 - 20 cm) et une découpe fin bout. Cette définition diffère de celle employée classiquement à l'ONF, où le terme de rémanent désigne des produits compris entre une découpe bois fort (7 cm) et une découpe fin bout. Par ailleurs, seuls les rémanents provenant des **forêts de production** ont été pris en compte ; les forêts récréatives ou de protection, les peupleraies, les haies, les alignements, les arbres épars, les vergers et les arbres urbains ne sont pas inclus. L'hypothèse a également été

faite que ce gisement se présentera sous la forme de plaquettes forestières dans sa forme finale.

Par ailleurs, le taux de prélèvement de bois en France s'élève à 69 % de la production nette annuelle (d'après les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, édition 2005). Cela signifie que, même dans un processus de gestion durable de la forêt, il est possible d'accroître de manière significative les récoltes, en soulignant qu'un taux de 100 % est naturellement illusoire.

La méthode du bilan appliquée aux feuillus

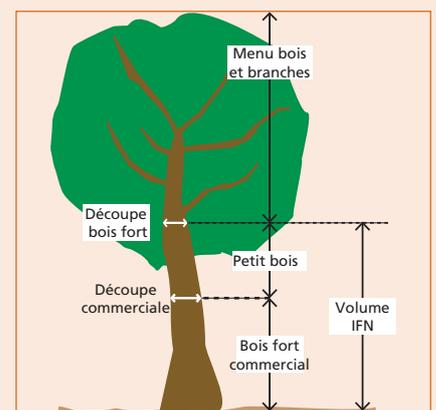
L'écriture du bilan de matière entre deux inventaires forestiers successifs (notés 1 et 2) permet d'estimer les prélèvements pour la période correspondante :

$$\text{volume 1} + \text{production nette} = \text{volume 2} + \text{prélèvements}$$

Les différents compartiments de l'arbre

L'arbre est décomposé en 3 compartiments : le bois fort commercial, le petit bois de la tige, le menu bois et les branches. Les autres parties de l'arbre, comme les feuilles, les aiguilles, la souche et les racines, ne sont pas prises en compte :

- **le bois fort commercial** : volume de la tige en dessous de la découpe commerciale fixée à 14 cm pour les conifères et 20 cm pour les feuillus (7 cm pour le taillis). Dans l'option « gisement actuel », la production de plaquettes forestières n'a pas été envisagée à partir de ce compartiment ;
- **le petit bois de la tige** : volume de la tige comprise entre la découpe commerciale et la découpe bois fort (7 cm fin bout). Il est estimé à partir de l'échantillon des arbres mesurés par l'IFN. Le volume de rémanents petits bois est calculé selon le groupe d'essences et la classe de dimension de l'arbre ;
- **le menu bois et les branches**, c'est le volume de la tige au-delà de la découpe bois fort (7 cm) et le volume des branches. Ce volume est estimé à partir de facteurs d'expansion issus du programme de recherche Carbofor (voir bibliographie).



Comme la production nette et les volumes sont estimés à chaque inventaire de l'IFN, il est possible d'en déduire les prélèvements totaux exprimés en volume de tige arrêté à la découpe fin bout de 7 cm (autoconsommation incluse).

Actuellement, les prélèvements sont inférieurs à la production nette. La différence entre production nette et prélèvements constitue une première estimation simple d'une possible intensification des récoltes à la double condition que : (i) la structure des peuplements en terme de classe d'âge ou de classe de diamètre soit équilibrée et (ii) leur importance (surface) soit stable. Si on considère que la première condition est vérifiée au niveau national en première approximation, on sait parfaitement que la surface des peuplements feuillus augmente régulièrement en France. Cet état de fait entraîne **une sous-estimation du gisement feuillu** de bois-énergie par cette méthode.

Pour les résineux, l'utilisation des résultats d'une étude prospective

Pour les résineux, l'hypothèse d'une stabilité de la production nette est encore moins acceptable : les disponibilités vont fortement augmenter à l'avenir avec l'arrivée à maturité des plantations de la seconde moitié du 20^e siècle (épicéa et douglas notamment).

La disponibilité est définie comme la quantité de bois qu'il sera possible de prélever dans une zone donnée, pendant une période donnée en appliquant des règles raisonnables de gestion. Elle est estimée à partir de l'état actuel de la ressource, de modèles de croissance et de scénarios de gestion sylvicole.

À partir d'une base de données constituée par l'IFN et l'Afocel (association forêt cellulose) lors d'une étude sur les disponibilités résineuses pour la France entière à l'horizon 2015, il a été possible d'évaluer les gisements potentiels de plaquettes résineuses.

Deux types de gisement ont été identifiés : l'un correspond aux

Gisements potentiels bruts

Le gisement 1 représente le potentiel associé aux prélèvements actuels. Il correspond pour les feuillus, aux rémanents des récoltes estimés par la méthode du bilan, pour les résineux aux disponibilités du scénario actuel sur la période 2003-2005.

Le gisement 2 correspond au potentiel associé à une intensification des prélèvements, c'est-à-dire aux rémanents de la récolte supplémentaire suivante :

- feuillus : « production nette » – « prélèvements » ; soit le volume annuel actuellement capitalisé ;
- résineux : « disponibilité selon le scénario futur sur la période 2011-2015 » – « gisement 1 ».

Dans le cas particulier des taillis simples et des éclaircies de petit bois en futaie résineuse, on considère que c'est la totalité de l'arbre qui est utilisée comme bois-énergie.

Les gisements peuvent être également répartis selon différents critères tels que la région administrative, la structure du peuplement (futaie/taillis/mélange), le groupe d'essences (feuillu/résineux), l'exploitabilité (au sens IFN, défini par quatre observations comme la pente, la portance...), la classe de dimension de l'arbre (cf. site www.boisenergie.ifn.fr).

rémanents liés au niveau actuel de récolte, l'autre suppose une intensification des prélèvements (voir encadré).

Principaux résultats de l'estimation du gisement brut

Le gisement brut lié à l'exploitation actuelle est estimé à 7,3 Mtep¹ par an, soit environ 34 Mm³, dont 74 % issus du compartiment « menu bois et branches » (< 7 cm) et 26 % du compartiment « petit bois ». Les régions qui présentent le plus gros potentiel sont l'Aquitaine, la Lorraine, Rhône-Alpes et la Franche-Comté (figure 1). Un scénario d'intensification de la récolte bois-énergie, incluant notamment une valorisation d'éclaircies résineuses et de taillis, déboucherait sur un potentiel supplémentaire de 4,8 Mtep/an, soit environ 22 Mm³.

Limites et possibilités d'amélioration de l'étude

L'étude a été réalisée en se plaçant dans une logique de sous-produit et selon l'hypothèse de non-concurrence entre les usages du bois. La part de bois bûche au sein du gisement actuel est mal connue, elle doit être déterminée de manière plus précise afin d'en

déduire le gisement effectivement non mobilisé.

L'étude ne prend pas en compte le fait qu'il est indispensable de laisser quelques rémanents en forêt pour le maintien de la biodiversité (bois mort), la protection physique et la richesse chimique des sols.

L'étude se limite aux forêts de production qui selon l'IFN couvrent 14,6 millions d'hectares (chiffre 2004). Pour que l'étude soit exhaustive au niveau français, il faudrait ajouter les peupleraies et les rémanents issus

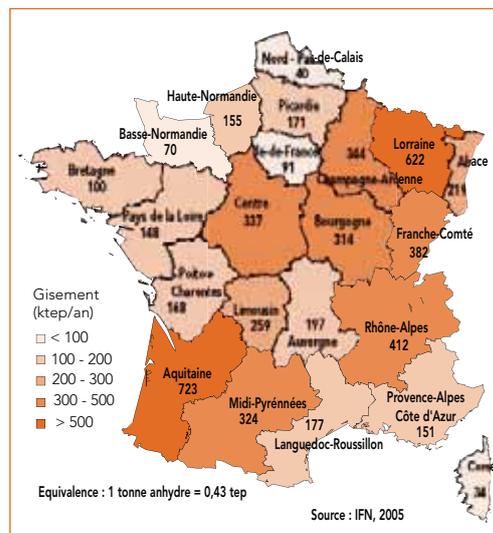


Fig. 1 : gisement brut issu des rémanents de l'exploitation forestière actuelle (branches et menu bois)

2 enquête sur l'utilisation du territoire réalisée par les statisticiens agricoles à partir d'un échantillon de points répartis sur l'ensemble du territoire ; permet d'obtenir les surfaces par type d'utilisation selon une nomenclature physique.

des arbres hors forêts (haies, alignements et arbres épars) dont la superficie est estimée par Teruti² à 920 000 hectares.

Il est essentiel de rappeler que les gisements bruts présentés ici ne tiennent pas compte des facteurs de réfaction liés au contexte technico-économique. Il est donc clair qu'une part conséquente de ces gisements ne sera jamais mobilisée (voir l'encadré de A. Graffin).

Cette étude est **un premier cadrage** des gisements de bois-énergie aux échelles nationale et régionale. Elle montre que les disponibilités actuelles sont réelles. Cependant, la situation peut être localement différente. Aussi, la mise en œuvre d'un projet utilisant des plaquettes forestières nécessite une étude locale des disponibilités plus poussée à court et moyen terme, intégrant le contexte technico-économique local.

Gisement brut n'est pas ressource mobilisable

L'approvisionnement d'unités consommant de la plaquette forestière nécessite une bonne connaissance de la ressource mobilisable

pour cet usage, notamment la ressource de proximité. En effet, les unités potentiellement consommatrices de plaquettes forestières (chaufferie bois automatique, centrale de cogénération, usine de bio-carburant...) présentent des durées d'amortissement le plus souvent supérieures à 10 ans et ont besoin d'un approvisionnement sécurisé sur cette durée. Par ailleurs, la plaquette forestière est un produit à faible valeur ajoutée dans lequel le coût du transport correspond au minimum à 20 % du coût total. Aussi, pour minimiser les variations de prix, le producteur de plaquettes devra posséder une bonne connaissance de la localisation de la ressource forestière qu'il pourra utiliser. Des unités de transformation de bois d'œuvre ou de trituration seront moins sujettes à cet « impact transport », car les produits considérés présentent une valeur de base plus élevée.

Diverses méthodes ont été mises au point et sont utilisées pour conduire des évaluations de la ressource disponible pour une valorisation en plaquettes forestières. Le choix de la méthode ou de l'approche dépend

le plus souvent de l'échelle d'étude. Schématiquement, on peut distinguer les niveaux d'étude suivants :

- Niveau national ou régional avec utilisation majoritaire de données statistiques, type Inventaire Forestier National ou Enquête Annuelle de Branche ;
- Niveau départemental ou communal avec utilisation majoritaire de données terrain type plans d'aménagement, base de données coupes et travaux.

Les deux exemples exposés ci-après illustrent ces différentes approches et s'attachent à expliquer les écarts possibles entre les résultats affichés.

Estimation de la disponibilité en bois-énergie des forêts de Lorraine

L'ONF a réalisé en 2005, en partenariat avec la Coopérative Forêts et Bois de l'Est, une étude visant à estimer la biomasse forestière disponible pour une utilisation énergétique sur une période de 10 ans. Cette étude, financée en partie par le conseil régional de Lorraine, devait notamment préciser les résultats de l'évaluation nationale IFN — Solagro.

Le contexte lorrain du bois-énergie

La pression sur le bois d'industrie est forte dans la région : pas moins de 15 industries de la trituration s'approvisionnent en Lorraine, pour un volume d'environ 1,9 million de tonnes brutes. La question de la concurrence entre bois d'industrie et bois-énergie est donc particulièrement prégnante.

Dans ce contexte, les résultats de l'étude IFN — Solagro ont été très critiqués par les industriels comme par les forestiers pour au moins 2 raisons :

- le disponible calculé intégrait tous les volumes de bois au-delà de la découpe bois fort, or ces volumes sont déjà largement utilisés par l'industrie,

Exemple d'utilisation des résultats

Le bureau d'étude Solagro a formulé des scénarios de mobilisation selon différentes hypothèses, à appliquer sur l'estimation du gisement brut réalisé par l'IFN. Dans le contexte actuel, le croisement entre gisement brut et hypothèses de mobilisation donnerait les résultats suivants, extraits à partir du site www.boisenergie.ifn.fr où sont consignés l'ensemble des résultats issus des travaux de l'IFN et de Solagro :

■ pour un prix du marché de 17 €/MWh entrée chaufferie, 0,9 Mtep/an du gisement petit bois (14-20 cm < d < 7 cm) sont mobilisables, soit environ 4,2 Mm³ ;

■ pour le même prix de marché de 17 €/MWh entrée chaufferie, 2,7 Mtep/an du gisement menu bois et branches (d < 7 cm) sont mobilisables, soit environ 12,6 Mm³. En considérant que la mobilisation des rémanents est écologiquement possible (voir l'article « Maîtriser les impacts » de ce même dossier) dans 50 % des cas et que sur ce type de chantier on arrive techniquement à mobiliser en moyenne 50 % du volume théorique, le potentiel net est alors d'environ 3,1 Mm³.

On en déduit ainsi un potentiel net mobilisable dans les conditions techniques et économiques actuelles de 7,3 Mm³/an. Si le prix du marché passe à 20 €/MWh, ce potentiel monte à environ 9 Mm³. Ce chiffre est à rapprocher des 10 à 12 Mm³ disponibles évoqués à dire d'expert par l'ensemble des acteurs de la filière bois.

A. Graffin

■ les calculs de disponibilité se sont basés sur les données d'inventaires de l'IFN datant du début des années 90, avec une prise en compte approximative des effets de la tempête de décembre 1999.

Une méthode innovante

Dans les études de disponibilités forestières classiques, la méthodologie consiste à comparer une offre potentielle calculée d'après les données de l'IFN à une récolte estimée d'après l'enquête annuelle de branche. Cette enquête est réalisée annuellement par les services du ministère de l'Agriculture et de la Pêche, qui recueillent et synthétisent les déclarations établies par tous les exploitants.

La particularité de l'étude réside dans le fait que les gestionnaires forestiers ont commencé par identifier les produits insuffisamment mobilisés, avant d'évaluer les volumes disponibles pour chaque produit. Pour la Lorraine, les produits identifiés étaient les suivants :

- les bois de taillis (issus de taillis pur ou taillis sous futaie (TSF)), pour lesquels il y avait une surcapitalisation constatée en forêt privée ;
- les houppiers de chêne, c'est-à-dire les produits correspondant au bois d'industrie ou au bois de feu de chêne, et dont les difficultés d'écoulement pouvaient localement gêner les mises en régénération ;
- les bois de faible diamètre (dépressage, ouverture de cloisonnement, premières éclaircies pré-commerciales), pour lesquels l'absence de débouché constituait un frein à une sylviculture dynamique précoce ;



Bois de taillis (TSF)

A. Rçichter, ONF

■ les rémanents d'exploitation de toutes les essences, qui constituaient une ressource nouvelle abordée dans toutes les études précédentes. Compte tenu des risques encourus par une trop forte exportation minérale, l'étude a été circonscrite aux coupes de régénération. Les données de l'IFN ont été utilisées dans la mesure où la tempête n'avait pas eu d'impact sur les gisements étudiés, ce qui est le cas pour les bois de taillis et les bois de faible diamètre. Par ailleurs, le cas des éventuels volumes supplémentaires de bois d'œuvre n'a pas été abordé, considérant que toute l'offre disponible était mobilisée.

En parallèle à l'évaluation en volume de ces gisements, deux enquêtes ont été réalisées : la première, destinée aux unités territoriales ONF, avait pour but de valider les hypothèses de gisement et de les cartographier ; la deuxième, à destination des industries de la trituration s'approvisionnant en Lorraine, avait permis de quantifier les augmentations de capacité prévues pour le bois d'industrie.

Les hypothèses retenues

Les hypothèses chiffrées n'ont d'intérêt que pour la Lorraine et ne seront donc pas détaillées ici. L'évaluation du volume disponible de chaque gisement s'est faite selon les hypothèses suivantes :

- bois de taillis : une valeur optimale pour la surface terrière du taillis a été fixée d'après une étude



Ouverture de cloisonnement (déchiqueteuse automotrice)

A. Rçichter, ONF

menée par le CRPF (centre régional de la propriété forestière) et L'ONF en 2002 et 2004. On a ensuite considéré que l'excès de surface terrière, mesuré à partir des données de l'IFN, serait résorbé par coupes successives sur une période de 10 ans ;

■ houppiers de chêne : le volume de houppiers a été estimé en appliquant un coefficient de houppier aux volumes de bois d'œuvre commercialisés, et en considérant que 50 % de ce volume était disponible à terme compte tenu de l'évolution de la demande de l'industrie (peu intéressée par cette essence pour des raisons techniques) et en bois de chauffage ;

■ bois de faible diamètre : des hypothèses de sylviculture minimaliste et dynamique ont été appliquées aux jeunes peuplements inventoriés par l'IFN. Dans le cas des cloisonnements d'exploitation, il a été considéré que les surfaces en retard de cloisonnement feraient l'objet d'un rattrapage dans les 10 ans ;

■ rémanents d'exploitation : le volume pris en compte correspond aux rémanents mis en andains dans les coupes de régénération, évalué à partir des données des comptes coupes des agences ONF.

Au final, après déduction des volumes supplémentaires pouvant être utilisés par l'industrie, il reste un potentiel de 450 000 m³/an (soit 400 000 tonnes) de biomasse pour un usage énergétique. Ce chiffre est à comparer aux 2 millions de tonnes obtenues en hypothèse moyenne pour l'étude IFN — Solagro.

Les suites de l'étude lorraine

L'évaluation en volume de gisements de bois disponible n'est qu'une étape : il faut s'assurer que ces gisements sont mobilisables à des coûts économiquement supportables pour le propriétaire. Une deuxième étude, avec les mêmes partenaires et financée par la DRAF (direction régionale de l'Agriculture et de la Forêt), a été entreprise pour mettre en face de chaque gisement

identifié des coûts et des itinéraires techniques de mobilisation. Les conclusions de cette étude, basée sur le suivi de différents chantiers test, seront disponibles au printemps 2007.

Par ailleurs, la méthodologie de l'étude Lorraine a été reprise au niveau national dans une étude financée par le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, et confiée au Cemagref. Cette étude vise à déterminer la biomasse disponible pour de nouveaux usages (énergie, biomatériaux) en y associant tous les professionnels concernés, les résultats n'en seront toutefois pas connus avant le mois de septembre 2007.

Étude de la ressource forestière en bois-énergie pour la Haute-Marne

À la demande du conseil général de Haute-Marne, l'ONF et le CRPF de Champagne-Ardenne ont réalisé en 2006 une étude conjointe sur le potentiel bois-énergie des forêts du département, comprenant :

- une estimation de la ressource disponible et non valorisée actuellement dans les forêts publiques et privées ;
- une estimation de la ressource supplémentaire valorisable moyennant une première phase de dynamisation de la sylviculture, et de la récolte ;
- la définition d'un schéma d'exploitation qui permette la mobilisation effective de cette ressource, et du schéma de desserte « optimal » correspondant ;
- les investissements nécessaires sur les infrastructures routières, via une analyse de l'existant.

Le présent article détaille la méthodologie et les principaux résultats de cette étude pour la partie estimation ressource.

Méthode d'évaluation de la ressource valorisable en bois-énergie
L'étude exprime des résultats au

niveau du département avec une ventilation des potentiels par unité territoriale. Ces résultats proviennent d'analyses réalisées sur l'ensemble des forêts publiques (135 000 ha) et sur environ 1/3 des forêts privées soumises à plan simple de gestion (PSG ; 22 000 ha), ce qui correspond à environ 65 % de la superficie forestière du département. La période de validité de ces estimations s'étend de 2006 à 2015.

La première étape de l'estimation du potentiel bois-énergie plaquettes consiste à déterminer les types de produits forestiers qui pourront être valorisés sous cette forme. Le critère de choix principal est l'absence ou la mauvaise valorisation des produits. Dans le contexte haut-marnais, cette analyse a permis d'identifier les gisements suivants :

- 1 : houppliers feuillus ;
- 2 : éclaircies précoces en peuplements feuillus (dépressages, nettoiements...);
- 3 : houppliers et rémanents en peuplements résineux ;
- 4 : taillis ;
- 5 : grumes et surbilles de qualité D provenant de bois façonnés, bord de route.

En forêt publique, l'estimation du potentiel bois-énergie a été réalisée à partir de la consultation des bases de données coupes et travaux sur la période 2003-2005, pour gommer l'effet tempête, et de l'analyse générale des documents d'aménagement. L'exploitation des bases de données a permis de déterminer des prélèvements de référence par type de produits et la consultation des aménagements a autorisé une projection de ces niveaux de récolte sur la période 2006-2015.

En forêt privée, le CRPF a procédé à une analyse des programmes de coupes et travaux inscrits dans les PSG sur la période 2006-2010. Les PSG analysés provenaient de trois grands gestionnaires privés (Groufor 52, Caisse des Dépôts et

Consignations, expert forestier M. Rousselin) et les résultats ont été extrapolés à l'ensemble de la forêt privée en utilisant les coefficients suivants, établis à dire d'expert :

- forêts sous PSG agréé : 100 % ;
- forêts à PSG non agréé et forêts de plus de 25 ha sans PSG : 70 - 80 % ;
- forêts entre 10 et 25 hectares : 50 - 60 % ;
- forêts entre 4 et 10 hectares : 30 - 40 % ;
- forêts de moins de 4 hectares : 10 - 20 %.

L'ensemble des résultats, forêt publique et forêt privée, a été regroupé sur une base de données unique, géoréférencée, avec comme maille unitaire l'unité territoriale ONF.

Un potentiel bois-énergie à géométrie variable...

L'étude met en évidence une disponibilité de 38 à 68 000 m³/an pour une valorisation bois-énergie plaquettes en Haute-Marne dans le contexte actuel (« scénario 1 ou disponible actuel »). Le différentiel de 30 000 m³ vient de l'incertitude portant sur la rentabilité de la mobilisation des gisements éclaircies précoces feuillus et houppliers/rémanents résineux. Cette disponibilité peut varier sensiblement en fonction du marché local du bois, des pratiques sylvicoles et de la desserte des massifs forestiers.

Le « scénario 2 ou disponible théorique maximum » dimensionne cette variabilité : si on imagine une valorisation intégrale en plaquettes forestières des gisements identifiés, on aboutit à une disponibilité de 370 000 m³/an. L'observation de la ventilation de ces disponibilités permet d'identifier les gisements sources de variation : taillis et houppliers feuillus (figure 2).

Le « scénario 3 ou disponible à moyen terme » dimensionne la disponibilité supplémentaire consécutive à une dynamisation de la sylviculture et à une amélioration de la

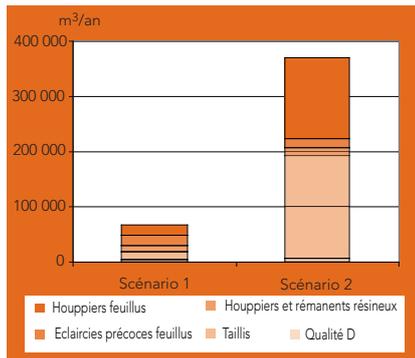


Fig. 2 : ventilation des gisements bois-énergie de Haute-Marne dans les scénarios 1 et 2

desserte des massifs forestiers. La mobilisation est conditionnée par la réalisation d'investissements conséquents et peut être envisagée d'ici 10 ans. Cette estimation s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- en forêt publique : rotation des coupes ramenées à 12 ans, voire 8 ans dans les zones les plus productives ;
- en forêt privée : ouverture systématique de cloisonnements en TSF, augmentation de 5-10 % du volume prélevé dans les houppiers de TSF, lancement des conversions dans les TSF de hêtre.

L'analyse pour le scénario 3 conduit à l'estimation d'une récolte supplémentaire de 135 à 190 000 m³/an, dont 70 000 en forêt publique et 65 à 120 000 en forêt privée. En intégrant les modifications au niveau de la sylviculture et de la desserte, on pourrait donc tabler d'ici 10 ans sur une disponibilité de 175 à 260 000 m³/an.

Discussion

L'étude IFN – Solagro affiche un potentiel brut de 792 000 m³ par an pour une valorisation bois-énergie plaquettes en Haute-Marne (cf. site www.boisenergie.ifn.fr, onglet « gisement personnalisé »). Si on restreint l'extraction aux volumes compris entre la découpe commerciale (15-20 cm) et la découpe bois fort (7 cm) et aux volumes mobilisables à un coût inférieur à 17 €/MWh « entrée chaudière »,

ce qui correspond aux hypothèses de mobilisation de l'étude Haute-Marne, le potentiel disponible s'élève à 86 400 m³/an. Enfin, si on souligne que le marché du bois était plus favorable pour une valorisation de produits forestiers en plaquettes en 2004, date de réalisation de l'étude IFN – Solagro, qu'en 2006, date de finalisation de l'étude ONF – CRPF Haute-Marne, on peut considérer que les potentiels respectifs affichés (38 à 68 000/86 400) sont cohérents.

Pour conclure

Ce type d'étude montre la sensibilité des résultats affichés en fonction du contexte (marché du bois, desserte, sylviculture) et souligne la nécessité de préciser les sources de variation pour ajuster les estimations à la conjoncture. Enfin, pour obtenir des estimations à un niveau de précision supérieure, pour l'alimentation d'une chaufferie communale par exemple, il faut réaliser une analyse plus approfondie des documents de gestion des massifs forestiers concernés, plans d'aménagement en forêt publique et plans simples de gestion en forêt privée. Une étude ressource à l'échelle départementale peut descendre à ce niveau de précision (cf. Étude du potentiel bois-énergie dans les forêts publiques de l'Isère et la Savoie, ONF – 2004), mais cela dépend des moyens qui sont affectés à l'étude et des données disponibles...

Thierry Bélouard
Stéphanie Lucas

Inventaire Forestier National

André RICHTER

Chargé de mission développement de la filière bois
MAP — Bureau du développement économique
(en DT ONF de Lorraine jusqu'au 01/06/06)

Delphine PIERRAT

ONF, chargée de développement
Unité spécialisée de Langres

delphine.pierrat@onf.fr

Bibliographie

SOLAGRO, IFN, 2004. Amélioration de la méthode d'évaluation du potentiel forestier bois-énergie (production de plaquettes) : tests supplémentaires en Limousin, Bourgogne, Rhône-Alpes, Rapport d'avancement n° 1, 16 p. + annexes.

SOLAGRO, IFN, La Rochette, 2003. RBM : méthode d'évaluation du potentiel forestier bois-énergie – Rapport final. 80 p.

IFN, 2005 Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. Édition 2005. Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, IFN. 148 p.

HAMZA N., PIGNARD G., THIVOLLE-CAZAT A., 2004. Disponibilité en bois résineux en France réévaluation après les tempêtes de 1999 (3 tomes). Lattes : IFN.

À consulter aussi :

L'IFN et ses données : www.ifn.fr

Les principaux résultats de l'étude IFN - SOLAGRO d'après un programme développé par l'IFN : www.boisenergie.ifn.fr

Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles,
<http://medias.obs-mip.fr/gicc/interface/projet.php?%2F01#Avancement>

Élaboration d'un plan d'approvisionnement en plaquettes forestières : méthode et exemples

Une étude ressource conduit à évaluer un potentiel bois-énergie sur un territoire donné (région, département, communauté de communes...). L'élaboration d'un plan d'approvisionnement procède d'une logique différente : on part d'un besoin identifié (x milliers de tonnes par an) sur un site précis, la zone de prospection n'est donc pas fixée a priori. Et on étend la prospection jusqu'à atteindre la valeur des besoins affichés.

Avant de décrire les étapes de l'élaboration d'un plan d'approvisionnement, une première question s'impose : quand déclencher la réalisation d'un tel plan ? Pour des besoins allant jusqu'à 500 t/an, une étude proprement dite est souvent superflue, la ressource disponible est identifiée à partir de la consultation des gestionnaires concernés. De 500 à 5 000 t/an, une étude de quelques jours peut être utile, mais en simplifiant les étapes présentées ci-dessous. **Le plan d'approvisionnement sera surtout élaboré pour des besoins supérieurs à 5 000 t/an.**

Depuis 2005, l'ONF et GCF (Groupe Coopération Forestière) mènent ce type d'étude conjointement. Cette association permet de mutualiser la ressource forestière et les moyens de mobilisation,

avec comme principale conséquence la réduction des rayons d'approvisionnement. Les principes présentés sont issus du retour d'expérience sur la période 2005-2007.

Caractérisation de la zone d'étude

La zone de prospection est définie par un rayon d'approvisionnement. Ce rayon est fixé en fonction de la surface forestière qu'il permet d'inclure. Si le besoin est par exemple de 20 000 tonnes de plaquettes forestières par an et que, dans la zone considérée, on applique un taux de récolte potentielle bois-énergie plaquettes de 0,2 t/ha/an, on en déduit que la zone d'étude devra inclure un minimum de 100 000 ha de « forêts prospectables », ce qui permet alors de fixer

le rayon d'approvisionnement (cf. encadré). Les taux de récolte potentielle proviennent des études ressource ou plans d'approvisionnement réalisés à ce jour.

Une attention particulière doit être portée à la notion de surface forestière prospectable. Dans ce type d'étude, une forêt prospectable est une forêt de production dont le propriétaire est bien identifié (domanial, communal ou privé adhérent d'une coopérative). En fonction des durées d'engagement demandées, la ressource communale sera intégrée ou non dans la prospection.

À l'issue de cette phase, on a donc fixé un rayon d'approvisionnement ou rayon de prospection et bien identifié les surfaces forestières prospectables. L'ensemble est illustré par une carte. L'idéal est de pouvoir disposer des couches SIG des différents types de forêt (domanial, communal et privé par déduction) pour ventiler les surfaces par rayons d'approvisionnement progressifs (0-20 km, 20-40 km...), mais ces données ne sont pas toujours disponibles. Dans ce cas, le niveau de restitution minimum est le département.

Détermination du rayon de prospection

Le calcul de la surface prospectable S_p s'exprime de la manière suivante :

$$S_p = \pi R^2 \times t \times c'$$

Avec R = rayon d'approvisionnement ; t = taux de boisement ; c' = ratio forêt prospectable/forêt.

La formule précédente permet alors de calculer le rayon d'approvisionnement :

$$R \text{ (km)} = \sqrt{S_p / (t \times c' \times \pi)}$$

Application : pour $c' = 1/3$, $S_p = 1\,000 \text{ km}^2$ et $t = 25 \%$, alors $R = 71 \text{ km}$

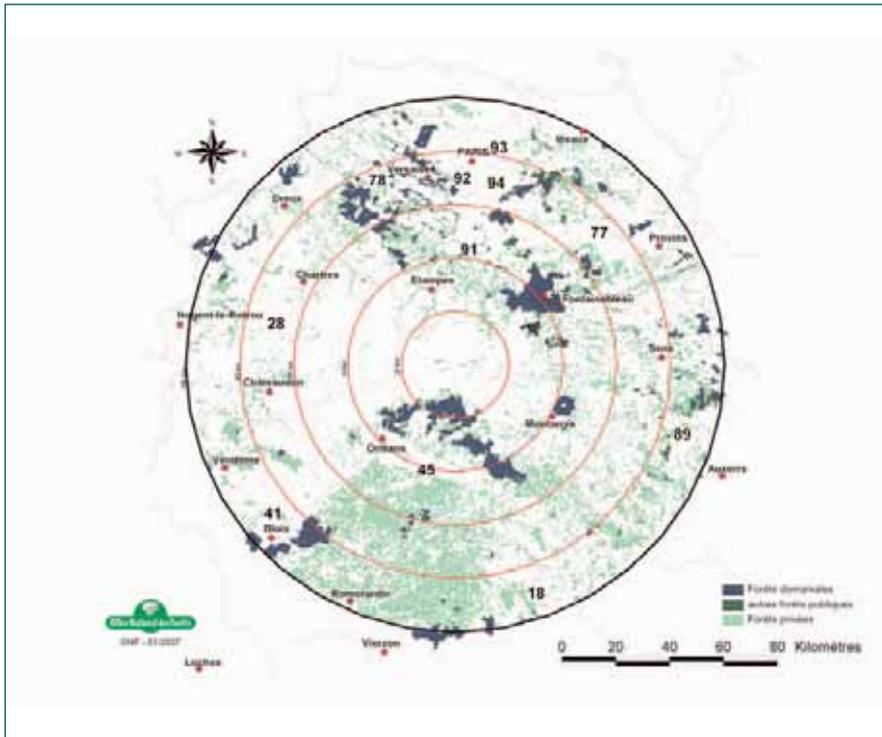


Fig. 1 : exemple de cartographie de la zone d'étude

Parallèlement, on procède à une rapide description des principales caractéristiques forestières de la zone, en termes de peuplements et de marché du bois, ainsi qu'à une présentation des acteurs concernés, agences de l'ONF et coopératives adhérentes de GCF.

Typologie des gisements et évaluation du potentiel bois-énergie par gisement

Après avoir bien identifié et caractérisé la zone d'étude, on aborde la détermination des gisements de plaquettes forestières. Ces gisements correspondent à des types d'opérations sylvicoles générant des types de produits. Exemples : dépessage de jeunes peuplements, relevés de couvert, houpriers... **Le critère principal de choix est l'absence ou la mauvaise valorisation des produits.** Cette nuance (absence ou mauvaise) est importante, car elle indique s'il existe une concurrence ou non pour le produit considéré.

Pour chaque gisement et au niveau de chaque acteur identifié précédemment (agence ONF et coopérative GCF), on procède à une évaluation du potentiel disponible pour une valorisation bois-énergie plaquettes. Concrètement, cette évaluation se fait selon deux voies, complémentaires, choisies en fonction du niveau d'information existant :

■ Détermination de prélèvement type par gisement, estimation de la surface concernée par an et calcul ainsi d'un potentiel bois-énergie annuel.

Ce travail réalisé à dire d'expert fait appel aux services territoriaux des entités concernées (agences ONF et coopératives GCF). Exemple : 200 ha de coupe de taillis avec un prélèvement moyen de 60 t/ha donneront un potentiel de 12 000 t/an pour ce gisement « coupe de taillis ».

■ Utilisation de base de données de coupes et travaux ainsi que de données de commercialisation.

Exemple : sachant que dans les

années à venir, on va augmenter la récolte générale dans un secteur donné, on peut choisir d'affecter un % (par exemple 5 % de la catégorie houpriers) de la récolte d'une catégorie donnée mal valorisée pour du bois-énergie plaquettes.

Dans le rendu, on précisera bien les volumes non concurrencés ou « bois + » (exemple : gisement dépessages) des volumes où une concurrence existe (exemple : gisement houpriers pour une valorisation en bois bûche). À ce stade, **on obtient donc un potentiel brut en bois-énergie** par département, par acteur (agence ONF, coopérative GCF) et par gisement. La valeur de ce potentiel est discutable et peut évoluer rapidement en fonction de modifications locales (augmentation de la demande en petits bois, diminution des travaux de dépessages en raison de déséquilibres dans les classes d'âge, réalisation de gros travaux d'ouverture d'emprise en milieu forestier...), mais cet exercice est indispensable pour favoriser un développement harmonieux du bois-énergie par rapport aux autres filières.

Du potentiel brut au potentiel net...

Deux niveaux de concurrence peuvent être distingués pour la ressource fléchée plaquettes forestières :

■ **une concurrence interfilière**, c'est-à-dire avec la filière trituration et la filière bois bûche. Ce type de concurrence a été traité dans les paragraphes précédents, au moment de l'identification et de l'évaluation des gisements de plaquettes forestières ;

■ **une concurrence intrafilière**, consécutive au développement d'autres projets consommateurs de plaquettes forestières.

Pour apprécier cette concurrence intrafilière, on recense les projets locaux (le plus souvent il s'agit de chaufferies bois automatiques)

consommateurs potentiels de plaquettes forestières. Cette évaluation se fait en étroite concertation avec les délégations régionales de l'Ademe qui ont une bonne visibilité de la dynamique de ces projets grâce aux subventions qu'elles accordent. Pratiquement tous les projets bois-énergie font appel à ces subventions. Cette évaluation se concentre sur des projets déjà fonctionnels ou dont l'instruction est bien avancée (étude de faisabilité, réalisation en cours). Comptabiliser toutes les « idées de projet » reviendrait à surestimer fortement la demande en plaquettes forestières. Ces informations émanant de l'Ademe sont complétées par nos informations propres issues de contacts réguliers avec les principaux opérateurs de l'énergie et les collectivités.

Cette évaluation conduit à identifier la demande dans les années à venir (3-4 ans) en plaquettes forestières. Là encore le niveau de récolte de l'information est le département. Lorsqu'on défalque cette consommation prévisionnelle du potentiel brut précédemment estimé, on obtient ainsi une évaluation du potentiel net disponible pour le projet considéré, par département, par acteur et par gisement, avec une distinction du niveau de concurrence au sein de chaque gisement.

Itinéraires techniques, coûts et prix global de l'approvisionnement

Pour chaque gisement identifié, on proposera un itinéraire technique argumenté qui sera chiffré au niveau économique. À dire d'expert et avec le retour d'expérience, les facteurs discriminants sont : **le temps de transport** lié en bonne partie à la distance d'approvisionnement, **le prix du bois sur pied et les conditions d'exploitation des bois** (topographie, desserte). Cette analyse est réitérée pour chaque gisement, ce qui permet d'aboutir à un niveau d'estimation du prix global de l'approvisionnement assez précis.

Le tableau 1 illustre la phase de synthèse du plan d'approvisionnement. Certains champs (département, niveau de concurrence...) ne sont pas affichés. À partir de ces données unitaires, on peut réaliser une succession d'extractions ou croisements qui permettent de caractériser le potentiel en plaquettes forestières ainsi mis en évidence :

■ **Tonnage et prix** - Exemple : pour 10 000 t/an, le prix moyen est de 17,80 €/MWh ; pour 20 000 t/an, le prix moyen est de 18,50 €/MWh ; ou pour un prix fixé de 18 €/MWh, la disponibi-

lité en plaquettes forestières est de 15 000 t/an etc. ;

■ **Tonnage et acteur** - Exemple : 30 % des tonnages identifiés viennent de la coopérative X ;

■ **Tonnage et gisement** - Exemple : 50 % du tonnage vient du gisement coupe de taillis. Etc.

Valeur du plan d'approvisionnement

À la différence de l'étude ressource, le plan d'approvisionnement a une valeur d'engagement pour les producteurs, ONF et GCF, vis-à-vis du porteur de projet, à hauteur des volumes identifiés. Le prix affiché n'est pas figé, mais constitue une base de discussion pour la négociation d'un éventuel contrat d'approvisionnement.

Sophie PITOCCHI

GCF, chargée de mission bois-énergie
sophie.pitocchi@ucff.asso.fr

Ambroise GRAFFIN

ONF, chargé de mission bois-énergie
ambroise.graffin@onf.fr

Origine	Gisement	Potentiel brut (m ³ /an)	Potentiel brut (t/an)	Potentiel net (t/an)	Prix bord de route (€/t 40 %)	Transport (€/t)	Prix total (€/t)	Prix total (€/MWh)	Moy.
Agence X	Houppiers taillis	20 000	16 000	12 800	44	16	60	21,43	21,01
	Dépressages	5 000	4 000	3 200	39	16	55	19,64	
	"Arbre Conseil"	500	400	320	34	16	50	17,86	
Coopérative Y	Taillis tilleul	6 500	5 200	3 640	37	13	50	17,86	17,99
	Eclaircie chât	6 000	4 800	3 360	37	13	50	17,86	
	Rémanents	1 000	800	560	42	13	55	19,64	
Total		39 000	31 200	23 800					20,05

Tab. 1 : exemple de tableau synthétique pour le plan d'approvisionnement

Opportunités sylvicoles de production bois-énergie

Pour le gestionnaire forestier, la question de la ressource bois-énergie effectivement mobilisable se pose essentiellement en termes d'opportunités économiques pour la réalisation des opérations sylvicoles jusqu'ici contrariées faute de débouchés. Illustration par Damien François pour les forêts de plaine (chantiers pilotes de Lorraine) et Laurent Descroix pour la montagne.

L'étude de la mobilisation de bois-énergie dans les forêts lorraines

Depuis le printemps 2005, la coopérative forestière Forêts & Bois de l'Est (F & BE), l'Office national des forêts (ONF), le centre régional de la propriété forestière (CRPF) de Lorraine – Alsace et le service forêt de la chambre d'agriculture des Vosges travaillent conjointement à la réalisation d'une étude visant à déterminer le bilan technico-économique de la production et de la mobilisation de bois-énergie dans les forêts lorraines.

Cette étude, commanditée par la direction régionale de l'Agriculture et de la Forêt (DRAF) Lorraine, l'Agence régionale de l'environnement en Lorraine (AREL) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), fait suite à l'évaluation de la ressource bois-énergie, qui avait mis en évidence pour les forêts lorraines un disponible annuel théorique en bois de qualité secondaire de 500 000 tonnes en complémentarité des usages industriels et domestiques existants.

Accroître la mobilisation des bois de qualité secondaire

L'idée de ces études est que, en dépit d'une forte densité d'industries de trituration, il reste en Lorraine des gisements sylvicoles de bois de qualité secondaire

insuffisamment mobilisés (bois d'éclaircies précoces, rémanents d'exploitation, houppiers de chêne, taillis...) techniquement et économiquement mobilisables pour une valorisation énergétique et ce sans porter préjudice à la filière bois traditionnelle.

Expérimenter et promouvoir des itinéraires techniques viables...

À travers la mise en place et le suivi d'une douzaine de chantiers pilotes de production de plaquettes forestières représentatifs de la ressource régionale, l'objectif est de fournir pour chacun des gisements identifiés des itinéraires techniques chiffrés de mobilisation et de valorisation énergétique. Ces chantiers permettent par ailleurs de mobiliser l'ensemble des acteurs de la filière bois-énergie autour de projets concrets et servent de supports de sensibilisation, de communication et d'animation à destination des personnes intéressées. Dans un second temps, l'étude débouchera sur des outils techniques d'information à destination des propriétaires et des gestionnaires forestiers.

Les différents chantiers ont été sélectionnés en partenariat avec l'ONF, le CRPF Lorraine-Alsace et le service forêt de la chambre d'agriculture des Vosges. Les sites d'expérimentation retenus sont des chantiers représentatifs des problématiques à illustrer et satisfaisant aux critères suivants :

- conditions d'accès et d'exploitabilité caractéristiques de la ressource régionale ;
- superficie totale suffisante pour des évaluations en vraie grandeur ;
- mobilisation possible d'au minimum 30 tonnes/ha de plaquettes forestières afin d'assurer la viabilité économique de l'opération ;
- chaufferie bois en service à moins de 50 km afin d'éviter des surcoûts de transport prohibitifs.

...pour trois types de situations sylvicoles

L'expérimentation ne pouvant être exhaustive, les itinéraires techniques envisagés mettent en œuvre les techniques a priori les plus opérantes pour traiter les opportunités sylvicoles identifiées, à savoir :

- ouverture de cloisonnements sylvicoles et éclaircie sélective pré-commerciale dans des jeunes peuplements (feuillus ou résineux, issus de plantation ou de régénération naturelle) (opération coûteuse réalisée fréquemment trop tardivement faute d'acquéreur) ;
- coupe d'amélioration dans des peuplements de taillis sous futaie (broyage des brins de taillis et produits d'éclaircie de faible diamètre, et des houppiers), autre cas fréquent d'invendus. Faute de recul, ce cas n'est pas présenté dans ce qui suit ;
- broyage de rémanents après coupe rase (= préparation du terrain avant plantation).

Premières analyses des chantiers lorrains

Un protocole général de suivi de chantier a été adopté par l'ensemble des partenaires du projet afin d'optimiser les enseignements de ces différentes expérimentations.

Aujourd'hui, 5 des 12 chantiers entrepris sont complètement achevés : le tableau 1 en présente les principales caractéristiques, le tableau 2 et la figure 1 en dégagent le bilan technique et le bilan financier.

Une précision s'impose pour la compréhension des éléments du calcul financier (figure 1). Les coûts de chaque étape de production se rapportent à la tonne de plaquette « verte » (50 % d'humidité). Or la référence est le prix de vente de la plaquette « ressuyée » (35 % d'humidité) livrée en chaufferie. C'est pourquoi on intègre non seulement les frais de transport et de gestion, mais aussi le coût des pertes : pertes inévitables au sol, et surtout perte de poids par séchage (et éventuellement perte matière par fermentation, selon conditions de stockage). Noter que cette perte au séchage ne concerne pas les chantiers 1 et 2 : le ressuyage des bois abattus donné directement de la plaquette sèche, qui ne s'est pas réhumectée malgré le stockage non bâché (temps de stockage court).

Réaliser sans frais les cloisonnements et premières éclaircies

Il ressort de cette analyse qu'aux prix actuels du marché de la plaquette forestière (de l'ordre de 15 €/ MW soit environ 45 € la tonne à 35 % d'humidité), le gisement des bois d'éclaircies précoces et rémanents d'exploitation après coupe rase s'avère techniquement et économiquement mobilisable sous réserve de recourir à des outils industriels de pro-

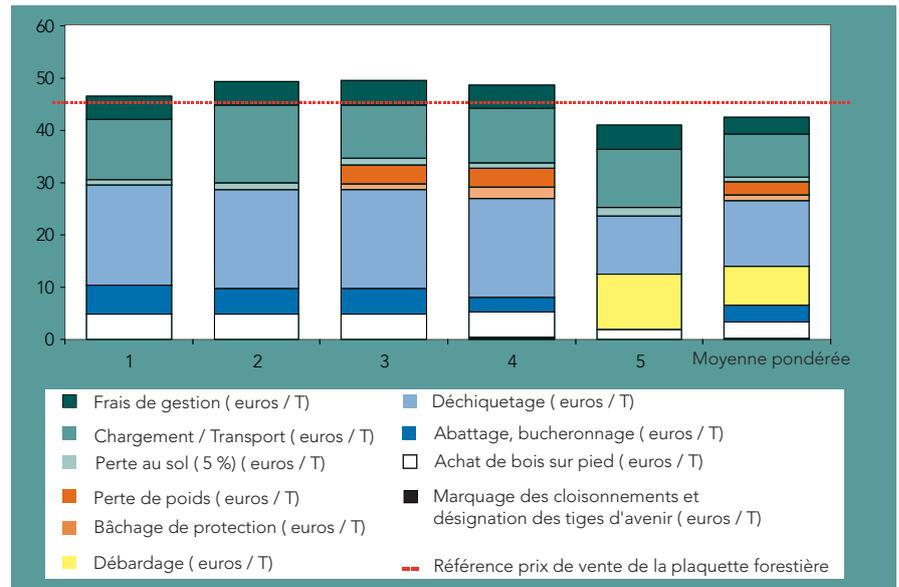


Fig. 1 : Bilan financier des chantiers bois-énergie (données 2005) - (source : F & BE/UCFF)

duction (abattage professionnel, mécanique ou manuel, puis broyeur lourd) dans le cadre d'une logistique parfaitement maîtrisée.

Les marges actuelles entre les coûts de production et les prix de vente demeurent cependant réduites, ce qui bien souvent dans la pratique ne permet pas encore de dégager un revenu. Néanmoins la mise en place d'itinéraires bois-énergie comme ceux de cette étude offre d'ores et déjà, lorsque les conditions s'y prêtent, l'opportunité de réaliser à coût zéro (contre plusieurs centaines d'euros par ha précédemment) des opérations sylvicoles fondamentales qui, en améliorant la productivité des peuplements, bénéficient à l'ensemble de la filière...

L'augmentation attendue, dans un futur proche, de la valeur de la biomasse sur les marchés de l'énergie et les améliorations logistiques constantes mises en place par l'ensemble des partenaires de la filière forêt bois, devraient conforter ce bilan déjà plutôt satisfaisant.

Point d'actualisation (N.D.L.R.) Cette analyse se rapporte aux conditions de la fin d'année 2005 : le prix d'achat du bois sur pied était de 0 à 5 €/tonne.

Pour 2006-2007, il faut rajouter 2 à 3 €/tonne (la rançon du succès ?), ce qui ne remet pas en cause la conclusion générale, ni les perspectives à moyen terme.

Et pour les sols ?

Reste la question de l'appauvrissement des sols lié à l'exportation des rémanents ; les premières observations ont permis de mettre en évidence que le ressuyage des bois abattus sur les parterres des coupes (pendant 1 à 6 mois) préablement au broyage limitait le prélèvement des branches les plus fines, des bourgeons terminaux et des feuilles, parties de l'arbre les plus riches en éléments minéraux. Rappelons en outre que dans les itinéraires proposés, l'exportation des rémanents concerne la 1^{re} éclaircie (broyage tige entière) et la coupe rase, mais non l'ensemble des éclaircies du peuplement.

Quant à la préservation physique des sols, on a pu constater que, sous réserve d'intervenir sur les sols les plus fragiles pendant les périodes les plus sèches, l'impact du passage des machines semblait relativement limité.

N° du chantier	1	2	3	4	5
Commune et statut de la forêt (FC = communale, FD = domaniale, FP = privée)	Igney (88) FC	Bouxières aux Bois (88) FC	Portieux/Morville (88) FD de Fraize	Portieux/Morville (88) FD de Fraize	Raon aux Bois (88) FP
Peuplement	Jeune futaie régulière équienne et monospécifique de chênes rouges issue de plantation (1987)	Jeune futaie régulière équienne et monospécifique de chênes rouges issue de plantation (1986)	Jeune futaie régulière équienne et monospécifique de chênes sessiles issue de plantation (1978)	Jeune futaie régulière équienne de hêtres issue de régénération naturelle (milieu des années 70)	Futaie adulte d'épicéas communs de 50 ans jamais éclaircie
Opération	Ouverture de cloisonnements d'exploitation et éclaircie sélective simultanée	Ouverture de cloisonnements d'exploitation (+ éclaircie sélective simultanée, d'intensité supérieure à celle du chantier n° 1, sur 20 % de la surface)	Ouverture de cloisonnements d'exploitation	Ouverture de cloisonnements d'exploitation et de lignes de reprise	Broyage de rémanents après coupe rase à l'abatteuse. Les bois de trituration (ici, découpe 10) ont été vendus par ailleurs, à l'unité de produit.
Modalités	Abattage manuel, ressuyage, puis broyage sur parcelle ; livraison après stockage en forêt	Abattage manuel, ressuyage, puis broyage sur parcelle ; livraison après stockage en forêt	Abattage manuel, broyage sur parcelle ; livraison après stockage en forêt	Abattage manuel, broyage sur parcelle ; livraison après stockage en forêt	Broyage bord de route (rémanents + bois secs sortis au porteur) ; ivraison en flux tendu
Surface (ha)	5,6	7	11,7	1,5	6
Situation topographique	plateau	plateau	fond de vallon	fond de vallon	bord de rivière
Desserte	piste et route moyennes	piste moyenne ; route à 500 m	piste et route moyennes	piste moyenne ; route à 400 m	piste et route moyennes
Zone de stockage	mitoyenne	distante de 500 m	mitoyenne	distante de 400 m	mitoyenne
Région naturelle	plateau lorrain	plateau lorrain	plateau lorrain	plateau lorrain	collines sous vosgiennes ouest
Station	moyennement drainée, sur limons épais et marnes	moyennement drainée, sur limons épais et marnes	moyennement drainée, sur limons épais et marnes	moyennement drainée, sur limons épais et marnes	fraîche à très humide localement
Contraintes d'exploitation (cf. intervention du broyeur)	sol sujet à l'engorgement et sensible au tassement	sol sujet à l'engorgement et sensible au tassement	sol sujet à l'engorgement et sensible au tassement	sol sujet à l'engorgement et sensible au tassement	(RAS, sol filtrant)
Densité moyenne (nb tiges/ha)	2 222	2 222	2 665	2 445	-
Diamètre moyen à 1,30 m (cm)	12	11	12	12,5	-
Hauteur moyenne (m)	15	14	15,5	15	-
Masse moyenne d'une tige (kg)	105	85	110	130	-

Tab. 1 : Présentation des chantiers bois-énergie lorrains analysés — (source : F & BE/UCFF)

N° du chantier	1	2	3	4	5
Commune	Igney	Bouxières aux Bois	Portieux/Morville	Portieux/Morville	Raon aux Bois
Temps nécessaire au marquage (heures)	9	12	-	1,5	-
Temps total nécessaire à l'abattage (heures)	57	63	71	7,5	-
Temps nécessaire au débardage (heures)	-	-	-	-	26,8
Temps nécessaire au broyage (heures)	17	40	30	9	21
Quantités produites totales (tonnes)	260	365	395	85	140
Quantités produites (tonnes/ha)	46,5	52	33,8	56,5	23,3
Rendement horaire de l'abattage (tonnes/heure)	4,6	5,8	5,6	11,3	-
Rendement horaire du débardage (tonnes/heure)	-	-	-	-	5,2
Rendement horaire du broyage/déchetage (tonnes/heure)	15,3	9,1	13,2	9,5	6,7
Dégâts occasionnés au peuplement	négligeables	négligeables	négligeables	négligeables	aucun
Dégâts occasionnés au sol	négligeables	négligeables à l'intérieur de la parcelle, quelques ornières sur les lignes de reprise dans les parties les plus mouilleuses			négligeable

Tab. 2 : bilan technique des chantiers bois-énergie — (source : F & BE/UCFF)



D. François, F & BE



D. François, F & BE



D. François, F & BE

Ouverture de cloisonnements dans des jeunes peuplements feuillus issus de régénération naturelle (chantier n° 4) : avant, après, plaquettes produites



D. François, F & BE



D. François, F & BE

Broyage bord de route après coupe rase de résineux (chantier n° 5) :

L'exploitation des branches en forêt de montagne, nécessité de la mécanisation et opportunité énergétique

En zone de montagne, les questions se posent de façon bien différente. L'apparition de têtes d'ébranchage capables de façonner des gros bois résineux a ouvert des perspectives nouvelles pour l'exploitation forestière, surtout lorsqu'elles sont associées au débardage par câble.

L'exploitation des arbres entiers permet de réduire le travail du bûcheron à la seule opération d'abattage, l'ébranchage étant réalisé mécaniquement sur la voie de desserte.

La suppression de l'ébranchage en forêt permet de réduire à la fois la pénibilité du métier et les risques, tous deux liés à la pente. Sur le plan économique, les coûts de l'abattage sont considérablement diminués (de plus de moitié), alors que l'ébrancheuse, généralement montée sur une pelle à pneus, en assurant le billonnage des bois, le cubage, le tri et le rangement des grumes dans un contexte où les zones de stockage sont exiguës, rémunère largement sa prestation.

Jusqu'à maintenant, les tas de branches créés par l'ébranchage

Enjeux associés au câble en Rhône-Alpes

Alors que le débardage par câble est marginal en France, il est le principal mode d'exploitation des forêts de montagne des autres pays de l'Arc alpin où il constitue le moyen de vidange de référence. Les coûts d'exploitation (abattage + vidange) varient de 30 à 65 €/m³ selon les difficultés d'exploitation.

Les volumes actuellement exploités en Rhône-Alpes sont de l'ordre de 10 000 à 15 000 m³/an en forêt publique.

Un plan de développement du câble est lancé avec la région Rhône-Alpes, avec un objectif de l'ordre de 50 000 à 80 000 m³/an d'ici 5 à 10 ans, pour permettre de remobiliser une partie de la ressource actuellement inexploitable au tracteur.

L'enjeu de valorisation des rémanents est de l'ordre de 5 000 à 10 000 tonnes d'ici 5 ans, notamment du fait du développement des ébrancheuses dans l'équipement des entreprises de câblage.

sur place de dépôt restaient simplement ignorés et constituaient le plus souvent une contrainte, notamment pour des questions d'esthétique.

La valorisation en plaquette forestière de ce gisement, laissé à disposition à proximité des voies de débardage, constitue aujourd'hui un nouvel enjeu de ce type d'exploitation, notamment pour l'approvisionnement des chaufferies bois de calibre industriel. Les rendements estimés en bois-énergie dans les coupes résineuses de bois d'œuvre sont de l'ordre de 10 à 15 % du volume total, ce qui laisse des perspectives de récolte intéressantes.

Cet enjeu renforce collatéralement la pertinence des questions posées par les bilans de minéralomasse induits par cette technique, notamment dans des contextes de sols les plus acides (voir l'article de ce même dossier sur la maîtrise des impacts).

Damien FRANCOIS

Chargé de mission bois-énergie
Coopérative Forestière Forêts &
Bois de l'Est
damien.francois@foretsetboisdelest.com

Laurent DESCROIX

Chef de projet bois-énergie, forêt
de montagne
ONF, DT Rhône Alpes



L. Descroix, ONF



L. Descroix, ONF



L. Descroix, ONF

Débardage arbre entier au câble mâât et façonnage par tête d'ébranchage montée sur une pelle à pneus

Rémanents après ébranchage des bois bord de route

Particularités de l'exploitation pour le bois-énergie plaquette

« Bois bûche et bois plaquette »

Se lancer dans la filière bois-énergie avec des connaissances sommaires et peu de bibliographie sur l'optimisation de la récolte en amont tient de la gageure. On a tendance à s'imaginer d'abord qu'une simple transposition suffira : après tout il ne s'agit que de bois de chauffage. Mais c'est à une réalité bien différente qu'on est confronté.

Le bois bûche est le quotidien du forestier. Dans la majorité des cas, l'exploitant (petite entreprise, affouagiste, cessionnaire...) suit les coupes traditionnelles, débite sur parcelle en bout de 1 m, fend ou refend, entrepose sur place et vient enfin évacuer ses piles quand les conditions météo le permettent, tout cela en période hivernale. Les stères sont alors prêts à livrer, généralement pour l'hiver d'après.

Spécificités techniques de l'exploitation des bois pour la production de plaquettes

Le bois-énergie plaquette demande bien plus qu'une simple adaptation de cette organisation séculaire.

De nombreux facteurs vont modifier nos habitudes :

- dans le meilleur des cas l'abatage sera mécanisé pour optimiser les coûts de production ;
- le bois est « sorti » en toute longueur (6 m si possible) ;
- les bois à broyer doivent être propres ;
- les périodes d'exploitation seront étalées sur toute l'année, alors que l'hygrométrie précise est un élément clé de la vente ;
- une logistique exigeante s'impose.

L'abatage mécanisé, de plus en plus répandu pour les petits sciares résineux, n'est pas encore rentré dans les mœurs pour le feuillu et les houppiers résineux. La forme, l'encombrement et la destination des produits concernés ne justifiaient pas cette « modernisation », le gestionnaire lui-même y voyant surtout des inconvénients : frottement, difficulté de sélection, ornières dues aux engins, bruit... Le « mobilisateur » de plaquette devra être très attentif à ce que ses chantiers ne justifient pas ces craintes. Le choix de la mécanisation, qui ne sera d'ailleurs pas toujours possible, devra se faire en accord total avec le gestionnaire. Ces techniques d'abatage existent mais demandent encore des adaptations indispensables de par la taille des bois à abattre. Les premiers essais de type petite guillotine sectionnant les perches et brins à la base augurent assez bien de l'évolution, mais ne répondent qu'aux exploitations des premières éclaircies dans les jeunes peuplements.

L'exploitation bois-énergie

- concerne principalement les petits bois vendus sur pied : l'agent responsable de la coupe (ou le propriétaire sylviculteur) doit en connaître les particularités pour prévenir les malentendus ;
- concerne aussi (voire incite à) la vente de produits façonnés, notamment pour des coupes hétérogènes : le forestier trie et vend prioritairement, au meilleur prix, les grumes et les bois d'industrie, le surplus (petits bois qui déprécieraient un lot de bois d'industrie) étant vendu au « mobilisateur » de plaquette.

Dans le même ordre d'idée, l'optimisation du débardage s'impose : c'est le premier axe de gain de temps, qui doit concerner tous les terrains et par tous les temps avec cette forte contrainte que, dans la plupart des cas, **le produit doit être exempt de terre ou de cailloux afin de ne pas abîmer les engins de broyage et de ne pas provoquer le dysfonctionnement des chaudières.** L'expérience suisse en matière d'extraction de houppier résineux avec un grappin scie sur le débardeur (6X8 ou 8X8) devrait faire école assez rapidement et son adaptation aux houppiers feuillus est en cours de perfectionnement. Le type de grappin et de grue demande quelques améliorations que les commerciaux des principales marques de matériel forestier devraient intégrer rapidement, en collaboration avec les exploitants (rapport poids/longueur, longueur des porteurs, système de maintien sur plate-forme...). Le portage par câble pourra être envisagé dans certains cas, surtout quand le prix du produit fini le permettra (Voir l'article « opportunités sylvicoles » de ce même dossier).

L'extraction des houppiers sur coupe de bois d'œuvre vient rajouter un problème jusqu'alors assez simplement géré par les gestionnaires, mais qui devra être entièrement revu par la logistique. Le commercial plaquette doit en effet pouvoir s'affranchir des contraintes des modes de ventes classiques, dont les clauses ne sont pas adaptées à la filière (priorité à la grume). Des essais de plus en plus nombreux de vente à l'unité de produit ou la prévente de bois façonnés montrent la complémentarité possible entre la grume et les plaquettes.

Broyer vert ou broyer sec

Les attentes des chaufferies en matière d'hygrométrie du combustible et la nécessité d'étaler les exploitations sur toute l'année pour satisfaire les besoins vont déterminer l'organisation de la transformation des produits. Deux grands axes se dessinent : le broyage frais ou le ressuyage sur coupe. Le broyage frais correspond à des produits qui :

- vont pouvoir être livrés en flux tendu à destination de grosses chaufferies supportant une hygrométrie supérieure à 40 % ;
- peuvent être stockés pour séchage sous hangar ou en tas bâchés ou compactés ;
- ne peuvent rester en forêt par manque de place ou parce que la place est « chère » (grumes prioritaires).

Le ressuyage sur coupe correspond à une organisation qui :

- laisse le temps de « voir venir » ;
 - fait apparaître la notion de gestion de stock. Ce ressuyage dure au minimum quelques mois et impose donc un suivi précis des exploitations pour savoir quels produits ont bénéficié d'un temps de séchage minimum et sont ainsi prêts pour le broyage avec livraison dans la foulée.
- Ces deux options sont contingentes par des nécessités techniques

telles que la qualité du broyage (le bois vert défibre plus que le sec), l'usure des disques ou des couteaux (le sec use plus que le vert), la granulométrie (le sec produit davantage de fines indésirables), le transport (le vert est moins encombrant, mais plus lourd). Se rajoutent à cela les caractéristiques intrinsèques de chaque essence et les variations d'humidité saisonnière en parties sommitales ou sur les tiges. Bien des recherches restent encore à effectuer dans ces deux domaines, la bibliographie en la matière est très succincte.

Importance de l'organisation logistique

En dernier lieu mais omniprésente et incontournable : la problématique logistique. Classiquement, deux grandes options au moins s'opposent pour les chaudières de grosses puissances supportant des hygrométries supérieures à 40 % :

- les livraisons à flux tendu issues de broyage de matière verte ou ressuyée, en forêt ;
- l'approvisionnement à partir de stocks sous hangar, bâches ou compactés.

L'expérience et l'analyse montrent un schéma beaucoup plus subtil où le panachage apparaît comme indispensable. Le cas des chaudières de faible puissance, qui semble

a priori dissociable car il nécessite dans tous les cas un temps de stockage/séchage, doit être lui aussi pris en compte dans le cadre de la gestion des stocks au niveau d'un bassin d'approvisionnement. Ainsi le gestionnaire d'approvisionnement devra suivre l'ensemble de ses flux et stocks pour pouvoir répondre à tout moment à des demandes variées. L'idéal sera ainsi de constituer des stocks :

- de matière verte sur pied à destination plaquette pour les années $n + 1$ ou mieux $n + 2$;
- de BTL (bois toute longueur) bord de route à hygrométrie contrôlée et pouvant être broyés à tout moment ;
- de BTL sur plate-forme proche des lieux de consommation avec éventuellement broyeur fixe ;
- de plaquettes sous hangars, bâchés ou compactés, qui constitueront le fond de roulement du fournisseur avec des hygrométries allant de 45 à 25 % pour pouvoir répondre instantanément aux attentes des clients.

Luc LIBAULT

ONF, DR Martinique
(ex responsable bois-énergie
Franche-Comté)
luc.libault@onf.fr



DMD, ONF 2003

broyage bord de route de rémanents pour l'alimentation de la chaufferie de Saulnot (71)



L.Descroix, ONF, 2006

Broyage sur plate-forme avant stockage sous bâche, à Saint Jean d'Arvey (38)

Comment choisir un itinéraire de production de plaquettes forestières ?

À la question rituelle « combien coûterait la plaquette forestière pour alimenter ma chaufferie », la seule réponse à faire a priori est... « je n'en sais rien ». Il n'existe pas un processus unique de production mais des processus qui peuvent se combiner pour déterminer finalement un coût de production et de commercialisation.

Résumé des phases principales de la production :

L'exploitation mécanisée ou manuelle des bois

Le ressuyage des produits sur coupe ou bord de route après débardage

En option, le transport de bois long sur un dépôt accessible en tous temps

Le broyage sur coupe ou bord de route ou sur dépôt

Le transport direct des plaquettes vers la chaufferie ou vers un site de stockage intermédiaire

Le cas échéant, reprise sur site de stockage et la livraison en chaufferie

Les paramètres qui conditionnent le choix d'un itinéraire de production :

Topographie de la parcelle à exploiter

Pour une **parcelle à plat ou de pente inférieure à 25 %**, la mécanisation peut intervenir à deux phases :

■ abattage mécanique avec dépôt des produits sur le cloisonnement ou en bordure

■ production des plaquettes sur la parcelle avec déchiqueteuse automotrice type Sylvatec et évacuation par porteur muni d'une benne.

Si le déchiquetage se fait bord de route, une pente < 30 % autorise l'évacuation des bois longs sur un porteur, évitant ainsi le débusquage par traînage susceptible de polluer les produits avec de la terre ou des cailloux.

Pour une **parcelle à très forte pente**, le développement des techniques et de matériels de débardage par câble permet de récupérer en bord de route ou piste une fraction conséquente de biomasse disponible pour le bois-énergie. La filière bois-énergie permet d'abaisser le coût d'exploitation puisque les bûcherons n'ont que l'abattage à faire sur la parcelle sans découpe fin bout pour séparer la grume du houppier.

Matériels de déchiquetage disponibles

Les engins automoteurs capables de déchiqueter sur coupe sont très peu présents en France pour l'instant contrairement aux pays nordiques. Leur coût, la nécessité d'exploiter des parcelles cloisonnées en pente faible et avec un volume par hectare conséquent en limitent l'utilisation. Pour l'instant, le processus de production développé par ONF Énergie implique uniquement des déchiqueteurs bord de route ou sur dépôt.

Flux tendu ou stockage intermédiaire

La livraison directe des plaquettes de la forêt à la chaufferie **en flux tendu** ne peut se faire que sous deux conditions :

■ chaudière acceptant des plaquettes à taux d'humidité jusqu'à 45 % ne nécessitant pas de séchage supplémentaire après ressuyage naturel ;

■ silo à grande capacité 700 à 800 m³ capable d'absorber la production quotidienne de la déchiqueteuse.

Seules les chaufferies industrielles d'une puissance supérieure à 5 MWh peuvent répondre à ces deux critères.

Remarques : 1 - il existe de grosses installations susceptibles d'approvisionnement en flux tendu sans ressuyage préalable, mais ce cas est très rare ; 2 - l'idée de panacher flux tendu et stock tampon (10 %) pour parer au risque de rupture d'approvisionnement est techniquement séduisante dans certains cas, mais présente l'inconvénient de majorer de plus de 20 % le coût des plaquettes transitant par la plate-forme.

Sauf cas particulier de bois sec disponible (résineux scolytés...), le **stockage intermédiaire** est indispensable pour sécher les plaquettes à un taux d'humidité de 25-30 % afin d'alimenter les petites chaufferies ou des chaufferies moyennes à faible capacité de stockage.

Dans le premier cas, le stockage se fait sous hangar aéré ou sous bâche évapo-transpirante, modalités utilisées aujourd'hui pour les approvisionnements faits par ONF Énergie. Dans le second, il est possible de constituer des cônes de fermentation à l'air libre qui doivent être de volume conséquent pour fonctionner correctement.

Les modalités de livraison

La capacité de stockage des silos attenants aux chaufferies et leur accessibilité déterminent le mode de transport adéquat. Dans l'hypothèse la plus favorable, la livraison se fait par camion à fond mouvant d'une capacité de 90 m³. La plupart des chaufferies nécessitent des livraisons par bennes ampliroll de 30 à 40 m³.

Bois-énergie : maîtriser les impacts

S'il est d'une brûlante actualité, le bois-énergie n'est pas une nouveauté. Souvenons-nous : les débuts de l'ère industrielle, la surexploitation des taillis, la dégradation sévère et persistante des sols fragiles... Raisonons aujourd'hui en termes de gestion durable et préservons, entre autres, les sols.

Le développement du bois-énergie est une opportunité exceptionnelle de valorisation de bois d'éclaircie, de rémanents d'exploitation, de bois mitraillés ou encore de produits connexes de scierie. Il représente une source d'énergie plus « propre » vis-à-vis de l'effet de serre que le carbone fossile.

L'intensification correspondante de l'exploitation doit toutefois être conduite avec discernement afin de préserver la fertilité des sols et la pérennité des écosystèmes. Les pièces de faible section (rémanents, branches, perches...), ainsi que les feuillages, concentrent une grande quantité d'éléments nutritifs et leur prélèvement sans discernement peut notamment entraîner une perte de fertilité voire des carences minérales. Il est donc indispensable de moduler l'intensité des récoltes en fonction de la richesse minérale du sol.

Fertilité des sols et sensibilité des écosystèmes aux exploitations forestières

Les éléments nutritifs majeurs :

- N = azote
- P = phosphore
- K = potassium
- Ca = calcium
- Mg = magnésium

Le sol est le réservoir d'eau et d'éléments nutritifs (éléments majeurs : N, P, K, Ca, Mg) qui alimente l'écosystème forestier. Le stock d'éléments nutritifs biodispo-

nibles, c'est-à-dire absorbables par les racines, constitue une faible partie du stock total contenu dans le sol. Il correspond le plus souvent à quelques dizaines d'années voire quelques années de prélèvement par les racines. Il se renouvelle toutefois rapidement par décomposition de la litière et des racines mortes. Les éléments minéraux circulent ainsi dans l'écosystème suivant un cycle rapide et efficace (successivement dans le sol, l'arbre, les feuilles, la litière et à nouveau dans le sol). Cela permet à l'écosystème de vivre avec une réserve limitée d'éléments nutritifs malgré les besoins importants des arbres. Le revers de cette efficacité est la relative vulnérabilité de la forêt aux perturbations du processus de recyclage des éléments nutritifs.

Le cycle n'est cependant pas fermé et des éléments nutritifs entrent et sortent de l'écosystème forestier selon les types de flux suivants (figure 1) :

- les apports atmosphériques ;
- les apports par altération des minéraux contenus dans le sol (sauf pour l'azote), faibles sur des roches mères pauvres, siliceuses, comme les grès, mais importants sur les roches calcaires, les basaltes ou même certains granites par exemple ;
- les pertes par drainage vers les eaux souterraines ;
- les pertes par exportation (exploitation forestière principale).

Si le bilan de ces flux est négatif, le stock d'éléments biodisponibles

du sol s'amenuise et, à terme, des carences peuvent apparaître. La capacité d'un écosystème à supporter des exportations soutenues dépend donc des apports qu'il reçoit.

Les apports atmosphériques sont principalement des dépôts associés à la pluie, au brouillard et aux poussières en suspension dans l'air. Ils peuvent localement fournir des quantités importantes d'éléments nutritifs mais de manière très variable sur le territoire, suivant les courants atmos-

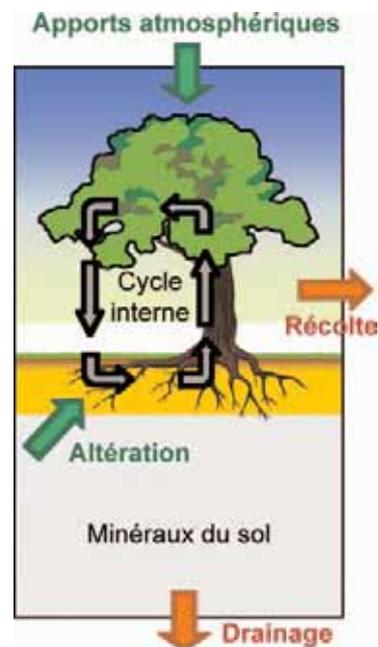


Fig. 1 : les éléments nutritifs dans l'écosystème forestier

Appports extérieurs en vert (altération des minéraux du sol, apports atmosphériques), pertes en rouge (drainage, exportation par récolte de bois et autres produits forestiers) et cycle interne en gris (absorption par les arbres, stockage dans les tissus végétaux, décomposition des litières, du bois et des racines)

phériques, la proximité de la mer, la proximité d'industries ou de zones d'épandage agricole par exemple. En outre, quand ils ne sont pas fixés par la végétation ou le sol (notamment hors période de végétation), certains dépôts, tels les nitrates, peuvent être drainés et appauvrir le sol en entraînant avec eux d'autres éléments nutritifs (Ca, Mg, K) (voir Croisé *et al.*, 2005, Rendez-Vous Techniques n° 7).

La fixation d'azote atmosphérique par certains micro-organismes entre également dans cette catégorie des apports atmosphériques. Plusieurs espèces végétales comme l'aulne ou le robinier sont capables de développer amplement l'activité de tels micro-organismes fixateurs d'azote. Ce n'est toutefois pas le cas des essences forestières les plus répandues sur notre territoire.

Les apports atmosphériques ont donc des effets complexes, variables et parfois négatifs, sur la nutrition minérale des arbres. Ils ne permettent généralement pas de compenser de fortes exportations d'éléments nutritifs dues à l'exploitation forestière.

L'altération des minéraux est le principal facteur de richesse chimique des sols. Elle peut libérer de grandes quantités d'éléments nutritifs sous forme biodisponible mais cet apport varie bien sûr énormément selon les minéraux en présence. Les forêts sont généralement situées sur des sols peu propices à l'agriculture : sols calcaires très caillouteux ou peu profonds et sols acides sur roches siliceuses (granites, grès, quartzites...) notamment.

Les roches calcaires contiennent une réserve importante d'éléments nutritifs (excepté l'azote) et leur altération peut facilement reconstituer le stock d'éléments biodisponibles.

En revanche l'altération des roches siliceuses alimente lentement ce stock. Les écosystèmes forestiers sur sols acides sont donc beau-

coup plus sensibles aux pertes d'éléments nutritifs dues à l'exploitation forestière.

L'intensification des exploitations sans discernement peut menacer la fertilité des sols

Nous l'avons vu, une exploitation forestière intensive peut entraîner un appauvrissement rédhibitoire du sol. Par exemple, de nombreux sols forestiers de l'Ouest de la France et du Massif Central ont été dégradés à la suite d'exploitations trop fréquentes de taillis pour l'alimentation des forges et des verreries (rotations de l'ordre 7 et 10 ans).

Rémanents = ensemble des pièces de bois laissées sur coupe après exploitation.

Le développement du bois-énergie sous la forme de plaquettes valorise notamment des produits forestiers de faibles dimensions

(rémanents, branches, perches...) délaissés par les filières d'industrie et bois-bûche. Quelle que soit l'essence, ces produits de faibles sections, ainsi que les écorces et plus encore le feuillage, sont très riches en éléments nutritifs par rapport au bois de tronc, alors qu'ils ne représentent qu'une faible part de la biomasse de l'arbre (figure 2). Ces produits se décomposent en outre rapidement (figure 3), ce qui les place au cœur des processus de recyclage naturel des éléments nutritifs et de maintien de la fertilité des sols.

Les études menées par l'Inra sur le site de Vauxrenard (voir encadré) ont permis de quantifier l'appauvrissement que peut engendrer la récolte des branches et des feuillages en plus des troncs sur des sols sensibles. Outre l'exemple de Vauxrenard, des travaux de recherche ont été conduits sur d'autres sites en France, en Europe et dans le monde, sur d'autres peup-

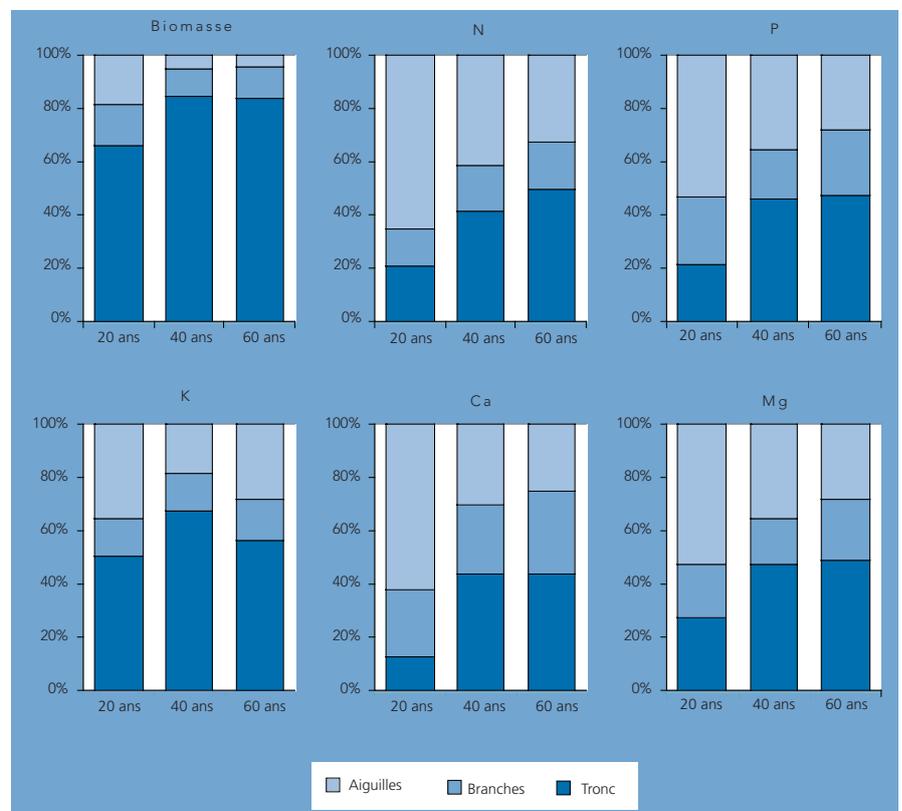


Fig. 2 : répartition de la biomasse et de la minéralomasse (N, P, K, Ca, Mg) entre le tronc, les branches et les aiguilles des douglas de 20, 40 et 60 ans de Vauxrenard (Marques, 1996)

Si les aiguilles et les branches constituent une faible biomasse, elles contiennent la majeure partie des éléments nutritifs des arbres.

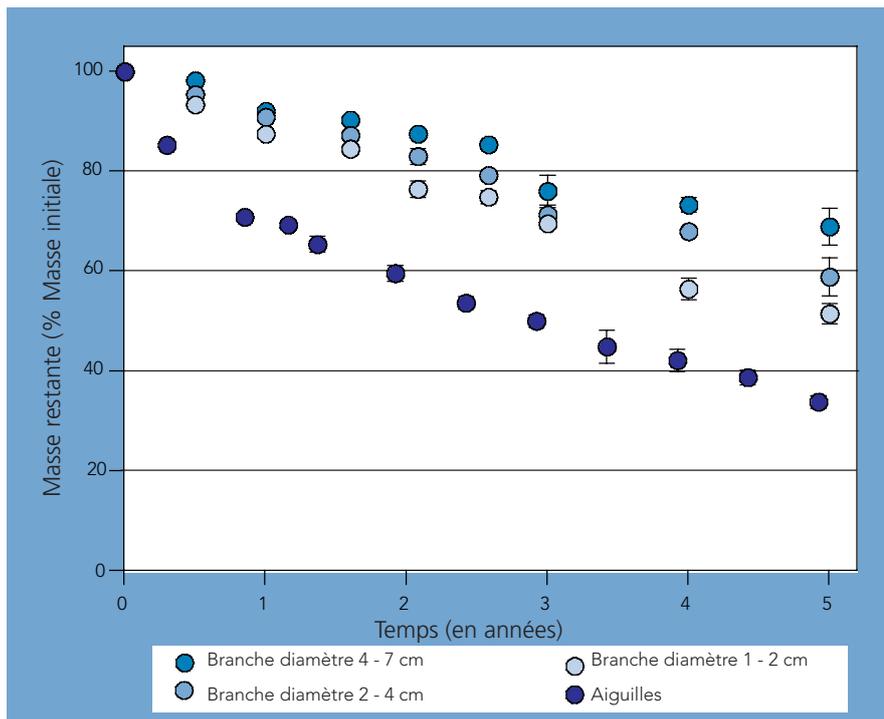


Fig. 3 : évolution sur 5 ans de la masse d'un échantillon d'aiguilles et de branches sur le sol des plantations de douglas de Vauxrenard (Zeller, Inra Nancy)

Les aiguilles et les branches fines se décomposent et restituent plus vite au sol les éléments nutritifs qu'elles contiennent que les grosses branches et a fortiori les troncs.

ments (épicéa, hêtre, pin maritime, taillis divers, eucalyptus...). A la lumière de l'ensemble des connaissances acquises, l'exploitation de rémanents ou d'arbres entiers ne devrait pas être envisagée sur des sols pauvres sans fertilisation compensatoire.

Autres impacts de l'intensification des exploitations forestières

L'intensification des exploitations forestières peut aussi entraîner un tassement et une érosion des sols plus importants, par des passages plus fréquents d'engins ou de remorques ainsi que par l'exploitation de branchages qui pourraient servir à protéger les cloisonnements parcourus. Il est donc très important de veiller aux modalités d'exploitation en fonction de la sensibilité des sols au tassement et à l'érosion (voir le

dossier sur les tassements de sol, Rendez-Vous Techniques n° 8, printemps 2005).

L'exploitation trop intensive des rémanents peut nuire à la biodiversité en réduisant les cortèges de décomposeurs ainsi que les habitats propices au développement de certaines espèces végétales comme les bryophytes ou à la nidification de certains oiseaux ou rongeurs (voir encadré).

La récolte des rémanents peut toutefois présenter certains avantages, tels que la réduction de la sensibilité des forêts aux incendies.

Site expérimental de l'INRA à Vauxrenard (d'après Ranger et al., 2002)

Localisation : Monts du Beaujolais (Département du Rhône)
 Altitude : 750 m
 Précipitations moyennes : 1 000 mm/an
 Température moyenne annuelle : 7 °C
 Sol : Allocrisol typique sur tuf
 Forme d'humus : eumoder à dysmoder
 Horizon A : pH = 4,3
 Peuplement en 1992 : plantations de douglas de 20, 40 et 60 ans sur anciennes terres agricoles
 Hauteur moyenne à 60 ans : 36 m



Le site de Vauxrenard a été étudié de 1992 à 1998. C'est un des rares sites en France sur lesquels ont été mesurés les principaux flux d'éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) entrant (apports atmosphériques, altération minérale) et sortant (pertes par drainage, exportations dues aux exploitations) de l'écosystème.

Le pH de l'horizon A et la forme d'humus décrite permettent de placer son sol dans la classe de forte sensibilité de la typologie du guide publié par l'Ademe.

Les mesures de biomasse et de minéralomasse (N, P, K, Ca, Mg) aux trois âges de plantation ont permis d'évaluer les exportations engendrées par l'exploitation selon 3 durées de révolution et 2 intensités de prélèvement (tableau A). On en déduit dans chaque cas la quantité d'éléments minéraux nécessaire à la production d'une tonne de biomasse (tableau B).

On observe globalement que le prélèvement des branches et des aiguilles accroît considérablement les exportations d'éléments minéraux, et ce d'autant plus qu'on exploite des arbres jeunes. Par contre les branches et les aiguilles offrent peu de biomasse à exploiter.

.../...

Mode d'exploitation	Révolution	Biomasse exportée (t/ha/an)	Exportations minérales (kg/ha/an)				
			N	P	K	Ca	Mg
Tronc seul	60 ans	6,7	6,7	0,5	3,3	4,4	0,6
	40 ans	6,6	7,0	0,5	6,4	3,6	0,7
	20 ans	3,3	4,7	0,4	6,0	1,7	0,5
Arbre entier	60 ans	8,0	14,2	1,2	5,7	10,8	1,2
	40 ans	7,8	16,6	1,2	9,5	9,2	1,4
	20 ans	5,0	22,2	1,6	11,9	13,1	1,9

Tab. A : exportations de biomasse et de minéralomasse selon la durée de révolution (éclaircies comprises) et le mode d'exploitation (arbre entier = tronc + branches + aiguilles)

Mode d'exploitation	Révolution	Efficience de production (t de biomasse/kg d'élément)				
		N	P	K	Ca	Mg
Tronc seul	60 ans	1,0	12,3	2,0	1,5	11,6
	40 ans	1,0	12,2	1,0	1,8	10,0
	20 ans	0,7	9,1	0,5	1,9	6,3
Arbre entier	60 ans	0,6	6,8	1,4	0,7	6,7
	40 ans	0,5	6,4	0,8	0,9	5,6
	20 ans	0,2	3,2	0,4	0,4	2,7

Tab. B : efficience de production (tonnes de biomasse produites par kg d'élément) selon la durée de révolution (éclaircies comprises) et le mode d'exploitation

	Profondeur de sol considérée	Mode d'exploitation	(kg/ha/an)				
			N	P	K	Ca	Mg
Apports atmosphériques			20,3	1,0	3,2	7,3	1,1
Altération	60 cm		0	0	7,5	0,9	1
	120 cm		0	0	14	1,8	2,5
Drainage			21,3	0,3	13,2	13,5	5,0
Exportation		Tronc seul	6,7	0,5	3,3	4,4	0,6
		Arbre entier	14,2	1,2	5,7	10,8	1,2

Tab. C : termes du bilan minéral pour une révolution du peuplement de 60 ans (éclaircies comprises)

Profondeur de sol considérée	Mode d'exploitation	Bilan minéral (kg/ha/an)				
		N	P	K	Ca	Mg
60 cm	Tronc seul	-7,7	0,2	-5,8	-9,6	-3,5
	Arbre entier	-15,2	-0,5	-8,3	-16,1	-4,1
120 cm	Tronc seul	-7,7	0,2	0,7	-8,7	-2,0
	Arbre entier	-15,2	-0,5	-1,8	-15,2	-2,6

Tab. D : bilan minéral calculé pour une révolution du peuplement de 60 ans (éclaircies comprises) selon le mode d'exploitation et la profondeur de sol considérée

En conséquence, l'efficience de production de biomasse par kg d'éléments exportés se révèle bien moindre dans le cas de l'exploitation en arbres entiers (tableau B).

Considérons les autres flux extérieurs de l'écosystème étudié à Vauxrenard (tableau C) :

■ L'altération des minéraux du sol fournit peu d'éléments biodisponibles, notamment très peu de calcium et de magnésium. Le sol s'est en effet développé sur du tuf, une roche mère volcanique acide. L'évaluation des apports par altération dépend certes de la profondeur de sol considérée mais ces apports restent faibles en calcium et magnésium même sur une profondeur de 1,20 m.

■ Les apports atmosphériques sont très importants. En azote, ils s'élèvent notamment à 20 kg/ha/an, ce qui correspond au double de la moyenne enregistrée sur le réseau Renécofor. Les Monts du Beaujolais, comme l'ensemble de la vallée de Rhône ou encore les Vosges ou les Ardennes, subissent en effet les apports atmosphériques d'azote les plus importants en France métropolitaine.

■ Les pertes par drainage sont également très importantes, en lien avec les forts dépôts d'azote atmosphériques qui ne sont pas entièrement fixés dans l'écosystème par le sol ou par la végétation. Par ailleurs le douglas semble stimuler la minéralisation d'azote sous forme de nitrates, très mobiles dans le sol, et augmenter ainsi les pertes d'éléments nutritifs par drainage.

En faisant le bilan de ces flux (bilan = apports - pertes), on constate que les exportations d'éléments nutritifs liées à la récolte de biomasse jouent un rôle important. A Vauxrenard (tableau D), dans le meilleur des cas (en exploitant les troncs seuls et en considérant le sol sur 1,20 m de profondeur), l'écosystème est déjà en situation d'appauvrissement, en particulier en azote et en calcium. Le passage à l'exportation d'arbres entiers hors de la parcelle aggrave encore considérablement cette situation d'appauvrissement.

Il y a en France beaucoup de sols encore plus pauvres que ceux étudiés à Vauxrenard, notamment dans les Landes, les Vosges ou en Sologne. Mais, comme l'indique bien le guide de l'Ademe, ces sols de Vauxrenard se classent déjà comme fortement sensibles aux exportations d'éléments nutritifs et ne peuvent supporter aucune récolte de rémanents ou d'arbres entiers sans fertilisation compensatoire.

Le bois-énergie et la préservation de la biodiversité des forêts

Les forêts publiques qui sont souvent des forêts « anciennes » (c'est à dire à l'état de peuplements d'arbres depuis plusieurs siècles) abritent des espèces d'insectes et de champignons liés au bois mort de plus en plus rares en Europe (Brustel, 2001). L'ONF a donc une responsabilité particulière – pas seulement dans les réserves et les sites Natura 2000 – de conservation de ces espèces et donc de leur support de vie qu'est le bois mort.

L'écosystème forestier est constitué de producteurs (dont les plus visibles sont les arbres) et de décomposeurs de la matière organique. Les feuilles sont décomposées par une multitude d'organismes du sol (vers, bactéries, champignons...). Le bois mort, aérien ou au sol, est attaqué par les organismes saproxylophages au rang desquels figurent les larves des insectes saproxyliques. Par ailleurs, les vieux arbres sont souvent porteurs de cavités créées par les attaques de champignons au niveau des blessures des branches ou du tronc ou creusées par les pics. Ces cavités abritent de nombreuses espèces cavicoles pour leur reproduction ou l'abri (oiseaux comme les mésanges, le pigeon colombin, les chouettes, chauves-souris, loirs, insectes comme les abeilles, les frelons).

La récolte de bois pour l'énergie doit être raisonnée en veillant à préserver la biodiversité forestière. Elle devra donc épargner le bois mort ancien ainsi que les arbres à vocation biologique et prévoir la conservation sur le parterre de la coupe d'une partie des produits frais : il s'agit en effet de conserver le support de vie mais aussi de permettre un réapprovisionnement continu en bois mort de différentes tailles et d'essences variées au profit des espèces qui dépendent de ce matériau (ONF Bourgogne, 2003). Les rémanents conservés ont de plus un rôle dans la protection des graines, des semis et du sol dans ses caractéristiques physiques et chimiques (comme écrit dans l'article) mais aussi biologiques. Il faudra également veiller à ne pas perturber les espèces (oiseaux, mammifères) en période de reproduction, ni détruire les stations d'espèces végétales rares.

Jean-Marc Brézard (ONF)

Un outil simple et pratique : le guide de l'Ademe pour la récolte raisonnée des rémanents en forêt

Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
 Afocel : Association forêt cellulose
 IDF : Institut pour le développement forestier
 Inra : Institut national de la recherche agronomique
 UCCFF : Union de la coopération forestière française

Dans la perspective du développement du bois-énergie, l'Ademe a publié un guide pratique de gestion des rémanents (Cacot et al., 2006) destiné aux propriétaires et gestionnaires forestiers et librement téléchargeable sur Internet (liens donnés en références). Ce guide a été élaboré en partenariat avec l'Afocel, l'IDF, l'Inra, et l'UCCFF après un travail de synthèse bibliographique (Cacot et al., 2003), l'objectif étant de disposer d'outils pour raisonner l'intensité des prélèvements en fonction des potentialités des sols. Il est composé d'une typologie de sensibilité des sols en fonction de leur fertilité, puis de conseils pour la récolte des rémanents selon les classes de sen-

sibilité des sols et les types de peuplements.

■ **La typologie de sensibilité des sols** (figure 4) est simple d'utilisation. Elle distingue 3 niveaux de sensibilité avec plusieurs indicateurs possibles de diagnostic (texture du sol, forme d'humus, pH de l'horizon A, effervescence de la terre fine à l'acide, flore indicatrice). C'est donc un outil très pratique qui peut être mis en œuvre avec des connaissances rudimentaires en botanique ou pédologie. Il permet de repérer efficacement les situations à risque.

■ **Les conseils** se traduisent en pratique par un nombre de récoltes de rémanents à ne pas dépasser durant la vie du peuplement ou par un laps de temps minimum à respecter entre deux récoltes des troncs avec les branches pour les taillis, en fonction de la sensibilité du sol et du type de peuplement. Si l'exploitation dépasse ces limites, le guide préconise de fertiliser pour compenser les pertes en éléments nutritifs. Les doses de fertilisant (N, P, K, Ca, Mg) sont indiquées à cet effet pour une récolte supplémentaire de rémanents.

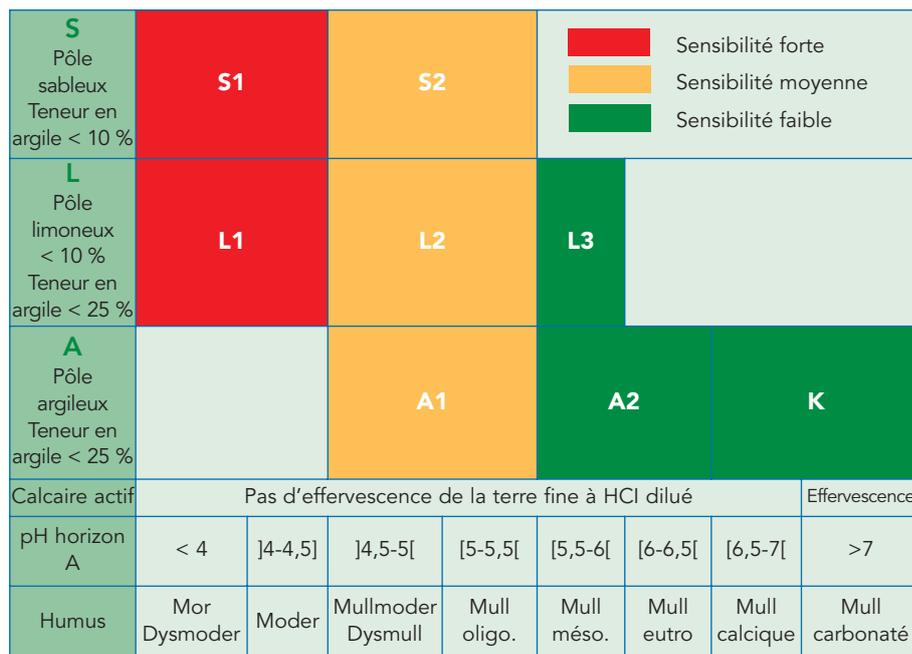


Fig. 4 : diagramme de sensibilité des sols en fonction de la texture et du niveau trophique (Ademe, 2006)

Dans tous les cas, quelle que soit la richesse de la station, il est recommandé de ne pas dépasser deux récoltes de rémanents dans la vie du peuplement.

Il est en outre recommandé que les rémanents sèchent sur le parterre de la coupe pendant quelques mois, ce qui permet d'éviter de prélever le feuillage, particulièrement riche en éléments nutritifs et sans utilité au titre de la production d'énergie.

Le guide suit donc une démarche de bon sens de maintien de la fertilité des sols :

- adapter l'intensité des prélèvements aux réserves nutritives des sols,
- compenser si nécessaire par fertilisation les exportations dues à l'exploitation.

Le partenariat initié entre l'Ademe, l'Afocel, l'Inra, l'IDF, l'UCFF et l'ONF se poursuit actuellement par l'étude précise des exportations minérales sur divers chantiers de production de plaquettes.

La production raisonnée de bois-énergie par l'ONF

Les connaissances de base étant posées, les développements qui suivent présentent la position de l'ONF.

L'établissement s'est engagé dans une politique volontariste en matière de production de bois-énergie. Il accompagne ainsi résolument la politique nationale de développement des énergies renouvelables et profite en outre de cette opportunité pour résoudre des problèmes récurrents (réalisation de premières éclaircies par exemple).

La récolte de bois-énergie doit bien entendu être effectuée de manière raisonnée, dans une perspective de gestion durable des sols. Cette mesure de bon sens fait d'ailleurs partie des engagements pris par l'ONF au titre de sa certifi-

cation ISO 14 001 à travers sa politique environnementale.

La position de l'Office, présentée dans la note de service n° 06-T-254, peut être résumée comme suit.

■ On aura recours à la méthode diagnostique du guide Ademe pour identifier le niveau de sensibilité des sols et adapter en conséquence les prélèvements de bois de faibles dimensions. On cherchera à valoriser les typologies et cartes de stations existantes qui peuvent faciliter la démarche diagnostique.

■ L'Office exclut le recours à la fertilisation pour compenser une exportation importante d'éléments nutritifs. La récolte doit donc être raisonnée en conséquence. La décomposition des rémanents et autres petits produits forestiers demeure en effet le meilleur processus de restitution aux sols de leurs éléments nutritifs.

Localement, l'ONF peut être en situation de gérer aussi des peupleraies et des taillis à courte révolution. Ces systèmes de culture intensifs dérogent bien entendu aux dispositions générales que nous venons d'exposer.

A ce stade il est nécessaire d'apporter des précisions sur deux sujets : la nécessaire distinction entre l'amendement et la fertilisation, et l'épandage de cendres de bois en

tant que fertilisation compensatoire. Sauf cas particulier de système de culture intensif, l'Office n'envisage pas le recours à la fertilisation pour augmenter artificiellement la fertilité d'une station ou compenser des exportations minérales excessives. La position est différente pour l'amendement, qui est un apport beaucoup plus limité, visant à améliorer le fonctionnement du sol à moyen terme sans modifier substantiellement la station. L'amendement mériterait d'être développé dans certaines situations : pour restaurer le fonctionnement de sols dégradés par des pratiques sylvicoles anciennes trop intensives, éviter des problèmes sanitaires liés à des carences minérales ou y remédier, corriger des situations d'acidification des sols et des cours d'eau qui posent problème (cas de certains bassins versants des Vosges par exemple). L'amendement devrait enfin permettre de corriger certaines situations de fragilité et d'améliorer la résistance aux stress climatiques qui risquent probablement de se multiplier à l'avenir. Là également, de telles dispositions devront être mises en œuvre de manière raisonnée. En partenariat avec l'Inra, le département recherche élabore un outil d'aide à la décision à cet effet.

L'épandage de cendres de bois, pratiqué en Finlande en particulier, est une solution alternative parfois évoquée pour restituer au sol les éléments nutritifs. En première analyse, cette formule n'est pas envisagée par l'établissement. En effet, ce mode de compensation ne restitue au sol ni l'azote ni le phosphore ni les matières organiques, entièrement transformés en gaz lors de la combustion du bois. Les cendres n'ont pas non plus les qualités des rémanents quant au maintien de l'humidité du sol ou à la protection des semis contre le gibier. Le développement d'une pratique d'épandage de cendres en forêts pourrait inciter des industriels peu scrupuleux à se débarrasser ainsi de cendres d'incinérateurs

Fertilisation ≠ Amendement

Il existe différentes approches d'apports d'éléments nutritifs au sol, selon le but visé et la forme des éléments apportés.

La **fertilisation**, entendue comme l'apport d'engrais, donc d'éléments rapidement assimilables par les arbres, a pour but d'accroître à court terme la production de bois.

L'**amendement** vise à améliorer à long terme le fonctionnement biologique et les propriétés physiques du sol par un apport de particules minérales grossières (concassé de calcite, de dolomite...), qui se dissolvent et libèrent lentement les éléments

en tous genres. Serait-on en mesure de contrôler les cendres épandues pour vérifier qu'il s'agit bien de cendres de bois et non de cendres de déchets ménagers, qui contiennent de fortes teneurs en métaux ? Actuellement, même si elle reste floue à ce sujet, la réglementation ne semble pas autoriser les épandages de cendres en forêt. Seules des expérimentations sont conduites sous la surveillance des autorités publiques pour étudier les impacts de tels épandages.

Identifier les zones à risque

L'identification des situations à risque doit être faite à plusieurs échelles. La démarche que nous avons présentée permet d'établir un diagnostic au niveau local. Il était nécessaire d'apporter, sous forme de cartes, un éclairage sur les secteurs plus ou moins sensibles, à une échelle régionale ou nationale. Voici le résultat de deux approches.

A l'échelle nationale, un groupe d'experts et de chercheurs particulièrement impliqués dans la gestion des sols, a réalisé une première carte qu'il présente ici en encadré.

Des recherches conduites par le Lerfob (Laboratoire d'étude des ressources forêt bois, unité mixte de recherche Engref / Inra) avec le concours de l'ONF, permettent d'envisager de cartographier certaines caractéristiques du sol, notamment l'acidité (pH de l'horizon de surface), à partir de relevés de la flore spontanée. La méthode est quasiment validée pour des cartes à petite échelle à partir des données de flore de l'Inventaire Forestier National (IFN). Nous restituons ainsi (figure 5) une carte des classes de pH des sols du quart Nord Est, correspondant aux classes de sensibilité du guide Ademe pour l'exploitation du bois-énergie, établie à partir des données de l'IFN et de la base de données Ecoplant du Lerfob.

Carte de sensibilité des sols de France aux exportations minérales,

par Alain Brêthes (ONF), Jean-Paul Party (Sol-Conseil), Jean-Claude Gégout (Engref), Etienne Dambrine (Inra), Manuel Nicolas (poste d'interface Inra – ONF sur la gestion des sols)

La carte présentée a été réalisée à partir de la typologie de sensibilité des sols du guide de l'Ademe appliquée aux connaissances des sols de France – Carte des sols de France (Inra, 1968), carte géologique de France (BRGM, 1996), carte des classes d'altération des matériaux géologiques et des sols du territoire français (Party, 1999). Elle repose par ailleurs sur l'expérience des auteurs en pédologie et en écologie. Son but est de fournir aux gestionnaires forestiers une indication générale sur la répartition en France des sols peu, moyennement et très sensibles aux exportations minérales. Des indications de sensibilité des sols au tassement sont aussi données dans la légende. Il convient également pour les gestionnaires de tenir compte de la sensibilité des sols à l'érosion, notamment sur pentes fortes.

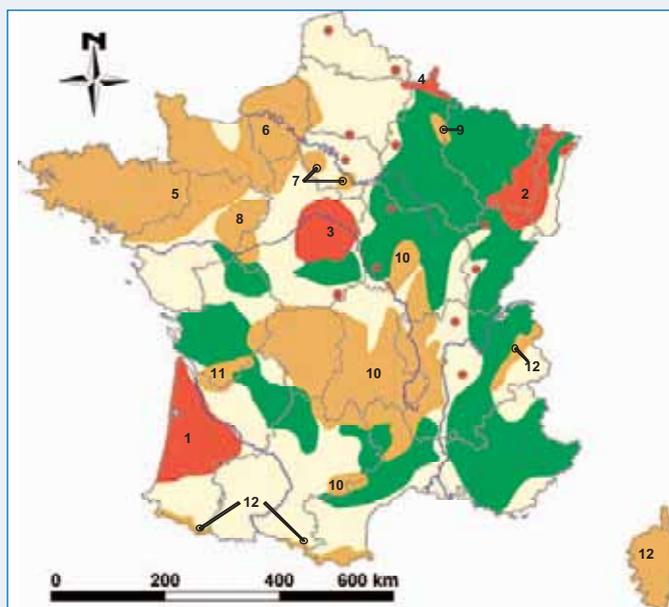
Des limites doivent cependant être observées dans l'utilisation de cette carte. On ne peut pas en déduire la sensibilité des sols d'une parcelle forestière par simple localisation dans une zone renseignée, et ce pour plusieurs raisons. Nous tenons tout d'abord à souligner :

- que cette carte a été réalisée à l'échelle nationale,
- qu'elle n'est pas exhaustive (certaines zones ne sont pas renseignées),
- que les contours des zones renseignées ne sont pas définis précisément.

D'autre part l'état de la science concernant la sensibilité des sols aux exportations minérales admet des incertitudes. Par exemple, il est difficile de déterminer les réserves des sols en phosphore disponible pour les arbres et donc de définir la sensibilité des sols aux exportations de cet élément.

Il reste donc indispensable d'appuyer un diagnostic de sensibilité des sols sur des observations de terrain. Il faut aussi noter à ce propos que les anciennes terres agricoles peuvent présenter une richesse trompeuse, issue de fertilisations passées, et masquant une réelle sensibilité aux exportations minérales due à la pauvreté de la roche-mère.

Cependant cette carte à l'échelle de la France peut aider les gestionnaires comme l'ONF à cibler leurs efforts de développement du bois-énergie dans les grandes zones de sols peu sensibles.



Commentaire de la carte

N°	Désignation	Géologie	Exemples indicatifs	Sensibilité aux exportations minérales	Sensibilité au tassement
FORÊTS TRÈS SENSIBLES AUX EXPORTATIONS MINÉRALES					
1	Landes	Sables		forte	faible (sauf pour limons aux marges des Landes)
2	Vosges et Forêt de Haguenau	Grès vosgiens		forte	faible
		Autres grès		modérée	modérée
		Granites et gneiss		modérée à forte	faible à modérée
		Alluvions anciennes	Forêt de Haguenau	forte	faible
3	Orléans et Sologne	Formations à sables du Pays Fort		forte	faible
		Sables et argiles de Sologne	Forêt d'Orléans	forte	modérée à élevée (sables très fins hydromorphes sur limons)
4	Ardenne primaire	Schistes		forte	modérée à forte (selon la charge en cailloux)
FORÊTS À SENSIBILITÉS MÉLANGÉES					
5	Bretagne et Normandie armoricaine	Grès et granites	Forêts d'Ecoves, Persigne, Ardennes	forte	faible (sables)
		Schistes du Permien		modérée	modérée (limons avec sables ou fragments de schistes) à élevée (limons)
		Autres schistes	Forêt d'Ecoves	forte	modérée (limons avec sables ou fragments de schistes) à élevée (limons)
6	Normandie	Formations à sables et sablonneux	Forêt de Montfort sur Rielle, forêts sur sables du Perche	forte	faible
		Limons	Forêt d'Eu, d'Evry, de Lyons	modérée	forte
		Alluvions anciennes	Forêt de Bard-Leuvrier	forte	faible (sables) à modérée (sables limoneux)
7	Rambouillet et Fontainebleau	Sables et sables limoneux		forte	modérée à forte (sables soufflés)
		Limons sableux	Forêt de Rambouillet	forte	forte
		Alluvions anciennes		forte	faible
		Calcaire		faible	faible
8	Maine-Anjou	Sables de la Loire et du Maine	Forêt de Marnac	forte	faible
		Limons		modérée	modérée à forte
9	Argonne	Graze	Forêt de Grand Pays	modérée à forte	forte
10	Massif Central	Roches volcaniques basiques	Puy, Cantal, Aubrac, Velay, Forêt de la Comté	faible	faible à modérée
		Roches volcaniques acides (bf, rhyolites, granites, gneiss)	Monts, Monts du Forez, Lurdaois, Plât, Haut Vivarais, Cévennes, Margeride, Millevache, Monts du Lyonnais, Monts du Beaujolais, Montagne Noire	modérée à forte	faible à modérée
		Schistes	Forêt des Avant-Monts	faible à modérée	modérée à forte (selon la charge en cailloux)
		Plaines	Limagne, vallée de la Loire (Forez)	modérée	forte
11	Formations tertiaires du Périgord et de la Châtagneraie limousine	Sables sur argiles sableuses	Plateaux du Périgord Blanc	modérée à forte	modérée à élevée (sables hydromorphes sur argiles)
		Argiles sableuses en bord de plateaux	Bords des plateaux du Périgord Blanc	modérée	modérée
		Granites et schistes	Périgord vert, Châtagneraie limousine	forte	modérée (sables limoneux)
12	Alpes, Pyrénées et Côte	Granites, gneiss et micaschistes	Belledune, Grand Arc, Massif de Chamoni, Ostaï, Gavarny, Camgou, etc.	modérée	faible mais érosion forte
		Autres formations		faible	faible mais érosion forte
ZONES LIMONEUSES					
	Hautes plaines des Flandres, Thiérache, Vain, Vieille France, Gise, Montagne de Reims, Gâtinais et Champagne humide, Nivernais, Borschaot, Vège, Sundgau, Forêt de Chaux, Bresse et Combe, Bas Dauphinois - Chambaran, Collines du Gers (Boublines)			faible à modérée	forte
FORÊTS PEU SENSIBLES SUR ROCHE CALCAIRE					
	Plateaux calcaires du quart Nord-Est, Plaine d'Alsace et collines sous-vosgiennes, Jura, Alpes orientales, Apes du Sud, grands causses, plateaux calcaires et collines du Sud-Ouest			faible	faible
ZONES NON RENSEIGNÉES					

L'interprétation de ces cartes est bien sûr à faire en fonction de leur échelle. Elles donnent une indication sur la fréquence des situations à risque.

On observe qu'une proportion importante des forêts est située sur des sols fortement ou moyennement sensibles, au sens du guide Ademe.

Une part également importante des forêts est située sur des sols calcaires, peu sensibles à la fois aux exportations minérales et au tassement. C'est en priorité dans cette situation, assez largement répartie sur le territoire, qu'une intensification de l'exploitation devrait pouvoir être envisagée.

Adapter l'exploitation

Sur la base des recommandations du guide Ademe, les dispositions générales prises par l'Office amènent à adapter l'exploitation en limitant le nombre de récoltes rémanents ou d'arbres entiers dans la vie du peuplement et en respectant un laps de temps minimum entre deux récoltes d'arbres de taillis avec leurs branches. Le tableau 1 synthétise ces mesures suivant la sensibilité du sol et le type de peuplement.

L'application de ces préconisations est maintenant à réfléchir. La limite du nombre de récoltes de rémanents ou d'arbres entiers dans la vie du peuplement nécessite notamment une bonne mémoire de la gestion. Les suggestions qui suivent à ce sujet n'engagent à ce stade que leurs auteurs et devront être précisées.

Il semble avant tout primordial de conserver une trace de ces exploitations complètes dans le sommier de la forêt. Ensuite il conviendrait de cadrer cette intensification des récoltes en adoptant un mode et une fréquence d'exploitation par type de peuplement.

En futaie régulière, il serait préférable de fixer ces prélèvements exceptionnels à un stade de la vie du peuplement où ils présentent des avantages particuliers, *a priori* soit à un stade jeune soit au moment de la récolte finale :

- une première éclaircie, ou même un dépressage ou une ouverture de cloisonnement, peut être amortie en valorisant de petits arbres entiers ;

- au moment de la récolte du peuplement, l'exploitation des rémanents peut être intéressante pour diminuer les gênes à l'installation du nouveau peuplement.

En futaie irrégulière ou jardinée, on pourrait considérer que le peuplement se renouvelle complètement en 100 ans environ. « Récolter les rémanents (ou des arbres entiers) une fois dans la vie du peuplement » reviendrait donc à une

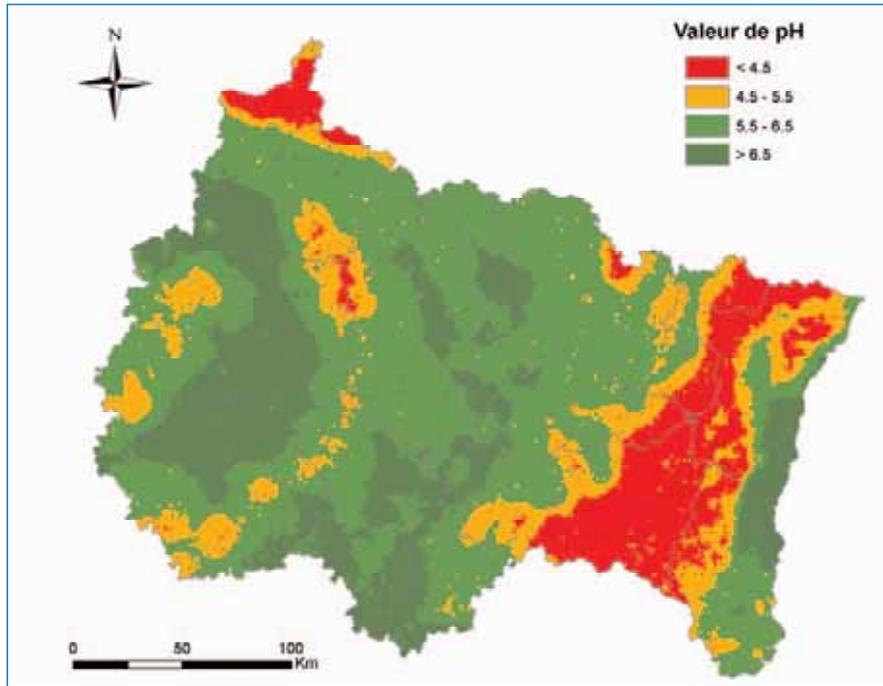


Fig. 5 : carte de sensibilité des sols forestiers du nord-est de la France aux exportations minérales, basée sur les pH de surface bioindiqués par la flore (ENGREF-IFN, non publiée*)

* Carte publiée ici avec l'aimable autorisation de l'IFN

		Peuplement	recommandations de l'ONF (sur la base des recommandations du guide de l'ADEME, sans recours à l'ides fertilisations compensatoires)
Sols peu sensibles	Résineux		Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Feuillus	Taillis et TSF	Laisser au moins 15-20 ans entre 2 récolte des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
		Futaie	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
Sols moyennement sensibles	Epicéa commun		Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 2 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Autres résineux		Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 1 fois au maximum dans la vie du peuplement
	Feuillus	Taillis et TSF	Laisser au moins 30 ans entre 2 récolte des arbres + rémanents (ou d'arbres entiers)
		Futaie et TSF en conversion en futaie	Récolte des rémanents ou d'arbres entiers 1 fois au maximum dans la vie du peuplement
Sols très sensibles	Tous		Aucune récolte des rémanents ou d'arbres entiers

Tab. 1 : synthèse des recommandations de l'ONF par classe de sensibilité de sol et par type de peuplement sur la base des recommandations du guide de l'Ademe sans recours à des fertilisations compensatoires

récolte tous les 100 ans, deux récoltes « dans la vie du peuplement » reviendraient à une récolte tous les 50 ans. Pour cela, on pourrait prévoir une rotation, d'un aménagement à l'autre, des

parcelles disponibles pour ce type d'exploitation.

On simplifierait ainsi la mise en œuvre des recommandations en adoptant toujours les mêmes

règles, selon les modes de traitement, réguliers ou irréguliers.

Dans tous les cas, on veillera dans toute la mesure du possible :

- à ne pas exporter les très fines branches et surtout le feuillage hors de la parcelle,
- à ne pas dégrader physiquement les sols sensibles au tassement ou à l'érosion.

Soit les récoltes de rémanents ou d'arbres entiers peuvent être réalisées hors feuille (pour les essences à feuillage caduque), soit on laissera sécher plusieurs mois les produits sur le parterre de la coupe. La qualité des plaquettes produites est d'ailleurs meilleure avec des branchages secs, sans feuilles. Certains engins de récolte et de fagotage de rémanents nécessitent qu'ils soient frais au moment de l'exploitation pour que les fagots produits se tiennent. On évitera donc dans la mesure du possible, et impérativement sur les sols sensibles, le recours à ce type de matériel.

Sur les sols sensibles au tassement, deux pistes doivent être envisagées : utiliser en priorité les rémanents pour protéger les cloisonnements ou avoir recours à des modes de débardages à faible impact sur les sols, tels que les câbles aériens ou le cheval de fer (voir le dossier sur les tassements de sol, Rendez-Vous Techniques n° 8, printemps 2005).

Manuel NICOLAS

Interface INRA – ONF

INRA – Centre de Nancy

Unité Biogéochimie des Ecosystèmes

Forestiers

manuel.nicolas@onf.fr

Co-auteurs de l'introduction et des deux premières parties :

François CHARNET

IDF - Orléans

francois.charnet@cnpfpf.fr

Jacques RANGER

INRA – Centre de Nancy
Unité Biogéochimie des Ecosystèmes
Forestiers
ranger@nancy.inra.fr

Caroline RANTIEN

ADEME - département bioressources
Angers
caroline.rantien@ademe.fr

Co-auteurs de la 3^e partie
« la production raisonnée de bois-
énergie par l'ONF »

Alain BRETHERS

ONF – DT Centre-Ouest
Service d'appui technique
alain.brethes@onf.fr

Patrice MENGIN-LECREULX

ONF – Direction Technique
Chef du Département Recherche
patrice.mengin@onf.fr

Thierry SARDIN

ONF – Direction Technique
Département Forêts
thierry.sardin@onf.fr

Bibliographie

BRGM, 1996. La carte géologique de France au 1/ 1 000 000. 6^e édition

BRUSTEL H., 2004. Coléoptères saproxyliques et valeur biologique des forêts françaises : perspectives pour la conservation du patrimoine naturel. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Coll. Les dossiers forestiers, n° 13. Paris : ONF. 327 p.

CACOT E. (coord.), CHARNET F., RANGER J., VIEBAN S., EISNER N., 2003. Etude de l'impact du prélèvement des rémanents en forêt : rapport final. Les Vaseix : AFOCEL. 72 p.+ annexes

CACOT E. (coord.), EISNER N., CHARNET F., LEON P., RANTIEN C., RANGER J., 2006. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers : ADEME. 36 p.

< en ligne :
<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=1&cid=96&m=3&id=33691&ref=12441> ou
http://www.afocel.fr/approvisionnement_bois_energie_guide_remanents.htm>

CHARNET F., 2007. L'impact de la récolte des rémanents sur l'environnement. Forêt Entreprise, n° 172, pp. 33-36

CROISE L., ULRICH E., DUPLAT P., JAQUET O., 2005. Le suivi des dépôts atmosphériques dans les écosystèmes forestiers en France. Rendez-vous techniques, n° 7, pp. 4-10

GOSSELIN M., LAROUSSINIE O., 2004. Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver. Synthèse bibliographique. Collection Etudes du Cemagref, série Gestion des Territoires, n° 20. Antony : Cemagref éditions. 320 p.

INRA, 1968. Carte pédologique de la France. 1^{ère} édition

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

MARQUES R., 1996. Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de Douglas (Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco) dans les Monts du Beaujolais (France). Thèse ENGREF. Champenoux : Institut National de la Recherche Agronomique. 240 p. + annexes

ONF Bourgogne, cellule d'expertises naturalistes, 2003. L'arbre autrement, programme Life nature « forêts et habitats associés de la Bourgogne calcaire ».

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

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

RANGER J., 1998. Évolution de la fertilité des sols forestiers sous les plantations de Douglas. Forêt Entreprise, n° 120, pp. 39-43

RANGER J., ALLIE S., GELHAYE D., POLLIER B., TURPAULT M.P., GRANIER A., 2002. Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fir plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study. Forest Ecology and Management, vol. 171, pp. 3-16

Maîtriser les caractéristiques des plaquettes forestières de l'arbre sur pied à la livraison du combustible

Des contrats libellés en tonnes à x % d'humidité... quand ce n'est pas en mégawatts : un casse-tête pour le forestier chargé de prévoir la récolte à l'amont, ou de négocier un prix à la tonne ou au m³ frais en anticipant l'impact sur le prix final de livraison. Comment se mesure le taux d'humidité ? Voici quelques repères de métrologie.

Produire de la plaquette forestière revient à transformer un volume de bois ou une biomasse sur pied en « copeaux » livrés à un consommateur. En amont de la chaîne de production, les forestiers (propriétaires, gestionnaires) raisonnent en m³ ou en stères, sans trop se soucier du taux d'humidité. En aval, le consommateur de plaquettes (exploitant de chaufferie, collectivité, industriel...) attend une quantité d'énergie en MWh qu'il réceptionne en général à travers un pesage à la tonne et la détermination du taux d'humidité sur brut. Ces acteurs ne parlent pas le même langage et, à l'interface, les fournisseurs ou entrepreneurs doivent jongler avec de multiples unités de mesure.

La planification des chantiers de production requiert une identification précise de la ressource mobilisable, un suivi des paramètres de base (masse volumique et taux d'humidité) par essence et l'utilisation de coefficients de conversion adaptés. La distinction par essence ou au moins par grand groupe d'essences (feuillus durs, feuillus tendres et résineux) est nécessaire pour bien apprécier le potentiel énergétique de la ressource forestière ciblée. À titre indicatif, 1 m³ de bois frais ou récemment récolté peut contenir entre 1,5 et 3 MWh selon l'essence. Et le degré de séchage du bois amplifie largement cette fourchette de performance énergétique.

Masses volumiques et taux d'humidité des bois : retour d'expérience de la filière bois de trituration

Quelles unités utiliser pour les transactions ?

En bois d'industrie ou de feu sous forme de billons, plusieurs pratiques cohabitent en matière de réception : le stère, la tonne « brute » (ou humide) et la tonne sèche (ou anhydre). Le volume réel en mètres cubes de bois rond, d'usage courant pour les bois d'œuvre, est inutilisable car trop long donc trop coûteux à mesurer sur des pièces de petit volume unitaire et de faible valeur.

Le stère est contesté depuis longtemps, car ce n'est qu'un volume apparent contenant une proportion de bois rond qui varie fortement en fonction du diamètre moyen des billons, de leur longueur, de leur flexuosité et de la qualité de l'empilage. Ainsi on trouve couramment des coefficients de conversion m³/stère qui vont de 1,3 st/m³ (ou 0,77 m³/st) pour de gros billons de 1 m bien empilés à la main à plus de 2 st/m³ (ou 0,5 m³/st) pour de petits billons de 2 m flexueux et mal empilés à la grue. Malgré ses défauts, la mesure en stères perdure, car elle est facilement applicable et contrôlable par tout un chacun. De plus elle se prête bien aux estimations de production : volume

débardé par un porteur ou transporté par un camion.

La tonne brute avec pesage à l'entrée de l'usine est utilisée depuis plus de 25 ans dans diverses usines de pâtes et de panneaux. Elle s'est peu à peu imposée au cours des années 80 lorsque le façonnage des billons est devenu commun en longueurs de 2 m, 2,50 m et plus encore en toutes longueurs. Il devenait en effet impossible de stérer correctement de tels bois et l'imprécision au façonnage sur les longueurs rendait l'opération sans grande signification. L'inconvénient de la tonne brute est qu'elle quantifie une matière première contenant plus ou moins d'eau en fonction du degré de séchage des bois.

La tonne sèche ou anhydre est actuellement utilisée dans quelques usines de pâtes et surtout de panneaux de particules. Elle reflète bien la quantité de fibres réceptionnée mais nécessite la mesure du taux d'humidité, généralement réalisée par étuvage d'une rondelle ou de copeaux obtenus avec une tronçonneuse ou une atrofraise (voir photos). Elle pose cependant de gros problèmes d'échantillonnage (Combien de rondelles faut-il prélever et où ?...) Une grande rigueur est nécessaire lors de la réception des bois sous peine de fausser complètement les résultats.

Les essais Afocel sur parcs à bois d'usines de pâtes montrent qu'au niveau d'un camion, on ne peut guère espérer mieux qu'une précision de + ou - 5 à 10 % si l'on se contente de prélever quelques rondelles. Par contre, au niveau de l'ensemble des livraisons d'un fournisseur, la précision devient très convenable : de l'ordre de + ou - 1 % à partir de 25 camions.

Quelle humidité et quelle masse volumique initiale ?

Le taux d'humidité sur brut (masse d'eau/masse brute) des principaux bois sur pied est de l'ordre de 45 % à 50 %. Il dépasse 50 %, voire 55 % sur des essences tendres telles que le peuplier ou le tremble. La masse volumique des bois sur pied figure dans la bibliographie mais il est toujours difficile de savoir de quel type de bois l'on parle : bois d'œuvre de gros diamètre ou bois d'industrie issu de houppiers, jeunes arbres d'éclaircies ou arbres de coupe finale, bois de cœur ou d'aubier... ?

Le tableau 1 présente la masse volumique des principales essences, leur taux de siccité (complément à 100 du taux d'humidité sur brut, soit masse anhydre/masse brute) ainsi que quelques autres ratios sur des bois d'industrie en

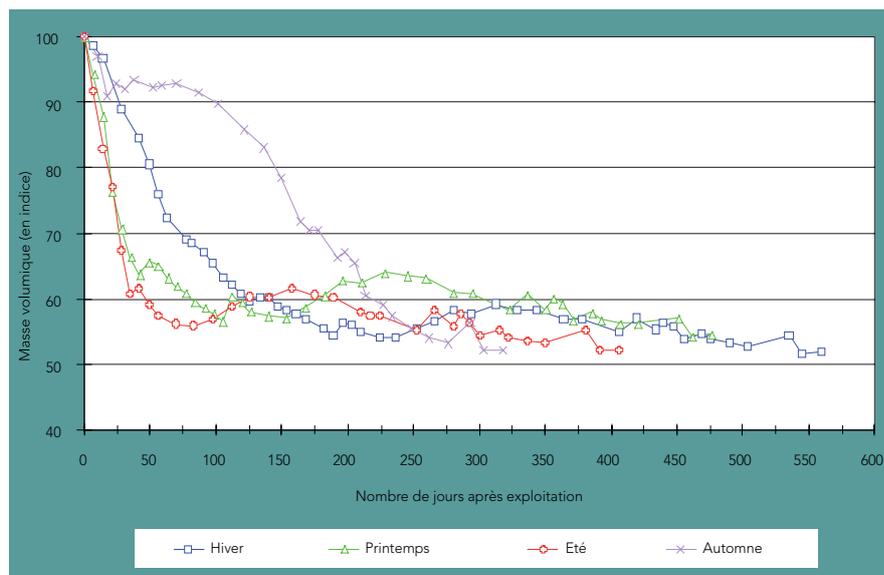


Fig. 1 : évolution de la masse volumique des billons, cas du douglas

billons de 2 m, avec écorce, à l'entrée usine. Il ne s'agit donc pas de bois sur pied mais de bois ayant subi le processus normal de récolte et de transport.

Pour une essence donnée, la masse volumique varie en fonction de la génétique (provenances, clones) mais aussi des conditions de croissance de l'arbre donc de la station, la météo, l'altitude, la sylviculture pratiquée... Bref, la variabilité de la masse volumique sur pied est considérable à l'intérieur d'une essence et *a fortiori* en mélange d'essences comme c'est généralement le cas en feuillus.

Comment évolue la masse volumique après abattage ?

Des pesages répétitifs sur longue durée, de billons identifiés et insérés dans des piles que l'on laisse sécher en bord de parcelle, montrent les phénomènes suivants :

- un effet saison très net avec deux cas de figure : les bois récoltés en automne connaissent une relative stabilité de leur masse volumique pendant tout l'hiver puis perdent du poids au printemps. Les bois récoltés en hiver, printemps et été perdent rapidement du poids pendant trois à quatre mois puis se stabilisent et fluctuent au gré des conditions météo ;

- un effet diamètre bien marqué : les petits billons sèchent beaucoup plus vite que les gros surtout lors des premiers mois ;

- un effet longueur des billons limité : des billons de 4 m perdent moins de poids que ceux de 2 m, mais l'écart n'est que de quelques %.

Comme le montre la figure 1 (cas du douglas), la perte de masse volumique est très rapide dans les bois tendres lors des premiers mois : souvent 15 à 20 % en trois semaines et 30 à 40 % en trois à quatre mois. Dans les feuillus, la tendance est identique mais la pente plus faible.

	Masse volumique brute (kg/m ³)	Taux d'écorce en volume (%)	Taux d'écorce massique (%)	Taux de siccité (%)	Coeff. de foisonnement (st/m ³)	Masse brute du stère (kg/st)
Epicéa-sapin	790	12	7	47	1,4 à 1,6	500 à 550
Douglas	710	13	7	58	1,4 à 1,6	450 à 525
Pin sylvestre	855	15	7	51	1,5 à 1,9	450 à 575
Pin maritime	880	25	11	46	1,5 à 1,9	450 à 575
Pin noir	930	16	9	50	1,5 à 1,9	500 à 625
Pin d'Alep	970	13	9	56	1,5 à 2,0	500 à 650
Chêne	950	19	10	61	1,6 à 2,0	500 à 600
Hêtre	1025	10	7	60	1,4 à 1,8	550 à 700
Peuplier	790	17	13	50	1,4 à 1,8	450 à 550
Châtaignier	850	12	7	58	1,4 à 1,8	475 à 600

Tab. 1 : coefficients de conversion pour les bois ronds d'industrie (entrée usine) - Source AFOCEL, 2005

Où et comment prélever l'échantillon ?

Pour ce qui est des résultats de la figure 1, concernant des billons de 2 m ou 2,50 m, les mesures ont été réalisées par étuvage de rondelles ou de copeaux de tronçonneuse. Une perceuse à fort couple équipée d'un gros foret donne des résultats très voisins.

Les précautions suivantes doivent être prises sous peine de biaiser les résultats :

- prélever la rondelle ou les copeaux à une distance de 30 à 50 cm de l'extrémité sauf en peuplier et tremble pour lesquels il faut se positionner au milieu. Si on prélève des copeaux, sectionner entièrement le billon pour obtenir la proportion correcte de cœur, aubier et écorce ;

- procéder avec une tronçonneuse parfaitement affûtée afin de ne pas provoquer d'échauffement lors de la découpe ;

- étuver à 103 ± 2 °C jusqu'à stabilisation de la masse et non pas pendant 12 ou 16 heures comme cela est pratiqué ici ou là. En effet, selon la charge de l'étuve et l'humidité des échantillons, il faut une durée variable pour obtenir la déshydratation totale. En pratique une durée de 24 heures est souvent nécessaire.

Des résultats à actualiser

Les résultats présentés, datant des années 1992/93 et valables pour des billons de bois d'industrie en 2 m et 2,50 m, mériteraient d'être réactualisés. En effet, le fonctionnement des usines en flux tendu et la mécanisation du bûcheronnage ont fortement réduit les durées de séchage entre abattage et livraison usine. Les longueurs de billons sont en augmentation avec une proportion croissante de 3 m ou 4 m, y compris en bois de chauffage pour lequel certaines entreprises ne récoltent plus en 1 m mais en longueurs diverses avec découpe et conditionnement sur leur parc à bois. Enfin le fort taux de mécanisation du bûche-



AFOCEL

Prélèvements de copeaux sur un billon à l'aide d'une tronçonneuse équipée d'un récupérateur

ronnage des résineux (50 % en 2005) conduit à un écorçage parfois important pendant la période en sève. Ces diverses évolutions ont évidemment un impact sur le séchage des bois.

Maîtriser les caractéristiques du combustible : une nécessité pour le fournisseur et l'utilisateur

Les exploitants des nouvelles chaufferies automatiques au bois signent aujourd'hui quasi systématiquement un contrat d'approvisionnement, ce qui n'a pas toujours été le cas. Pendant trop longtemps, et surtout pour les petites installations, l'approvisionnement a reposé essentiellement sur des accords verbaux ou des contrats flous sans véritable cahier des charges du combustible bois.

Or, pour l'exploitant d'une chaufferie tout comme pour le fournisseur du combustible, bien maîtriser les caractéristiques de la plaquette forestière est primordial. Pour le premier, connaître parfaitement le taux d'humidité et/ou son pouvoir calorifique, c'est savoir avec quelle quantité d'énergie il alimente son installation. De la même façon, vérifier la granulométrie des plaquettes lui permet d'éviter des dysfonctionnements sur l'installation. En allant jusqu'au bout de la logique, les différents contrôles de qualité vont



AFOCEL

L'Atrofraise, sorte de tronçonneuse à guide pointu, pour prélever des copeaux sur billons à l'entrée d'une usine

offrir la possibilité d'anticiper les réglages pour optimiser le rendement. Pour le fournisseur, parce qu'il va savoir quelle énergie il apporte et donc combien facturer, c'est l'assurance de pouvoir rentabiliser les efforts qu'il a produits pour livrer la qualité demandée (stockage, immobilisation de terrain, investissement dans un cribleur...).

Pas de résultats significatifs sans échantillonnage correct

La prise d'échantillon est capitale pour la bonne représentativité des mesures réalisées à partir des échantillons prélevés. Elle comprend deux opérations :

- la collecte de l'échantillon ;
- la réduction du volume de l'échantillon, si celui-ci est trop important pour permettre une mesure rapide.

La quantité prélevée dépend de la mesure à réaliser : une mesure de pouvoir calorifique ne nécessite que quelques grammes de combustible dans la bombe calorimétrique, une mesure d'humidité peut nécessiter plusieurs litres de combustible ; une granulométrie va nécessiter quant à elle plusieurs dizaines de litres de matière.

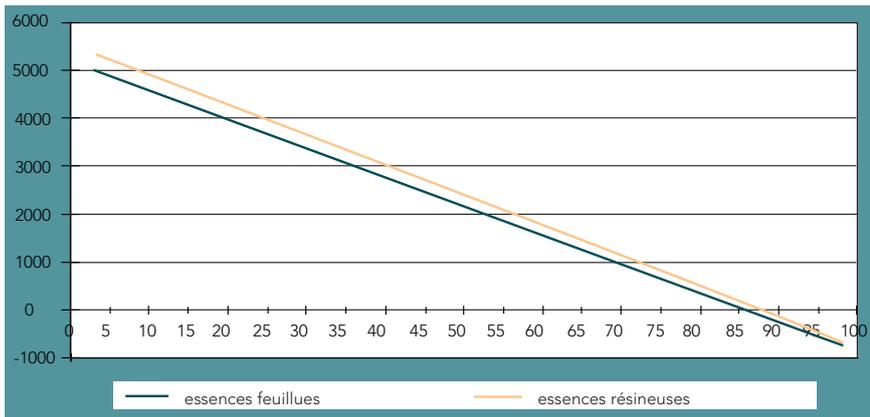


Fig. 2 : détermination du PCI (kWh/t) en fonction du taux d'humidité sur brut (%) pour les essences feuillues et résineuses (d'après Lermab et Energico)

Devant l'hétérogénéité des combustibles, il est absolument nécessaire de prélever des échantillons en différents points du stock ou de la benne qui livre : essayer de prélever des échantillons à la fois à la surface et le plus au cœur possible du tas de combustible.

Les textes indiquent le nombre de prélèvements à effectuer, le volume minimum de chaque prélèvement élémentaire..., et comment réduire la taille de l'échantillon ainsi constitué. En pratique, pour la plaquette forestière les quantités minima à évaluer seraient de 2 kg pour des chargements de 15 à 30 tonnes unitaires.

Quelle quantité d'énergie dans le combustible ? C'est la question centrale...

Le **Pouvoir Calorifique Inférieur** (PCI) indique la quantité d'énergie restituée par unité de masse. C'est l'énergie théoriquement récupérable par l'utilisateur dans le cas d'une combustion parfaite. Il s'agit donc de la donnée la plus intéressante à utiliser dans le cas du bois énergie. Elle se calcule à partir du PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) et du taux d'humidité. Le PCS correspond à l'énergie dégagée par la combustion du bois en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion. Cette valeur reste néanmoins une valeur théori-

que pour le bois énergie dans la mesure où il faudrait récupérer la chaleur latente de l'eau via la condensation de la vapeur d'eau des fumées.

Par simplification, on opère souvent à partir du taux d'humidité qui va permettre d'approcher à 5 % le PCI du bois ainsi mesuré avec un résultat beaucoup plus rapide

Calcul du pouvoir calorifique

La formule permettant de calculer le pouvoir calorifique du combustible est donnée par* :

$$\text{PCI} = (1 - E) \times (\text{PCS} - 226 \times H) - 2\,511 \times E$$

avec : H = fraction massique en hydrogène
E = humidité sur brut (en fraction massique)

On peut ainsi approcher la valeur du PCI d'un combustible dont on a mesuré le taux d'humidité précisément. Par exemple, pour une plaquette d'épicéa dont la mesure normée de l'humidité donne comme valeur 45 % d'humidité sur brut, le PCI sera approché par :

$$\text{PCI} = (1 - 0,45) \times (19\,195 - 226 \times 6) - 2\,511 \times 0,45 = 8\,681,5 \text{ kJ/kg soit } 2\,413,5 \text{ kWh/tonne}$$

*Yann Rogau, Technique de l'Ingénieur, Energétique

(quelque 24 h contre 24 jours pour une mesure directe). Pour l'estimation du PCI à partir de la mesure du taux d'humidité, on utilise des régressions comme celle présentée figure 2.

Attention aux unités utilisées !

Sur le terrain, on raisonne souvent en volume de bois : « livraison par 90 m³ », « combien faut-il broyer de stères pour alimenter cette installation »... L'unité d'énergie du système universel est le Joule. Dans les chaufferies, ce sont les thermies, plus récemment les kWh, qui dominent. Utiliser le volume (tout comme la masse) comme unité peut être source de confusion : les essences n'ayant pas la même densité, un mètre cube de bois de peuplier n'apportera pas la même quantité d'énergie qu'un m³ de chêne, à granulométrie et humidité identiques. Plutôt que de commander un volume d'une essence particulière, il sera plus judicieux pour un exploitant de chaufferie de commander une quantité d'énergie. Attention toutefois aux autonomies des installations de chauffage : un silo de 120 m³ rempli de bois léger devra être rempli plus rapidement que s'il est rempli en bois dense, toutes caractéristiques identiques par ailleurs ! Les différences de densité vont intervenir sur l'unité de volume

Le taux d'humidité

L'humidité des combustibles bois représente la quantité d'eau dans ce combustible. C'est actuellement le paramètre le plus mesuré sur le combustible bois. Deux termes sont employés : humidité sur brut ou sur sec ; il s'agit du rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et, respectivement, la masse totale du bois ou la masse de bois anhydre. Ainsi, 20 % sur brut correspondent à 25 % sur sec.

La mesure est réalisée à partir d'un échantillon de minimum 300 g. L'échantillon est ensuite déshydraté en étuve à une température

	Infradensité (kg/m ³)	Taux d'humidité sur brut (%)	Masse volumique bois frais (kg/m ³)	PCI (MWh/t)
Chêne	580	44	1036	5,0
Peuplier	435	50	870	4,9
Epicéa	370	58	881	5,3

Tab. 2 : quelques paramètres de base pour le calcul du pouvoir énergétique

Source : Afocel et Critt Bois

de 103 ± 2 °C pendant 24 h minimum (NF B 51-004). Une double pesée, avant et après dessiccation, détermine la quantité d'eau initialement contenue dans le bois et de ce fait, le taux d'humidité de l'échantillon.

La granulométrie

Cette mesure consiste à faire passer les éléments dans des tamis à mailles pour déterminer la masse comprise entre deux dimensions correspondant aux bornes des classes de distribution de la norme souhaitée par le client. Cette don-

née est essentielle pour les chaufferies comportant des vis d'Archimède, moins importante dans le cas de convoyeurs. Elle va permettre également de valider l'absence de fines pouvant être problématiques (usure prématurée des matériels, par exemple).

Signer des contrats d'approvisionnement cohérents

On a vu apparaître au fil du temps des contrats d'approvisionnement de plus en plus stricts, allant jusqu'à pénaliser le fournisseur de combustible au point d'humidité

mesuré avec des appareils... présentant des variations de 30 à 50 % sur les valeurs ! Le contrat a pour but de préciser les limites d'acceptation du combustible et de garantir à l'utilisateur une qualité de combustible. De la même façon, il garantit au fournisseur une quantité de livraison annuelle, basée sur des besoins climatiques. Il doit être établi sur un modèle gagnant-gagnant.

Florence MAIRE

Responsable projets bois-énergie
Critt Bois Épinal

Jean Pierre LAURIER

Ingénieur exploitation forestière
Afocel Nangis

Bibliographie

CRITT Bois Épinal, Fibois, CTBA, ADEME, 2001. Mesures des caractéristiques du combustible bois

CRITT Bois, Fibois, ADEME, 2002. Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés.

LAURIER J.P., 1998. Comment évolue la masse volumique des bois d'industrie après abattage ? Fiche informations torêt Afocel, n°573, 6 p.

LAURIER J.P., 1993. Coefficients de conversion m³/tonne pour les bois ronds d'industrie Fontainebleau : ARMEF. Etude technique n°8, 44 p.

Normes à consulter

CEN/TS 14778-1 à 2, 14 779 et 14780 : Biocombustibles solides – Echantillonnage

CEN/TS 14774-1 à 3 : Biocombustibles solides – Méthode de détermination de la teneur en humidité- Méthode par séchage à l'étuve

Connaître la quantité d'énergie du combustible dès la livraison.

Parce qu'il n'existait pas de méthodes ou de matériels réellement adaptés à la demande des utilisateurs de chaufferies automatiques au bois (industriels et collectivités locales essentiellement), le Critt Bois Épinal a cherché à développer un appareil de mesure du PCI rapide et fiable. Ce projet a pu être mené grâce à la participation financière de l'Ademe Pays de Loire.

Le programme a permis de réaliser un prototype de PCI-mètre pouvant accepter des **échantillons de faible masse** (< 1 kg), être utilisé avec **toutes sortes de combustibles bois déchiquetés** (plaquettes, copeaux et sciures, écorces...), et surtout fournir un **résultat rapide** sur site de l'utilisation (temps de mesure inférieur à 20 minutes). Il peut être utilisé par n'importe quel opérateur : la mesure consiste à placer l'échantillon de bois dans le système et démarrer le processus de qualification.

Ces exigences permettent ainsi à l'appareil d'être utilisé aussi bien par des utilisateurs de chaufferies bois pour mesurer le coût réel du combustible qu'ils achètent - et ainsi calculer précisément le coût de fonctionnement de leur installation - que par les prestataires, vendeurs de combustibles bois, pour vérifier que leur produit est bien conforme au cahier des charges de leurs clients ou prestataires exploitant pour le compte de tiers et devant facturer une prestation au kWh.

L'appareil est opérationnel dans une forme prototype. Désormais, outre la possibilité de quantifier très rapidement la quantité d'énergie livrée, le PCI-mètre devrait également permettre à l'exploitant de refuser une livraison non conforme en termes calorifiques.

Trois exemples de projets et chantiers bois-énergie à l'ONF

Pour clore ce dossier, trois exemples concrets et contrastés de projets confiés à l'ONF : une petite chaufferie communale à Labergement les Seurre, la chaufferie urbaine de Planoise à Besançon avec approvisionnement en flux tendu, et une unité industrielle de production de granulés bois, présentés respectivement par Dominique Darphin, Luc Libault et Philippe Goupil. Trois styles différents pour un objectif : tirer les enseignements de ces expériences.

Montage et réalisation d'un projet communal bois-énergie : l'exemple de Labergement les Seurre

Mi-novembre 2003, le téléphone sonne dans mon bureau : « Bonjour, Roland Viellescaze à l'appareil, agent patrimonial (AP) de l'agence de Dijon. J'ai évoqué rapidement le bois énergie avec la commune de Labergement les Seurre (21), en me basant sur l'argumentaire qu'on nous a fourni, mais sans pouvoir en dire plus. Les élus sont intéressés par une information complète sur le sujet ! ».

La forêt communale est constituée par 700 ha de taillis sous futaie en cours de conversion en futaie régulière. La demande en bois de feu est toujours présente sur la commune, malgré une régression des affouages, notamment dans la dernière décennie.

Rendez-vous est donc pris début décembre 2003 avec une partie du conseil municipal (maire, commission des bois, commission économique). Après une présentation des principaux atouts des plaquettes forestières comme combustible (voir l'article « Panorama de la filière bois-énergie en France, dans ce même dossier), les élus identifient une série d'avantages

concrets pour la valorisation de leur patrimoine forestier :

- diversification des débouchés pour certains produits (houppiers, petits bois...) dont les cours sont très variables ;

- dynamisation de la commercialisation des bois, les lots de bois étant rendus plus attrayants par la disparition de la charge « bois de chauffage » pour l'exploitant ;

- possibilité de « blanchir » le coût de travaux sylvicoles en utilisant les produits d'élagage, dépressage, éclaircie...

Montage du projet de chaufferie bois

J'appuie alors le conseil municipal dans l'élaboration initiale du projet. À ce stade, il s'agit surtout de dessiner un réseau de chaleur économiquement cohérent et de trouver une première solution fonctionnelle pour l'implantation de la chaufferie. L'agent patrimonial apporte également une contribution déterminante en confirmant la disponibilité de la ressource bois. Cette argumentation forestière est indispensable pour sécuriser le porteur de projet dans sa démarche.

Après l'organisation par nos soins de deux visites de chaufferie, la collectivité nous commande rapidement une prestation de services comprenant : la rédaction du

cahier des charges d'une étude de faisabilité de chaufferie bois avec réseau de chaleur, l'appui pour la consultation des bureaux d'étude thermique et l'analyse des offres. Dans ce cas précis, la possibilité de revente de chaleur en externe à la collectivité n'est pas retenue.

Par la suite, la commune nous confie aussi le contrôle du déroulement de cette étude de faisabilité jusqu'à sa restitution à la collectivité. Enfin une étude d'approvisionnement en combustible bois est commandée à l'agence ONF de Dijon, et réalisée par l'AP.

La chaufferie en chiffres

Puissance installée : 360 kW bois
Volume chauffé : environ 5 000 m³
Consommation bois : 500 MAP à 25 % d'humidité, soit 150 tonnes à 25 % ou 250 m³ de bois rond frais
Coût d'approvisionnement bois : 18 €/MAP à 25 %, soit 15 €/MWh entrée chaudière

Coût d'approvisionnement fuel : 0,57 €/l, soit 50 €/MWh entrée chaudière

On vérifie bien que l'approvisionnement en combustible bois sur ce type de chaudière coûte beaucoup moins cher qu'un approvisionnement en carburant fossile

Mise en œuvre de l'approvisionnement en plaquettes forestières

La décision communale de lancer les travaux intervient alors en mars 2005, soit 14 mois après le premier contact. Le temps de retour sur investissement (TRI) de l'ensemble chaufferie bois – réseau de chaleur est évalué, à l'époque, à moins de 10 ans. Ce TRI est descendu à 7 ans avec la hausse du coût des énergies fossiles intervenue depuis. Si l'on considère seulement le surcoût lié à l'énergie bois, le TRI est de 3 ans. Ce projet, suivi pas à pas par notre direction territoriale, en collaboration avec l'Ademe, le conseil régional de Bourgogne, et le conseil général de Côte-d'Or, verra la chaufferie opérationnelle en octobre 2005.

La chaudière bois de 360 kW, avec appoint fuel, alimente un réseau de chaleur qui relie mairie, école (5 classes), agence postale, salle des fêtes, halte-garderie et 5 logements communaux. Un projet de salle polyvalente (300 m²) a été intégré dans le calcul des besoins.

C'est la forêt communale qui assure la ressource en plaquettes forestières. L'agence a mis en place un contrat pluriannuel de maîtrise d'œuvre pour les chantiers de bûcheronnage, débardage, déchetage et livraison de 500 à 700 MAP (m³ apparent plaquette) par an. Le contrôle de conformité de la granulométrie et du taux d'humidité sur brut du produit est également assuré par l'ONF dans le cadre de ce contrat.

Deux particularités pour cet approvisionnement méritent une attention spéciale

Lors de la réalisation de l'étude de ressource, il est apparu que la coupe prévue pour l'année 2005 proposait un petit volume de qualité chauffage. Le maire sou-

haitait notre assistance pour une délicate réunion publique où il faudrait expliquer l'impossibilité de satisfaire la demande d'affouage en raison du projet de chaufferie. Nous l'avons soulagé de cette démarche sensible en recourant à la forêt domaniale toute proche pour compléter le volume nécessaire à l'approvisionnement 2005. **À travers cet exemple, l'ONF a démontré sa capacité à sécuriser un approvisionnement en combustible bois, en mutualisant ses sources d'approvisionnement.** Dans d'autres projets, c'est la forêt privée qui peut être associée à l'approvisionnement, grâce au protocole d'accord UCFF/ONF sur le bois énergie. Notons au passage que cela a permis aussi de valoriser des houppiers feuillus qui n'avaient pas trouvé preneurs lors des adjudications.

En raison des incertitudes portant sur le délai de construction de la chaufferie et notamment d'un hangar de stockage, il a été décidé de louer une plate-forme en dur à un particulier pour stocker le bois décheté sous une bâche évapo-transpirante. Le retard redouté en matière de construction... est survenu ! Heureusement, ce système de bâche a parfaitement fonctionné : le stockage sous bâche de juin à septembre a permis d'abaisser le taux d'humidité des plaquettes de 37,6 à 23,7 %, et respecter ainsi les spécificités de la chaudière installée (taux d'humidité du combustible compris entre 20 et 30 %). Cette expérience a illustré que **l'utilisation d'une bâche évapo-transpirante pouvait donc constituer une excellente alternative provisoire de stockage des plaquettes.**

Curieusement, la principale difficulté a été de persuader les élus que la ressource serait réelle-



D. Darphin, ONF

Débardage au porteur des houppiers façonnés sommairement



D. Darphin, ONF

Confection des andains de plaquettes avant la pose de la bâche



D. Darphin, ONF

Stockage des plaquettes sous bâche évapo-transpirante « Toptex »

ment garantie par les forêts publiques avoisinantes. La conversion de la vision des peuplements sur pied en volume disponible est floue pour un élu. Notre rôle de conseil est ici primordial. Si la faisabilité technique et économique est relativement aisée à clarifier, le porteur de projet, forestier ou non, consi-

L'avis des acteurs

« L'argumentaire de l'ONF a été décisif ! Notre massif forestier de 700 ha, la proximité de bâtiments communaux, l'indépendance énergétique, l'économie de fonctionnement réalisée, l'impact sur l'emploi et l'investissement, une action neutre sur les gaz à effet de serre ont motivé notre implication sur ce projet de chaufferie bois. Grâce aux subventions de l'Ademe et du conseil régional de Bourgogne par la voie du PRE-MED (Plan régional environnement maîtrise de l'énergie et des déchets), ainsi que du conseil général de la Côte d'Or, ce projet a pu voir le jour. Voilà pourquoi, 18 mois plus tard, notre chaufferie de 360 kW au bois plaquette était opérationnelle. Encore merci à tous nos partenaires ! »

François Rolin,

maire de Labergement lès Seurre

« L'installation dans une commune rurale forestière comme Labergement les Seurre d'une Chaufferie à plaquettes et d'un réseau de chaleur, est l'aboutissement naturel de la gestion des forêts communales que nous mettons en œuvre chaque jour en partenariat très étroit avec les élus. Ce qui est remarquable ici c'est la rapidité de la prise de décision finale par le Conseil Municipal. »

Roland Vieillescaze,
agent patrimonial ONF

dère la mobilisation de la ressource bois comme une démarche abstraite et incertaine. Il est enfin important de souligner que le dynamisme de la commune a permis d'amener ce projet « de l'idée à l'inauguration » en moins de deux ans. D'habitude les temps de passage sont plutôt de l'ordre de 3 à 5 ans.

La chaufferie de Planoise : un exemple d'approvisionnement en flux tendu

La chaufferie de Planoise, opérationnelle depuis février 2006, est une des plus grandes chaufferies bois automatiques en France, d'une puissance installée de 6 MW. Cette réalisation alimente en chauffage et en eau chaude sanitaire 2 500 logements du quartier de Planoise à Besançon. D'un point de vue environnemental, le bois-énergie évitera le rejet de plus de 10 000 tonnes de gaz carbonique par an. Par ailleurs le traitement des fumées par filtres à manches permettra de réduire le taux de rejet des fumées à 50 mg/m³, soit deux fois moins que la valeur imposée par la réglementation actuelle. L'originalité du projet tient surtout à la multiplicité des sources de production de chaleur sur le même site (chaufferie bois, incinérateur à ordures, centrale fioul, gaz et charbon). Cela permet une grande souplesse d'utilisation en fonction de la disponibilité et du coût des combustibles au bénéfice d'une production de chaleur optimisée aux niveaux économique et environnemental.

Le projet de chaufferie bois à Planoise a été initié en 2002 par la ville de Besançon sous l'impulsion de la délégation régionale de l'Ademe Franche Comté. L'approvisionnement en tant que tel

avait été imaginé par l'intermédiaire d'un groupement d'entreprises de travaux forestiers constitué pour l'occasion. Une plate-forme logistique devait être créée en parallèle par la communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB) pour sécuriser l'approvisionnement de la chaufferie de Planoise et faciliter l'approvisionnement d'éventuelles autres chaufferies à installer dans l'agglomération.

Comment l'ONF est entré dans le projet

Les premiers contacts avec l'ONF ont été pris par la CAGB dans le souci d'approvisionner la plate-forme à partir des forêts publiques de ses 59 communes. C'est à partir de là qu'a germé l'idée d'une prestation ONF pour l'approvisionnement. En effet à l'issue d'une étude confiée à l'ONF par la CAGB en 2005, nous avons mis en évidence la difficulté d'associer pour la récolte toutes les communes de la communauté et l'insuffisance de leurs disponibilités, qui correspondaient au tiers des besoins en plaquettes, c'est-à-dire environ 6 500 m³ de bois frais ou 5 200 t. Une étude antérieure sur la forêt privée (Proforêt, 2002) affichait une disponibilité d'environ 5 500 t pour les forêts privées soumises à un plan de gestion, dans un rayon de 35 km à partir de Besançon. Par extension, nous avons proposé de compléter la couverture des besoins par la forêt domaniale de Chaux, située à 30 km.

La chaufferie bois de Planoise en chiffres

Puissance installée : 6 MW
Besoins en plaquettes forestières :
10 000 t/an.
Besoins en plaquettes connexes :
4 000 t/an.



G. Vieille, ville de Besançon



L. Libault, ONF

Stockage bord de route pour ressuyage avant broyage



L. Libault, ONF

Broyage et remplissage simultané du camion de livraison (benne à fond mouvant de 90 m³)

Faire face au retard de la plateforme logistique

Les débats sur la création d'une plate-forme de stockage s'éternisant, la possibilité d'un approvisionnement de la chaufferie en flux tendu a été envisagée. Cet examen s'étant avéré concluant, la Ville de Besançon et la société SECIP (filiale du groupe Elyo) exploitant de la chaufferie ont confié l'approvisionnement en plaquettes forestières de la première campagne de chauffe à l'ONF, en août 2005. Les points clés du cahier des charges du contrat d'approvisionnement étaient la fixation du prix à la tonne de plaquette vendue et les clauses de révision en fonction de la variation du taux d'humidité. Ce dossier fut traité en étroite collaboration avec le directeur du département grands programmes à l'ONF.

Nous pouvions donc démarrer. La première campagne ne commençant que fin février 2006, les besoins estimés n'étaient alors que de 5 000 tonnes. L'évaluation de la ressource indiquait que 1 500 tonnes environ proviendraient du syndicat intercommunal de gestion forestière des Grands Bugnoz au Nord de Besançon, 1 200 tonnes de la forêt communale de Besançon et le reste, soit 2 300 tonnes, de la FD de Chauv.

Le premier stock bord de route a été constitué par les invendus de mauvaise qualité, roulés ou gélifs, de la forêt de Chauv dont les sols peu portants et mouilleux imposaient des abattages débardages avant l'automne. L'idée était de constituer des piles de bois toute longueur (BTL) et de les broyer en flux tendu le moment venu. La constitution du tas a été obtenue assez rapidement par deux équipes de bûcherons et un débardeur 6x8.

Planoise : des surprises et des problèmes logistiques à méditer

Notre première surprise est venue de la surestimation des volumes de bois mis bord de route en raison de la méconnaissance du foisonnement pour ce type de tas « toutes longueurs ». Les estimations sur pied étaient plus proches de la réalité mais malgré tout imprécises, les modalités habituelles de cubage étant inadaptées au produit. Parallèlement, les besoins réels de la chaufferie ont été d'environ 3 000 tonnes, soit bien inférieurs aux 5 000 tonnes prévues. Par rapport au schéma initial, la demande et l'offre en plaquettes forestières ont bien varié en quantité et fréquence : il a fallu s'adapter au sens fort du terme pour assurer l'approvisionnement. Au final, l'ONF a livré près de

3 000 tonnes de plaquettes forestières, dont 40 % en provenance de la forêt de Chauv et 15 % issus de la forêt des Grands Bugnoz.

Ensuite, la contrainte d'hygrométrie (environ 40%) conduit à envisager de stocker les bois en BTL pendant plusieurs mois en forêt, mais les objections fusent : incompatibilité avec la gestion traditionnelle, risques inhérents aux grosses piles en forêt, « point noir » paysager des tas, voire risques phytosanitaire quand il s'agira de houppiers résineux. Sur cette campagne, ce paramètre a été globalement bien géré : le taux moyen d'humidité sur brut des plaquettes livrées était de 41 %, avec des variations de ± 5 %, conformément au contrat. En considérant un taux d'humidité sur pied d'environ 45 % pour le chêne (cf. données Afocel), ce taux moyen a été obtenu après ressuyage des bois 3 à 4 mois en bord de parcelle.

En termes de logistique pure, la principale difficulté est d'optimiser l'emboîtement des opérations de broyage et de transport de la plaquette. Les données de base de cette équation sont : d'un côté un broyeur à forte capacité qui produit 90 mètres cube apparents plaquettes (MAP) à l'heure, de l'autre un silo de stockage de la chaufferie dont la capacité est limitée à

600 MAP. Ces contraintes ont conduit l'entrepreneur à organiser des sessions de seulement deux jours sur trois. Néanmoins, la capacité du silo ne correspondant qu'à une consommation de 2 à 3 jours, le suivi du taux de remplissage du silo doit être permanent pour ne pas se retrouver en rupture d'approvisionnement. Et que dire des week-ends prolongés où l'interdiction de circulation des camions empêche le remplissage de ce silo trop petit et donc le fonctionnement à plein régime de la chaudière...

Dans un schéma intégral de flux tendu (broyage et livraison instantanée de la plaquette), le moindre impondérable peut entraîner une rupture d'approvisionnement. La météo est primordiale : elle peut compliquer la circulation des camions à fonds mouvant en forêt par temps de neige, ou les paralyser pour cause de ridelles gelées ou de tas de plaquette transformés en glaçon. De même, la neige ou la glace, quand ce n'est pas la pluie, faussent vos prévisions d'hygrométrie. Enfin, une panne machine sur un broyeur très sollicité peut là encore interrompre la chaîne d'approvisionnement.

Cette liste peut donner l'impression que le choix d'un itinéraire en flux tendu relève de l'inconscience. Il n'en est rien ! D'abord il faut souligner que ces surprises ou contraintes ont été quelque peu exagérées au regard de l'aspect novateur du chantier. Et puis, et surtout, il faut considérer que l'itinéraire en flux tendu représente la solution opérationnelle la plus économique pour livrer des plaquettes forestières à des unités type Planoise, consommant un combustible à 40 % d'humidité. Un itinéraire avec un transit par une plate-forme est bien sûr plus sécurisé, mais entraîne un surcoût de l'ordre de 20 % pour la plaquette livrée. À ce prix, on ne « placerait » plus de plaquettes forestières.



L. Libault, ONF

Dépotage des plaquettes dans le silo de la chaufferie

Une expérience riche d'enseignement, l'aventure continue

L'approvisionnement de la chaufferie Planoise en 2006 a démontré la capacité de l'ONF à répondre à ce type de demande. Plus concrètement, cette expérience a permis d'insérer l'organisation de ce type de chantier dans notre gestion forestière quotidienne.

le mot de la ville »

« L'idée d'une chaufferie bois s'est imposée, mais les élus voulaient d'abord s'assurer de la sécurité de l'approvisionnement. La ville de Besançon a mis en place un partenariat original et novateur avec l'ONF. C'est un partenariat auquel je tiens beaucoup, et je remercie l'ONF pour son engagement dans la filière bois énergie ».

Extraits de déclarations d'Éric Alauzet, adjoint au Maire de Besançon – Journal de l'ONF n° 39 janv.-fév. 06.

Fort de cette première expérience, l'ONF, à travers maintenant sa filiale ONF Énergie, est chargé d'approvisionner la chaufferie de Planoise jusqu'en 2008. Pour la campagne 2006/2007 en cours, les provenances des plaquettes ont été diversifiées et les exploitations anticipées : cela permet d'envisager la livraison en flux tendu avec plus de sérénité. Par ailleurs, la plate-forme de stockage en discussion depuis 2002 et impulsée par la CAGB devrait voir le jour à proximité de la chaufferie à l'automne 2007. Cette plate-forme pourrait accueillir un stock tampon qui sécuriserait ainsi l'approvisionnement en flux tendu de la chaufferie.

Alsace Pellets, petit contrat deviendra (peut-être) grand

Bois énergie ?

Le bois énergie recouvre trois « produits » susceptibles d'être utilisés dans les systèmes de chauffage :

- le bois bûche, depuis des siècles, alimente cheminées, poêles, chaudières ;

- les plaquettes bois fabriquées à partir de biomasse ligneuse déchetée dont la demande va croissante depuis une vingtaine d'années. Les plaquettes forestières (issues de produits de la sylviculture) prennent une part de plus en plus conséquente sur un marché utilisant initialement des produits connexes de scierie et bois de récupération (palettes...). Les plaquettes sont majoritairement destinées aux chaufferies collectives et industrielles ;

- le bois reconstitué sous forme de briquettes ou de **granulés (dénommés également pellets)**, facilement transportable et stable. La demande des particuliers et des industriels dans les pays voisins comme la Belgique, l'Allemagne ou l'Italie est en croissance exponentielle depuis quelques années ce qui explique l'implantation récente de sites de fabrication sur le territoire français. En particulier, les industriels de l'agroalimentaire maîtrisant déjà les processus de déshydratation de la luzerne ou de la pulpe de betterave pour les transformer en granulés s'investissent dans ce nouveau créneau qui ne nécessite quasiment aucune modification de matériel.

Alsace Pellets, fabricant de granulés

La société Alsace Pellets, implantée à Bennwihr-Gare à proximité de Colmar, a démarré son activité en 2005. Le processus de fabrication des granulés est relativement simple. Le produit de base est constitué de sciure ou de plaquettes bois. Ces dernières sont redéchiquetées pour obtenir une granulométrie très proche de la sciure.



site.granulesbois.com

Les produits passent ensuite en séchoir pour arriver à un taux d'humidité de 7/8 %. Ils sont comprimés avant de traverser une plaque à trous d'où sortent des boudins de 4/5 mm de diamètre découpés à 15/20 mm pour donner les fameux granulés. Le conditionnement se fait enfin en sacs pour être vendus en magasins spécialisés ou stockés en vrac dans des silos approvisionnant des camions. Les granulés sont ensuite distribués par camion souffleur comme la farine dans les silos des chaufferies individuelles ou collectives.

Les avantages du granulé résident dans son fort pouvoir calorifique (deux fois plus élevé que du bois séché à l'air libre), son faible encombrement, sa facilité de livraison et l'absence de dysfonctionnements pour l'alimentation automatique de la chaudière. Son prix élevé et l'énergie nécessaire pour le fabriquer (séchage) handicapent néanmoins ce produit.

L'approvisionnement

La société Alsace Pellets s'approvisionnait jusqu'en avril 2006 uniquement à partir de produits connexes de scierie ou de broyats de palettes. Le gisement disponible ne permettait plus de répondre aux objectifs d'augmentation de production. Jean-Marie Georges, président d'Alsace Pellets, sollicite alors ONF Énergie pour une proposition d'approvisionnement en plaquettes bois. En liaison étroite avec l'agence de Colmar, un contrat commercial pour la fourniture de 1 000 tonnes est élaboré et accompagné de la livraison d'un

camion d'essai. La négociation se déroule sur le site d'Alsace Pellets et coïncide avec l'arrivée du camion d'essai. La granulométrie et le taux d'humidité des plaquettes correspondent parfaitement aux attentes du client. La comparaison visuelle dans le hangar avec une livraison d'un autre approvisionneur marque clairement la différence qualitative entre les deux origines. La proposition de contrat est immédiatement acceptée par le client malgré un prix majoré de 50 % !

La filiale ONF Énergie, créée le 12 avril 2006, signe son premier contrat d'approvisionnement le 24 avril 2006.

La société Alsace Pellets symbolise l'acte de naissance d'ONF Énergie et à l'inverse, nous souhaitons accompagner le développement économique de ce partenaire historique.

L'avenir

Satisfaite du partenariat commercial avec ONF Énergie, Alsace Pellets projette d'augmenter fortement ses capacités de production et de transférer voire accroître ses installations sur autre site à proximité présentant une surface utilisable largement supérieure. La décision industrielle et économique est prise, mais il reste à trouver la matière première pour alimenter les chaînes de production dans la durée. Alsace Pellets a donc sollicité ONF Énergie en novembre 2006 pour élaborer un contrat d'approvisionnement pluriannuel portant sur un tonnage de 20 000 tonnes de plaquettes en 2007 pour monter à court terme (2009-2010) à 50 000 ton-

nes. La forte concurrence sur la ressource issue des forêts publiques ne permet pas à ce jour de fournir plus de 10 000 tonnes mais le partenariat avec les coopératives forestières privées devrait permettre de compléter l'offre pour atteindre l'objectif demandé, au moins à court terme. L'augmentation conséquente du prix du bois en 2006 et la demande de plaquettes écorcées conduisent à une proposition commerciale supérieure de 50 % à celle contractualisée en avril. L'augmentation est certes significative mais ne fait que prendre en compte les paramètres économiques du moment et les coûts de production.

L'objectif est déjà de réussir à franchir ce premier seuil quantitatif pour envisager dans un deuxième temps les possibilités techniques et économiques d'extension du contrat.

Dominique DARPIN

responsable bois-énergie
ONF, DT Bourgogne – Champagne-
Ardenne
dominique.darphin@onf.fr

Luc LIBAULT

ONF, DR Martinique
(ex responsable bois-énergie
Franche-Comté)
luc.libault@onf.fr

Philippe GOUPIL

ONF Énergie
philippe.goupil@onf.fr

Bilan de quatre arboreta de comportement en Centre-Ouest : quels résultats ?

Suite à d'importants dépérissements, quatre arboreta de comportement ont été installés en Centre-Ouest entre 1990 et 1998 pour tenter d'identifier des essences de remplacement, dans deux contextes bien différents : le dépérissement du hêtre en forêt domaniale de Chizé et le dépérissement du Pin maritime en dune « calcaire » littorale. À l'arrivée, pas d'essence miracle mais des conclusions très pragmatiques.

Contexte et motif de ces comparaisons d'espèces

Le dépérissement du hêtre en forêt de Chizé

Avec ses étés très secs, un fort ensoleillement estival et des sols peu profonds à faible réserve en eau, cette forêt des plateaux calcaires charentais se situe à la convergence entre la limite d'aire de répartition du hêtre de plaine et celle de l'érable de Montpellier. Aussi le hêtre se maintient-il difficilement dans ce milieu. Seule la persévérance du forestier a su lui conserver une place dans les parcelles les plus favorables.

Néanmoins, les dépérissements massifs observés ont poussé les forestiers à rechercher parmi d'autres essences celle qui pourrait avantageusement remplacer le hêtre.

Le dépérissement du Pin maritime en dune « calcaire » littorale

Le pin maritime a été introduit artificiellement au cours du 19^e siècle le long du littoral atlantique dans le but de stopper l'avancée des dunes vers les terres. Outre son rôle de lutte contre l'érosion éolienne, cette forêt littorale a désormais également une fonction paysagère importante vis-à-vis du tourisme estival.

La zone dunaire du littoral centre atlantique est caractérisée par des étés chauds et secs, des sols très

basiques (jusqu'à pH 8 ou 9) et des apports salins plus ou moins importants. Ces contraintes sont moins marquées sur les dunes du littoral aquitain, plus favorables à la production du pin maritime.

C'est dans la zone littorale centre atlantique que sont apparus, au milieu des années 1980, les premiers signes de dépérissement caractérisés par des jaunissements d'aiguilles et une surmortalité des arbres. Ces observations ont immédiatement déclenché la mise en place d'un programme de recherche autour de ce problème. Parmi les axes d'étude envisagés, la recherche d'une essence providentielle susceptible de remplacer le Pin maritime a motivé la mise en place de 3 arboreta de comportement.

Quelles essences tester ?

Dans les 2 cas, nous nous trouvons sur des stations difficiles, caractérisées en particulier par de fortes sécheresses estivales. Aussi, le choix des essences à tester s'est porté sur des essences plutôt méditerranéennes. Les travaux menés par P. Allemand (INRA, 1989) et les résultats obtenus dans des arboreta d'élimination ont permis de dresser une liste d'espèces potentielles.

D'autre part, l'observation de la dynamique forestière locale a mis en évidence la présence de quelques espèces disséminées ayant naturellement colonisé le milieu et qui pouvaient s'avérer intéressantes.

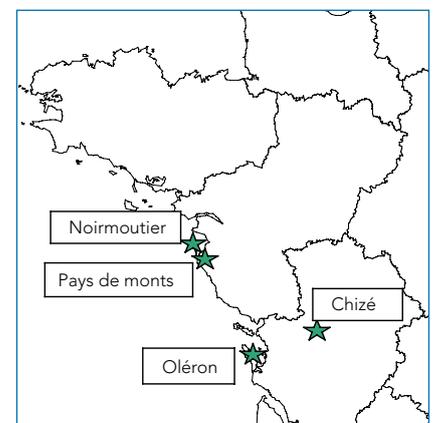


Fig. 1 : localisation des 4 arboreta

Enfin, pour certaines espèces, la comparaison de différentes origines (provenances) a été entreprise.

Caractéristiques des 4 arboreta

Se reporter aux tableaux 1 et 2 (et figure 1). Chaque essence testée constitue une « modalité » ou « traitement ». Chaque arboretum est composé de placeaux de traitement portant chacun une essence donnée ; la surface de ces placeaux est variable selon les sites. Le groupement, à raison d'un placeau par modalité, de toutes les modalités testées compose un bloc. Chacun des arboreta de la dune littorale est monobloc ; à Chizé, l'arboretum se répartit sur trois parcelles comprenant chacune 3 ou 4 blocs, sachant que toutes les modalités ne sont pas testées sur toutes les parcelles.

À l'intérieur de chaque plateau, une placette de mesure est délimitée. Seuls les arbres appartenant à cette placette font l'objet de mesures et de notations, soit 40 à 80 plants mesurés par placette suivant les sites.

La liste des espèces testées par site est récapitulée dans le tableau 3.

L'arboretum de comportement de Chizé

est implanté sur 3 parcelles sous forme de 3 dispositifs. Les plants utilisés ont été élevés en godets de tourbe de 400 cm³ (1.0G, 1+1G, 2.0G ou 2+1G suivant les essences) sauf les hêtres, chênes et les alisiers blancs plantés à racines nues. Le chêne chevelu a été planté selon 2 techniques : racine nue et godet de 400 cm³.

Les 3 arboreta de comportement de la dune « calcaire » littorale

ont été mis en place sans répétition des modalités. Dans ces 3 arboreta, les plants utilisés ont été élevés en godets de tourbe de 400 cm³ (1.0G, 2.0G ou 1+1G suivant les essences).

Le suivi des arboreta a consisté à relever régulièrement l'état sanitaire des plants et leur croissance en hauteur. Les dernières mesures ont été réalisées en 2003, avant de dresser le bilan.

Comportement des essences à Chizé : quelques essences sortent du lot

Voir les figure n° 2. En 2003, les plants sont âgés de 9-10 ans sauf les

quelques essences introduites lors de la dernière tranche de plantation, qui n'ont que 5 ans.

Globalement, pour les essences testées sur plusieurs parcelles, les résultats sont meilleurs lorsque la réserve utile augmente. Cette différence est cependant peu marquée pour les pins laricio.

Des résineux en tête

Le cyprès de Leyland donne les meilleurs résultats en termes de survie et de croissance. Il est suivi par les pins noirs (laricio de Corse et Calabre, noirs d'Autriche) qui affichent une très bonne reprise mais une croissance légèrement plus faible que le cyprès de Leyland. Le pin sylvestre et le calocèdre ont des niveaux de croissance analogues aux pins noirs mais un taux de survie légèrement inférieur.

Les autres résineux donnent des croissances nettement plus faibles avec des taux de survie variables. Les sapins se caractérisent notamment par des taux de reprise corrects mais des croissances très faibles.

Puis viennent quelques feuillus

Si les taux de survie sont en moyenne équivalents pour les 2 groupes d'essences, les croissances des feuillus sont sensiblement plus faibles que pour les résineux. Toutefois, les performances du merisier sont équivalentes à celles des pins noirs. Parmi les feuillus, c'est l'essence qui donne les meilleurs résultats. Les alisiers blanc et torminal ainsi que le frêne à fleur ont de bons taux de survie et une croissance encore acceptable en particu-

Parcelle	175	268	269
Dates de plantation	Mars 93 (tranche 1) Hiver 93-94 (tranche 2) Hiver 97-98 (tranche 3)*		Hiver 93-94 (tranche 2) Hiver 97-98 (tranche 3)
Surface du dispositif	4,5 ha	9 ha	11,5 ha
Nombre de blocs	3	3	4
Taille des plateaux de traitement	11 ares	11 ares	17,5 ares
Placette de mesure	40 plants	40 plants	40 plants
Caractéristiques « stationnelles »	Faible réserve utile Précédent Pin sylvestre	Réserve utile moyenne Précédent hêtre	Réserve utile moyenne Précédent hêtre
*dans les parcelles 175 et 268, la 3 ^e tranche correspond à une nouvelle plantation suite à l'échec de la plantation des hêtres (prov. Chizé) de la 1 ^{re} tranche.			

Tab. 1 : caractéristiques de l'arboretum de Chizé

Sites	Pays de Monts	Noirmoutier	Oléron
Dates de plantation	Décembre 1990	Décembre 1991	Janvier 1991 (tranche 1) Janvier 1992 (tranche 2) Automne 97 (tranche 3)*
Surface du dispositif	4 ha	3 ha	18 ha
Taille des plateaux de traitement	40 ares	24 ares	> 30 ares
Placettes de mesure	50 plants	80 plants	50 plants
Caractéristiques « stationnelles »	Sables calcaires salés Distance à l'océan : 1,6 km	Sables calcaires salés Distance à l'océan : 0,3 km	Sables calcaires salés Distance à l'océan : 0,75 km
* la 3 ^e tranche correspond à une nouvelle plantation de regarnis de cèdre du Liban pour pallier aux fortes mortalités observées pour cette essence dans la tranche 1			

Tab. 2 : caractéristiques des arboreta de dune littorale



Alisier torminal (14 ans) à Chizé, avec recru vigoureux

X. Mandret, ONF

Essences testées	Nom français	Arboreta de dune calcaire littorale			Arboretum de Chizé		
		Monts	Noirmoutier	Oléron	Parc. 175	Parc. 268	Parc. 269
<i>Abies cephalonica</i>	Sapin de Céphalonie	1		2 ^(b)	2	2	
<i>Abies nordmanniana</i>	Sapin de Nordmann						3
<i>Abies pinsapo</i>	Sapin d'Andalousie			1			
<i>Calocedrus decurrens</i>	Calocèdre						2
<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	1		1-2	1	1	
<i>Cedrus libani</i>	Cèdre du Liban			1-3			2
<i>Cupressocyparis X leylandii</i>	Cyprès de Leyland						2
<i>Cupressus arizonica</i>	Cyprès d'Arizona	1		1			
<i>Cupressus macrocarpa</i>	Cyprès de Lambert	1		1			
<i>Cupressus sempervirens</i>	Cyprès toujours vert	1		1			
<i>Larix decidua</i>	Mélèze d'Europe				1		
<i>Pinus brutia</i>	Pin de Chypre			2			
<i>Pinus halepensis</i>	Pin d'Alep			2	1		
<i>Pinus nigra laricio Corsicana</i>	Pin laricio de Corse	1		1	1	1	
<i>Pinus nigra laricio Calabrica</i>	Pin laricio de Calabre			1	1	1	
<i>Pinus nigra nigra</i>	Pin noir d'Autriche				1		
<i>Pinus pinaster</i>	Pin maritime	1	1 ^(a)				
<i>Pinus pinea</i>	Pin pignon, Pin parasol	1	1	1			
<i>Pinus sylvestris</i>	Pin sylvestre						2
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglas						2
<i>Acer platanooides</i>	Érable plane	1		2		2	
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore					3	
<i>Alnus cordata</i>	Aulne de Corse	1		1			
<i>Celtis australis</i>	Micocoulier		1	2			2
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre				1 ^(c)	1 ^(c)	2 ^(d)
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Frêne oxyphylle		1	2			2
<i>Fraxinus ornus</i>	Frêne à fleur		1				2
<i>Gleditsia triacanthos</i>	Févier d'Amérique			2	1		
<i>Ostrya carpinifolia</i>	Charme houblon			2			
<i>Platanus orientalis</i>	Platane				3		
<i>Prunus avium</i>	Merisier					2	
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Robinier faux acacia			2	1		
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu						2
<i>Quercus petraea</i>	Chêne sessile					2	2
<i>Quercus pubescens</i>	Chêne pubescent		1	2			
<i>Quercus robur</i>	Chêne pédonculé						2
<i>Sorbus aria</i>	Alisier blanc				2	2	
<i>Sorbus domestica</i>	Cormier			2		1	
<i>Sorbus torminalis</i>	Alisier torminal					1	
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul		1				

(a) : Provenances Tamrabta, Tamjoute (provenances marocaines) et Cabanac (provenance française)
 (b) : Provenances Mainalone, Grèce (provenances grecques) et Gorniès (provenance française)
 (c) : Provenance Chizé
 (d) : Provenances Chizé, Pyrénées-Orientales (2 placettes)

Tab. 3 : liste des essences testées dans les différents arboreta (les chiffres indiquent la tranche de plantation)

lier sur station à réserve utile moyenne. Ces résultats confirment les observations réalisées sur la forêt de Chizé où le bon comportement des fruitiers avait déjà été relevé.

Le cormier se classe également parmi les essences potentiellement intéressantes.

Les autres feuillus sont par contre en difficulté. Cela se traduit par de fortes mortalités et/ou par une croissance très ralentie, avec de fréquentes descentes de cime.

Le comportement du hêtre, essence de référence à Chizé, est décevant quelle que soit la provenance. Il pré-

sente des croissances faibles et une forte mortalité, atteignant jusqu'à 100 % dans 2 parcelles. Les chênes ne sont guère meilleurs. Si le taux de survie est légèrement plus élevé, la croissance reste faible. L'utilisation de plants à racines nues pour ces 2 essences a pu aussi accentuer le

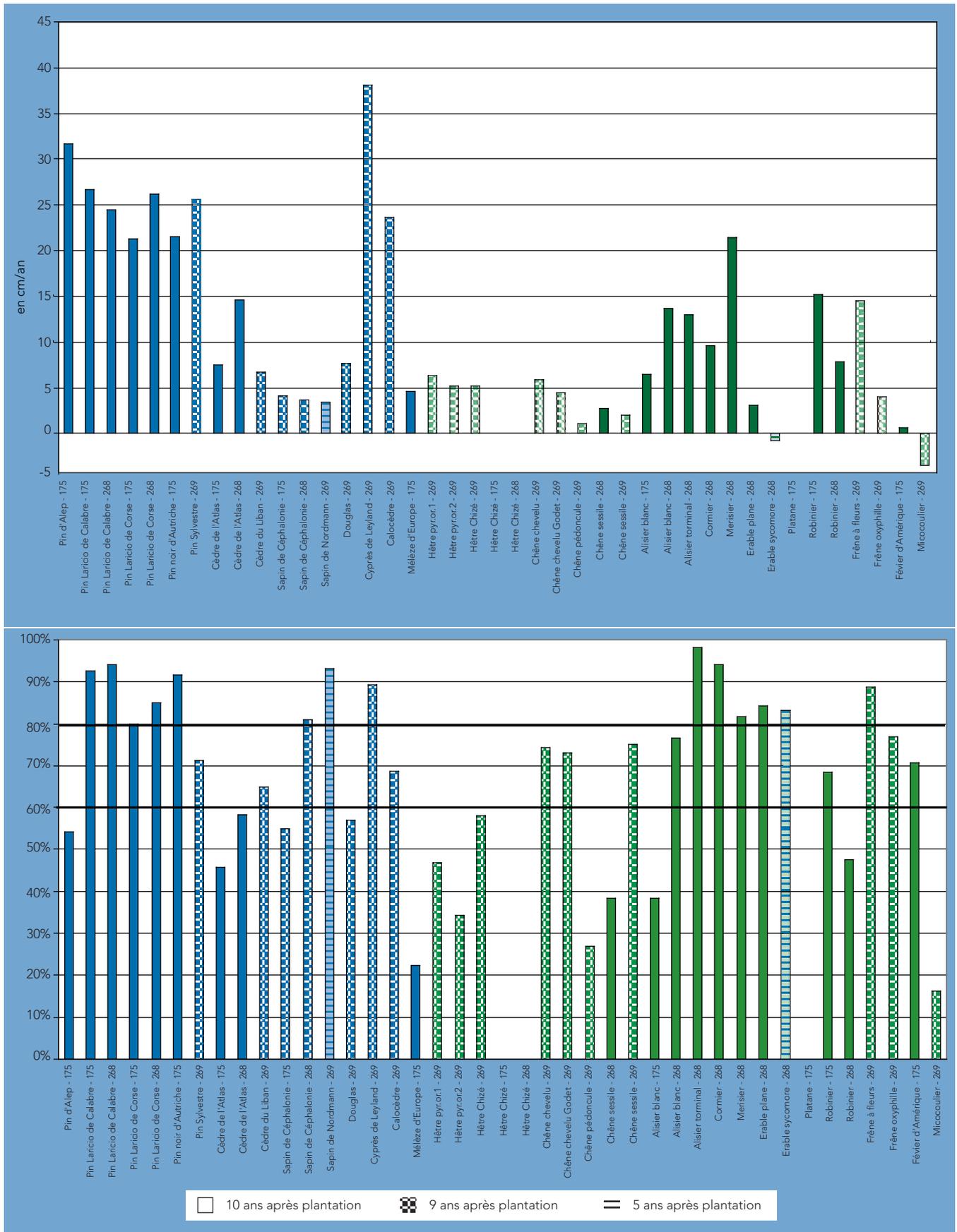


Fig. 2 : performances sur l'arboretum de chizé ; accroissement annuel moyen entre la plantation et 2003 (en haut) et taux de survie en 2003 (en bas)

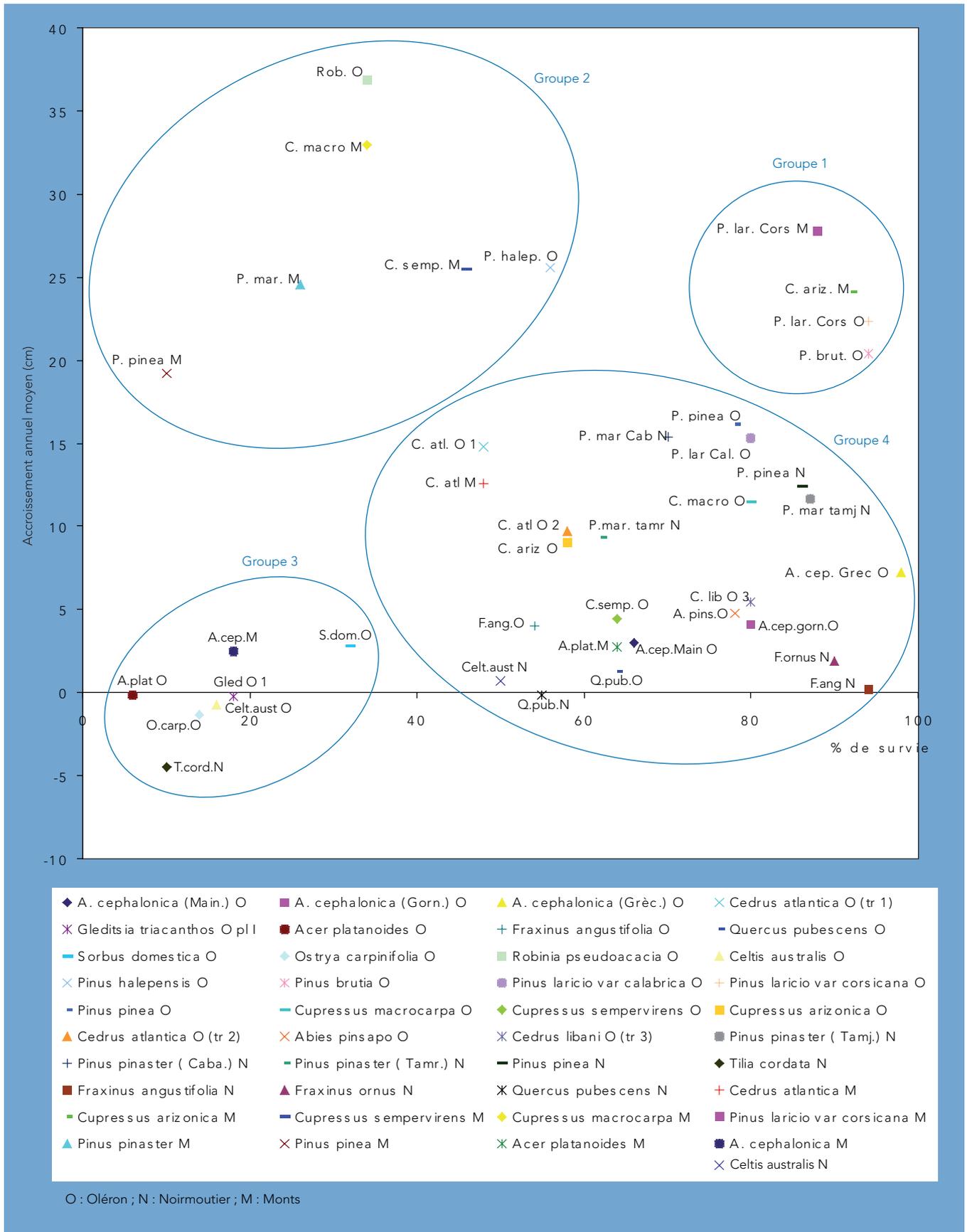


Fig. 3 : performances des essences testées dans les 3 arboreta du littoral en fonction de l'accroissement en hauteur annuel moyen depuis la plantation et du taux de survie



Verger, ONF

Sapin de Céphalonie (15 ans) à Oléron, avec recru vigoureux de pin maritime et chêne vert



Verger, ONF

Faible survie du frêne oxyphylle (15 ans) à Oléron

stress de transplantation.

Comportement des essences dans les arboreta du littoral : le pin laricio de corse domine

Les arbres sont âgés de 11 à 13 ans au moment du bilan. La figure n° 3 permet d'évaluer les performances des différentes essences testées à la fois sur la vigueur et sur la survie.

On distingue globalement 4 groupes d'essences :

■ Groupe 1, essences caractérisées par un bon taux de survie et une croissance correcte : le pin laricio de Corse, le pin de Chypre et le cyprès d'Arizona (à Monts seulement)

■ Groupe 2, essences ayant un faible taux de survie mais une croissance élevée : le robinier, le pin d'Alep et dans une moindre mesure le cyprès toujours vert, le cyprès de Lambert et le pin maritime dont les performances à Monts ne se répètent pas dans les autres sites. Le pin pignon se trouve dans la limite

« basse » de cette classe.

■ Groupe 3, essences très peu vigoureuses à croissance très faible et forte mortalité : le micocoulier, le cormier, le tilleul, le févier d'Amérique, le charme houblon, l'érable plane.

■ Groupe 4, essences ayant des croissances faibles à moyennes avec des taux de survie moyens : frênes, chêne pubescent, sapins, cyprès, cèdres, pin maritime, pin laricio de Calabre.

NB : l'aulne de Corse n'a pas survécu à Oléron comme à Monts. Il n'est donc pas représenté dans le graphique.

Il est difficile de tirer des conclusions sur chacune des essences dans la mesure où :

■ les résultats sont rarement comparables d'un site d'essai à un autre pour une essence donnée ;

■ les fortes mortalités affectant certaines essences limitent la crédibilité des résultats d'accroissement du fait d'une réduction parfois importante des effectifs mesurés.

On se limitera donc à constater la supériorité du pin laricio de Corse et du pin de Chypre sur toutes les autres essences testées, aussi bien sur la survie que sur la croissance. Pour le pin de Chypre, la prudence reste cependant de mise en l'absence de références sur plusieurs sites. De plus, cette essence reste marginale et méconnue.

Quant à l'essence de « référence », le pin maritime, ses résultats décevants traduisent bien les difficultés d'adaptation aux conditions particulièrement hostiles du milieu qu'il rencontre.

Conclusion

Avant l'installation de ces arboreta, certaines des essences testées dans ces dispositifs avaient déjà été évaluées en milieu méditerranéen (ALLEMAND, 1989) dans des arboreta d'élimination. Leur tolérance aux sols calcaires et au stress hydrique était apparue comme un atout

à explorer.

On retrouve dans ces tests quelques tendances qui avaient déjà été observées à savoir :

- de moins bonnes performances des essences feuillues par rapport aux résineux ;

- d'importantes variations de comportement selon les sites et les provenances : c'est particulièrement net lorsque l'on compare les 3 arboreta du littoral.

Les performances du cèdre de l'Atlas, des cyprès et du sapin de Céphalonie sont décevantes dans nos arboreta par rapport aux observations faites en milieu méditerranéen. Dans le cas du sapin de Céphalonie, les recommandations d'utilisation au dessus de 400 m n'ont cependant pas été suivies, ce qui peut expliquer cet échec. Sa sensibilité aux gelées printanières et sa croissance lente sont reconnues par ailleurs dans d'autres essais.

La plupart des essences adaptées au milieu méditerranéen ne sont donc pas utilisables dans les contextes qui nous préoccupent.

Quelques essences paraissent intéressantes...

À Chizé, on ne retiendra que l'intérêt des pins noirs et des fruitiers, le cyprès de Leyland faisant partie des essences exotiques non forestières.

Sur dune calcaire littorale, c'est le pin laricio de Corse qui offre les meilleures perspectives.

...mais à quel prix !

Le coût d'une plantation n'est pas négligeable surtout avec les difficultés que cela implique et qui sont nettement apparues dans ces arboreta.

D'une manière générale, des conditions de milieu défavorables engendrent des difficultés de reprise évitables : fortes mortalités, faibles croissances initiales, descentes de cimes, concurrence ligneuse ou herbacée...

Ainsi, les meilleures performances observées restent très... relatives. Si l'introduction du Pin laricio de Corse

a montré ses avantages sur dune calcaire littorale dans nos arboreta, d'autres expériences de plantation dans les mêmes stations ont donné des résultats décevants par rapport au Pin maritime venu naturellement. À Chizé, il a été observé, pour les espèces fruitières (alisier torminal, cormier et merisier), que les individus issus de rejets ou drageons apparus naturellement dans les interbandes étaient bien plus vigoureux que les arbres issus de la plantation.

De plus, nous nous trouvons ici dans des stations peu productives : faut-il alors investir dans des opérations coûteuses de plantation dont le retour sur investissement sera faible de toute façon ?

Tout cela conduit à penser que le recours à la plantation, quelle que soit l'essence, doit rester limité sur ce type de station.

La solution est à rechercher parmi les espèces en place...

Malgré des conditions de milieu difficiles, il existe une dynamique naturelle de végétation.

À Chizé, les plants ont dû lutter contre un abondant recru ligneux naturel qui a su profiter des espaces libres. Ce recru, constitué de hêtres, de chênes et de plusieurs fruitiers (notamment merisier et alisier) pourrait être mis en valeur par des interventions sylvicoles appropriées.

De même, sur dunes calcaires littorales, le pin maritime issu de régénération naturelle reste une essence d'intérêt. Même si sa longévité est réduite dans les stations les moins favorables, sa facilité de régénération et sa rapidité de croissance sont des atouts indéniables dans un contexte de forêt de protection plus que de production. D'autres essences ligneuses autochtones tendent à se développer en sous-étage des pinèdes. Il s'agit notamment du chêne vert accompagné parfois du chêne pubescent et du chêne pédonculé voire d'autres feuillus (frêne, érable) sur les stations méso-

philes. On assiste donc à une diversification naturelle de la forêt de pin maritime qu'il convient avant tout d'accompagner et de favoriser.

Cette forêt mélangée peut répondre aux attentes de ses gestionnaires et de ses utilisateurs, à savoir :

- la gestion à moindre coût d'une forêt peu productive ;
- la conservation génétique des espèces autochtones ;
- le maintien de la biodiversité¹ ;
- la constitution d'un relais en cas de disparition ou de raréfaction des espèces dépérissantes (hêtres, pins maritimes dans le cas présent).

Dans le cas particulier du littoral, elle peut également satisfaire à :

- une attente paysagère forte liée notamment à une activité touristique importante
- la protection de la dune contre l'érosion grâce à une meilleure couverture végétale dans certains secteurs fragilisés (impénétrabilité des taillis de chêne vert, effet brise-vent efficace).

...avec une gestion différente des essences dépérissantes

Parallèlement à la mise en place de ces arboreta, de nombreux essais ont été installés pour tenter de comprendre les dépérissements et pour tester différents scénarios sylvicoles susceptibles de résoudre ou au moins de ralentir le processus. Quelques principes de gestion s'en sont dégagés.

À Chizé, la gestion forestière doit abandonner l'objectif de conduite du hêtre en futaie régulière pure et s'orienter vers la gestion d'une forêt mélangée dans laquelle le hêtre est maintenu. Au besoin, des compléments de régénération peuvent être réalisés par des plantations d'essences d'accompagnement. Des essais sont en cours, notamment un essai de détournement de l'alisier, pour essayer de valoriser au mieux les feuillus précieux naturellement présents dans le mélange.

Sur dune calcaire littorale, il faut éclaircir vigoureusement les pinèdes car les fortes densités accentuent les

phénomènes de dépérissement. Le maintien des feuillus d'accompagnement garantira une meilleure pérennité du peuplement, notamment dans les stations les moins favorables au pin maritime. Là aussi, des essais sont en cours pour définir la sylviculture à appliquer sur les chênes verts.

Sandrine VERGER

Chargée de recherche-développement
ONF, DT Centre-Ouest
sandrine.verger@onf.fr

Bibliographie

ALLEMAND P., 1989. Espèces exotiques utilisables pour la reconstitution du couvert végétal en région méditerranéenne : bilan des arboreta forestiers d'élimination. Coll. Techniques et pratiques. Paris : INRA. 146 p.

AUREAU F., 1995. Sur la côte vendéenne, un partenariat d'un genre nouveau entre le chêne vert et le forestier. *Arborescences*, n°59, pp. 34-36

FAVENNEC J., 1999. Aménagement des forêts littorales : cas des forêts dunaires du littoral atlantique français. *Revue Forestière Française*, n° spécial « L'aménagement forestier hier, aujourd'hui, demain », pp. 217-229

JARRET P., BOUCHEIX B., 2001. Leçon d'un échec... réussi avec la nature sur les plateaux charentais. In « Pour une stratégie de reconstitution durable : guide pour la reconstitution des forêts après tempête. Paris : ONF, pp. 97-99

ONF/STIR Ouest, 1999. Gestion de la forêt du littoral Centre-Atlantique : synthèse de 10 années d'études. Bulletin d'information STIR Ouest, n°7, pp.7-32

ONF/STIR Ouest, 1999. Gestion forestière des stations calcicoles. Bulletin d'information STIR Ouest, n°7, pp.33-40

¹ d'autant que les forêts concernées sont, pour la plupart, dans le réseau Natura 2000, où l'introduction d'espèces de substitution serait contradictoire avec l'engagement de conservation des habitats forestiers.

Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat : ce que Renécofor nous a appris

Au début des années 1990, le « Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers » (Renécofor) a été mis en place par l'Office National des Forêts. En 1997, une étude dendrochronologique, associant mesures et datation des cernes d'accroissement annuels, a été entreprise afin de caractériser l'histoire des 102 peuplements avant l'installation du réseau. Dans le contexte du réchauffement climatique et notamment des effets potentiels des vagues de chaleur observées récemment, la question de la sensibilité des essences et de leur adaptation en réponse à ces modifications environnementales est devenue une question majeure de la communauté forestière internationale. Une meilleure connaissance des seuils de réponse des espèces au climat « moyen » mais également aux extrêmes, en liaison avec les conditions locales de croissance, devrait permettre de guider le gestionnaire dans les futurs choix des espèces à favoriser selon les contextes locaux. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions, des analyses visant à expliquer le déterminisme

climatique des variations interannuelles de croissance ont été entreprises sur une partie des chênaies, des hêtraies, des pessières et sapinières du réseau. Cet article présente la synthèse des analyses menées sur 41 des 102 peuplements. Ces sites retenus correspondent à 5 espèces et couvrent une vaste gamme de conditions pédoclimatiques (**figure 1** et **tableau 1**). Les objectifs sont de définir les principaux paramètres climatiques modulant la croissance radiale pour chaque essence, de mettre en évidence les effets des conditions locales sur la sensibilité au climat et de comparer la réponse entre espèces.

Aperçu méthodologique

Les 1 220 arbres concernés ont été carottés à cœur à 1,30 m (26 à 30 arbres par site ; 99 205 cernes). Les carottes ont été mesurées, puis interdatées à l'aide d'années caractéristiques de façon à s'assurer du bon synchronisme des séries de cernes. Ces années reflètent généralement l'effet de conditions climatiques extrêmes et correspondent aux années pour lesquelles au moins 75 % des arbres du peuplement

présentent une variation relative de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente. La part de la variation des largeurs de cernes non liée au climat (qui correspond au « bruit » indésirable) est ensuite éliminée à l'aide de programmes mathématiques spécifiques. Dans une dernière étape, les séries d'indices obtenus sont moyennées par date de façon à obtenir les chronologies moyennes de chaque peuplement. C'est à partir de ces courbes moyennes que les relations cerne - climat sont analysées. Divers paramètres statistiques sont calculés afin de juger de la qualité et de la force du signal climatique contenu dans les cernes.

La contrainte hydrique a été quantifiée en durée et en intensité par un modèle de bilan hydrique journalier. Après paramétrage précis des données stationnelles (réserve utile maximale en eau du sol, indice de surface foliaire, durée de la saison de végétation) et l'intégration des données climatiques journalières relatives aux conditions météorologiques de chaque peuplement (issues du réseau Météo France), le modèle simule

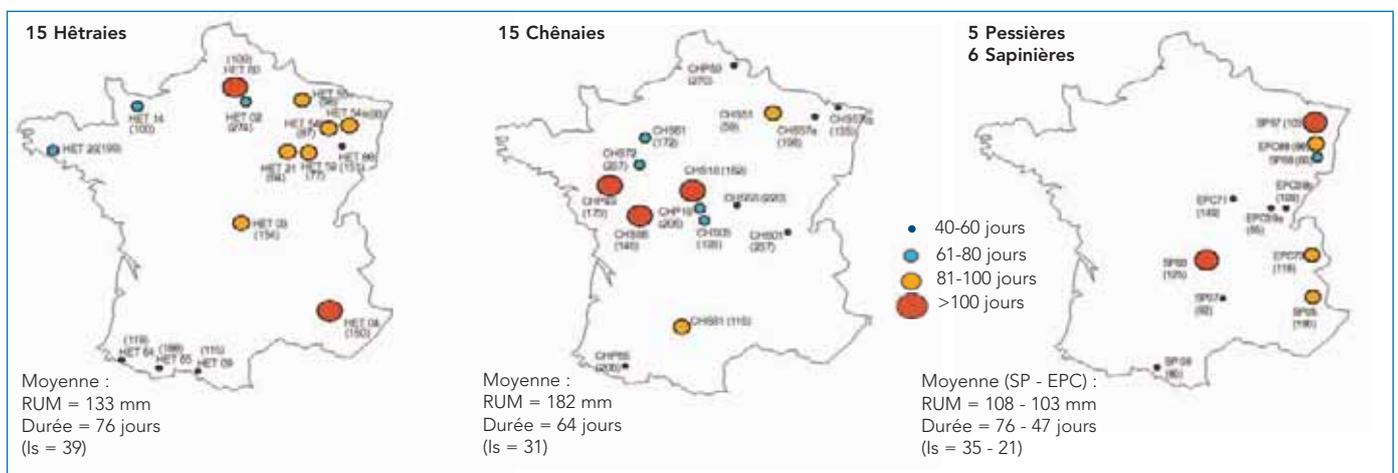


Fig. 1. : localisation des 41 peuplements et caractéristiques de la durée moyenne du déficit hydrique (période 1961-1990)

HET = hêtre, CHS = chêne sessile, CHP = chêne pédonculé, SP = sapin pectiné, EPC = épicéa commun, avec le numéro du département. Entre parenthèses, la réserve utile maximale en eau du sol (en mm). Is = indice de déficit hydrique (plus la valeur est élevée et plus la sécheresse est intense).

	Hêtre	Chêne	Epicea	Sapin
Nb peupl.	15	15	5	6
Nb arbres	450	443	149	178
Nb de cernes	33810	33614	14237	17544
Ht (m)	21,4-30,2	17,7-30,4	22-34,8	25,1-29,3
Dia (cm)	29-50	25-44	41-52	39-58
Age (ans)	54-160	54-139	58-185	54-168
Dens. (n/ha)	201-633	190-569	401-746	322-427
Alt.(m)	50-1300 (470)	57-370 (222)	600-1700 (1028)	400-1360 (1040)
RUM (mm)	77-274 (133)	59-270 (182)	65-149 (110)	60-190 (108)
Lc (mm)	1,36-3,80 (2,3)	1,34-2,38 (2,0)	1,48-4,00 (2,38)	0,99-3,38 (2,47)
Années caractéristiques				
1994		40 %		
1991				- 21 %
1989	- 34 %	- 25 %		
1986			- 24 %	- 35 %
1982		47 %		
1977	62 %			52 %
1976	- 43 %	- 31 %		
1973			- 24 %	
1972		16 %		
1969				34 %
1963			41 %	
1962		- 24 %	- 29 %	- 31 %
1959	- 35 %			
1958	64 %	59 %		
1956		- 27 %	- 24 %	- 45 %
1955			38 %	35 %
Paramètres climatiques apparaissant dans				
minimum 50 % des cas	BH juin (26,6 %)		BH juillet et août (19,6 %)	BH août à oct (n-1) (19,8 %)
			Temp max août	
40 à 50 % des cas	BH juil.	BH juillet (18,5 %)	Temp max juillet	BH oct (n)
		BH oct (n-1)		Temp max fév
		Temp max déc (n-1)		
30 à 40 % des cas		BH juin		BH juin à août
		BH août		Temp max juin
		BH sept		
		BH oct		

Tab. 1 : synthèse des conditions écologiques des 41 peuplements et des résultats des analyses climatiques

Les caractéristiques dendrométriques correspondent aux valeurs en 1994. RUM = Réserve utile maximale en eau du sol (en mm). Lc = largeur moyenne du cerne par peuplement (en mm). Les valeurs entre crochets correspondent aux moyennes. Pour les années caractéristiques, les valeurs correspondent aux variations moyennes de croissance. Un signe « - » indique une croissance réduite. Pour les paramètres climatiques, les variables en gras indiquent les facteurs prépondérants pour chaque espèce. Le chiffre entre crochets indique le pourcentage de variations des largeurs de cernes expliqué par ce paramètre. BH = bilan hydrique (indice de déficit hydrique). Temp max = température maximale moyenne (en °C). n= année en cours ; n-1 = année précédente.

le changement du contenu en eau du sol entre deux journées successives. In fine, les deux variables utilisées pour l'analyse des relations cerne — climat sont un indice et un nombre de jours de déficit hydrique. Cet indice peut être cumulé mensuellement ou annuellement ou sur des périodes plus précises. Il reflète les processus de régula-

tion stomatique des arbres selon l'évolution du contenu en eau du sol. Quand ce dernier passe en dessous du seuil de 40 % de la réserve utile maximale, il y a fermeture des stomates et donc diminution de la transpiration et de l'assimilation carbonée. La croissance des arbres est freinée. Plus la valeur de cet indice est grande et

plus l'intensité de la contrainte est forte pour les peuplements. Le nombre de jours de déficit hydrique traduit la durée de la mise en place de ces processus et donc la durée de la sécheresse. Sur la période 1961-1990 et, pour l'ensemble des 41 peuplements, il y a eu en moyenne 67 jours de déficit hydrique annuel (figure 1). En moyenne, les hêtraies ont subi davantage de contraintes que les chênaies (10 à 15 jours de plus) en liaison avec des conditions stationnelles moins favorables (notamment des réserves utiles plus faibles).

Pour chaque peuplement, le déterminisme climatique des variations de croissance a été analysé sous deux angles. Dans un premier temps, seules les années caractéristiques ont été comparées aux données climatiques. Cette analyse permet de mettre en évidence l'effet de conditions météorologiques extrêmes mais rares sur la croissance. Dans un second temps, les variables et les périodes clés jouant un rôle significatif sur la croissance des arbres sur le long terme ont été définies à partir de l'analyse des corrélations entre les paramètres climatiques et les indices de croissance (calcul des modèles climatiques). Les paramètres climatiques ont été organisés de façon à former des combinaisons de 24 régresseurs mensuels (12 indices de déficit hydrique et 12 températures minimales ou maximales) associant à la fois les données de l'année n et l'année n-1 afin de prendre en compte d'éventuels arrière-effets. Selon les données climatiques disponibles, les analyses ont porté sur une période de 32 (1963-1994) à 46 ans (1949-1994).

Sensibilité aux évènements extrêmes

Sur la période 1946-1994, l'analyse a montré qu'en moyenne 3 années par décennie ont présenté des

croissances remarquables. Des sécheresses exceptionnelles ou des froids hivernaux intenses sont les facteurs les plus souvent en cause dans ces comportements particuliers.

Les hivers très rigoureux 1955-1956 et 1985-1986 (hivers les plus froids sur l'ensemble de la période étudiée) se sont traduits par des réductions fortes de croissance dans la majorité des peuplements de résineux (en moyenne -37 %), et pour la moitié des chênaies pour l'hiver 1955-1956 (-27 %). Ces réductions sont associées aux températures minimales extrêmes de février qui ont présenté des valeurs moyennes plus basses de 7 à 12 °C par rapport à la normale. Pour ces deux années froides, la réduction de croissance a été supérieure d'en moyenne 60 % dans les sapinières par rapport aux pessières confirmant la plus grande sensibilité du sapin au gel intense.

Les chênaies et les hêtraies ont réagi fortement en 1976, 1989 et 1958. Les années 1976 et 1989, qui correspondent à des croissances réduites, se sont caractérisées par des sécheresses au moins deux fois supérieures à la normale en durée et/ou intensité. En revanche, l'année de forte croissance 1958 est l'expression d'un stress hydrique modéré voire nul

(figure 2). Par rapport aux chênaies, les années sèches se sont traduites par des réductions supérieures de près de 40 % dans les hêtraies et l'année humide par un cerne plus large d'environ 10 %. Les travaux d'écophysiologie menés depuis les dernières années permettent d'apporter des éléments explicatifs en liaison avec les différences d'anatomie du bois, de phénologie et de régulation du flux transpiratoire. Il est également important de souligner que les hêtraies étudiées présentent globalement des conditions stationnelles et climatiques moins favorables que les chênaies les rendant ainsi plus sensibles aux aléas. Ainsi, pour le hêtre, la sensibilité aux conditions météorologiques annuelles dépend très étroitement de la réserve utile maximale en eau du sol. La sensibilité est maximale sous le seuil de 100 mm.

Concernant les deux chênes, il n'est pas apparu d'années caractéristiques spécifiques à chaque espèce, mais les variations de croissance ont été plus prononcées dans le cas des chênes pédonculés. Ceci est cohérent avec les résultats d'autres travaux utilisant la même approche dendroécologique. Ils coïncident également avec les résultats récents des travaux

d'écophysiologie qui montrent que la distinction physiologique des deux espèces est réelle mais n'apparaît évidente que dans le cas de déficits hydriques importants et prolongés. Les différences quant à la structure des vaisseaux et des cernes et aux propriétés hydrauliques expliquent, en partie, ces comportements différents.

D'autres événements ont marqué également les peuplements comme, par exemple, les sécheresses de 1962 pour les résineux et les chênes, de 1991 pour les sapinières et de 1973 pour les pessières. À l'opposé les années « humides » 1977, 1969, 1955 ont coïncidé avec des fortes croissances pour le sapin, 1955 et 1963 pour l'épicéa, 1982 et 1994 pour les chênes (sessiles).

Réponse aux conditions moyennes

Les modèles climatiques expliquent entre 10 et 60 % des variations interannuelles des largeurs de cernes et prennent en compte entre 2 et 8 paramètres. Pour toutes les essences, le bilan hydrique joue un rôle central dans le déterminisme de ces variations alors que l'effet direct des températures est moins fréquent (tableau 1 et figure 3).

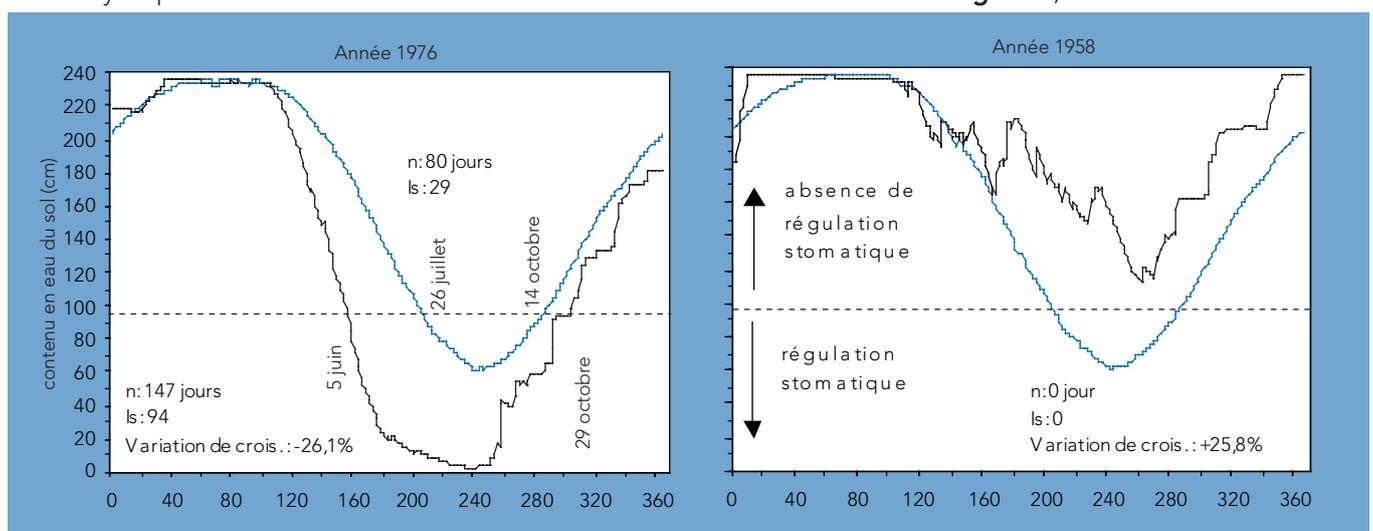


Fig. 2 : évolution (trait gras) de la réserve utile en eau du sol pour l'année sèche 1976 et l'année humide 1958 dans la chênaie sessiliflore de la forêt domaniale de Bercé (72)

Les dates de début et de fin de la sécheresse sont indiquées, ainsi que les deux valeurs des indices de stress : n = nombre moyen de jours de sécheresse, Is = indice moyen de déficit hydrique. Le trait fin indique l'évolution moyenne de la réserve en eau (1961-1990) avec, en italiques, les conditions moyennes. Le trait en pointillé indique le seuil de 40% de la réserve à partir duquel il y a régulation stomatique (diminution de la transpiration et de la croissance).

Pour le hêtre, la croissance est très fortement dépendante des conditions d'humidité du début d'été. Le déficit du mois de juin explique en moyenne à lui seul près de 30 % de la variabilité interannuelle. La synthèse menée sur les hêtraies européennes montre que ce résultat est généralisable. Les conditions climatiques de juin (ou juillet) interviennent dans plus de 80 % des études. Des déficits hydriques pendant cette période sont également d'autant plus défavorables que la station est sèche : faible réserve utile maximale en eau du sol, exposition chaude, etc. Les analyses montrent également que même si le hêtre réagit fortement à un stress par une croissance réduite, il est capable de retrouver rapidement un niveau satisfaisant d'accroissement si les conditions redeviennent favorables. Par exemple, pour les sécheresses de 1976 ou 1989, il a été très souvent observé un retour à une forte croissance un ou deux ans après le stress. Dans l'état actuel de nos connaissances, le hêtre apparaît donc comme une des essences les plus sensibles au déficit hydrique mais également comme une des plus réactives (capacité de récupération très rapide).

Contrairement aux hêtraies, **les chênaies** ne semblent pas répondre à un paramètre unique mais à plusieurs facteurs dont le poids et la nature peuvent fortement varier selon les sites. Si certaines années extrêmes permettent de distinguer les deux espèces de chêne, la réactivité au climat moyen apparaît similaire pour les deux essences. Pour le chêne, c'est le bilan hydrique du milieu d'été (juillet) qui est le facteur climatique prépondérant en expliquant environ 20 % des variations d'accroissement mais seulement pour un peuplement sur deux. Pour une partie des chênaies, il apparaît également que l'absence de sécheresse en automne et des températures hivernales clémentes participent à

la mise en place d'un cerne large l'année suivante (**tableau 1**). Le niveau d'explication relativement faible des modèles (moins de 30 % en moyenne) pourrait être mis en relation avec les conditions pédo-climatiques globalement peu limitantes des chênaies étudiées : faible altitude, climat tempéré humide associé à des sols profonds et à réserve utile en eau élevée. Ces différences de conditions écologiques pourraient également expliquer en partie les différences notables de comportement observées entre les chênaies et les hêtraies (stations globalement moins favorables).

Concernant les résineux, le comportement de **l'épicéa commun** se rapproche de celui du hêtre avec un rôle majeur des conditions de l'année en cours et une mise en place du cerne fortement sous la dépendance de la sécheresse estivale. La période clé est centrée sur les mois de juillet et août dont le déficit hydrique cumulé explique à lui seul environ 20 % de la variation des accroissements (**tableau 1**).

La réponse du **sapin** est très différente. Le signal climatique est essentiellement lié au déficit hydrique de la fin de la saison de végétation précédente (août à octobre). Ainsi, la mise en place du cerne de l'année *n* dépend en grande partie des arrière-effets c'est-à-dire des conditions de l'année précédente. Un hiver clément semble également jouer un rôle important à travers un effet stimulant des températures clémentes de février et/ou avril. Pour mettre en évidence des effets du déficit hydrique de l'année en cours, il est nécessaire de considérer séparément le bois initial et le bois final dans le cerne annuel. Avec une telle analyse, il apparaît clairement que c'est la mise en place du bois initial de l'année *n* qui est étroitement dépendante du déficit hydrique cumulé de la fin de saison de l'année *n-1*. Ce seul facteur explique

près de 30 % de la variation de la largeur de ce compartiment. Plus tard dans la saison, c'est l'intensité de la sécheresse du début d'été (juin-juillet) qui module la mise en place du bois final (taux d'explication moyen de 18 %). Comme pour les chênes, la croissance du sapin apparaît donc fortement sous la dépendance des conditions de l'année précédente.

Les résultats sur les résineux sont cohérents avec le modèle général de la réponse des conifères aux basses latitudes ou altitudes qui met en évidence le rôle central de la sécheresse sur la mise en place du cerne. En effet, les 11 peuplements étudiés correspondent à des forêts de basses altitudes (moyenne : 1 004 m) du Sud-Ouest de l'Europe soumises à des climats plutôt « chauds » et humides. Une analyse à plus grande échelle montre que l'importance du bilan hydrique décroît au fur et à mesure de l'augmentation de la latitude et/ou de l'altitude. Ainsi, en Europe Centrale ou du Nord, l'action du facteur thermique devient prépondérante (effet direct et unique). D'une façon similaire, la sensibilité au facteur thermique augmente selon le gradient altitudinal. La température, à travers notamment les gelées et son effet sur la longueur de la saison de végétation, devient le facteur explicatif essentiel dès que l'on passe les seuils de 1 300 - 1 500 m d'altitude.

Conclusions

Pour les contextes de plaine et de basses altitudes (< 1 000 m) étudiés, c'est bien le bilan hydrique qui joue un rôle central dans la dynamique des peuplements. Ainsi, hêtre et épicéa réagissent fortement à la sécheresse de début de saison alors que les chênes et le sapin semblent être davantage sous la dépendance des conditions de fin d'été ou d'automne. Pour ces deux espèces, des effets thermiques hivernaux sont également

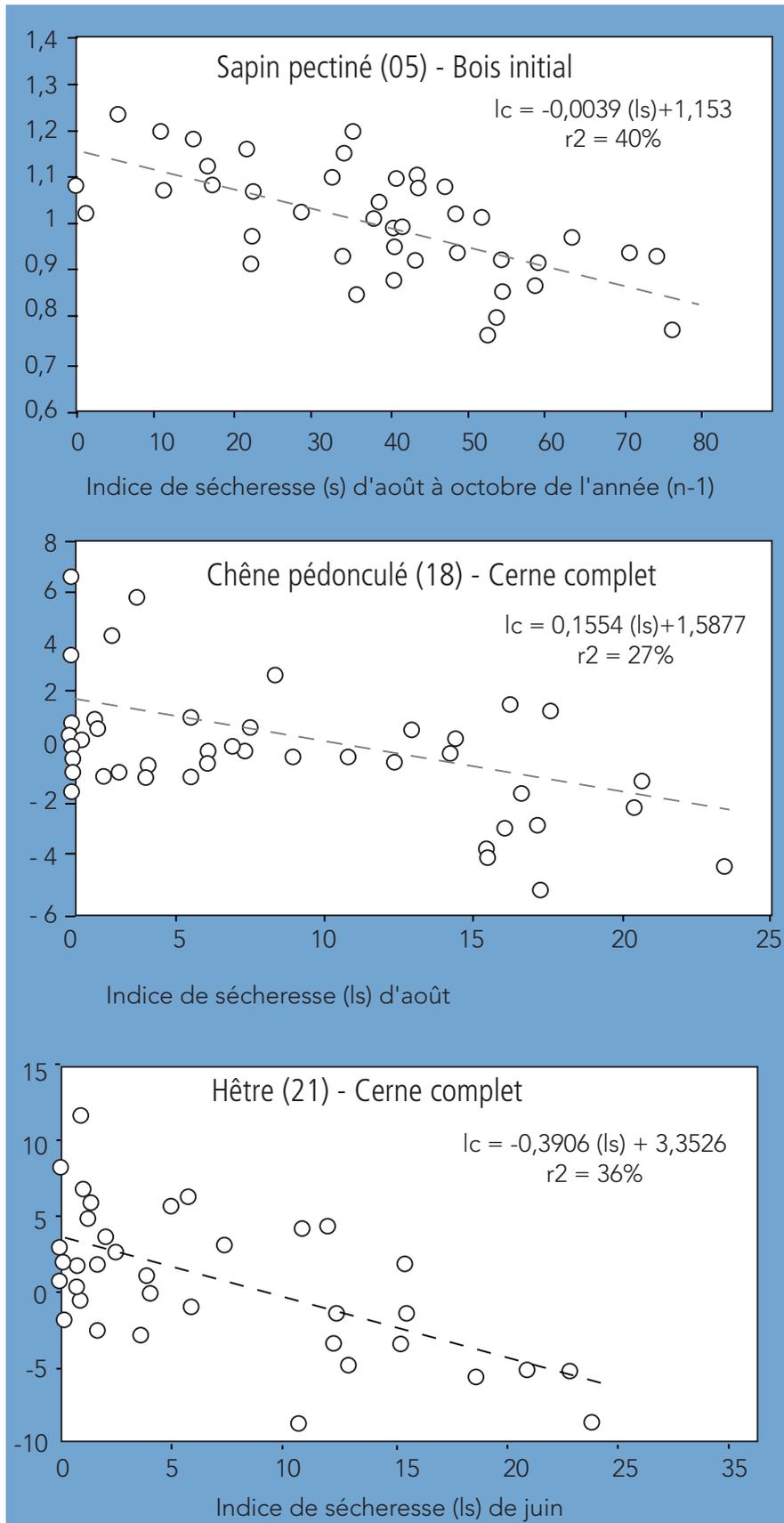


Fig. 3 : exemple de corrélation entre les indices de croissance (Ic) et les indices de sécheresse (Is) pour trois peuplements

Plus la valeur de Is est élevée et plus la sécheresse pour la période correspondante est intense.

souvent observés (effets positifs des températures clémentes). Même s'il est impossible de prédire avec certitude la dynamique future des écosystèmes forestiers dans le cadre du réchauffement climatique et l'augmentation envisagée de la fréquence et de l'intensité des sécheresses, il apparaît cependant très important de bien considérer dès maintenant le choix des essences et l'adéquation avec les stations pour minimiser les risques de dysfonctionnement futur. Un réchauffement hivernal notable ainsi que des modifications des périodes d'apparition des épisodes chauds et secs pourraient donc avoir des conséquences très différentes selon les essences. Pour le hêtre, par exemple, un seuil de 100 mm de réserve utile correspond à un niveau de forte sensibilité aux aléas. Cependant, cette essence a toujours été capable de « récupérer » même sur des stations limites. Cela ne signifie pas que dans les années futures de nouveaux comportements (dépérissements ?) apparaissent suite à des dépassements de « seuils physiologiques » non observés jusqu'à présent. Ainsi, un suivi précis des effets des canicules de juillet 2003 et d'août 2006 devrait apporter des nouveaux éléments quant à la résistance réelle de cette essence à de tels événements. Il est évident que le même suivi doit être entrepris pour les autres essences, et que le praticien doit être, plus que jamais, à « l'écoute de sa forêt ».

François Lebourgeois,

UMR LERFOB-INRA-ENGREF Nancy,
 lebourgeois@engref.fr

La bibliographie complète est disponible auprès de l'auteur. Les résultats détaillés sont disponibles dans des articles publiés dans les revues *Trees* (2005, 19 : 385-401), *Revue Forestière Française* (2005, 57 : 33-50 ; 2006, 58 : 29-44 et 2007, sous presse) et *Annals of Forest Science* (2007, sous presse).

à suivre

n° 16 - printemps 2007

Prochain dossier : biodiversité et gestion forestière parution : juin 2007

Le dossier accompagnera, pour l'illustrer, la sortie prochaine du nouveau guide ONF sur la prise en compte de la biodiversité dans la gestion forestière. Rien de spectaculaire ; il s'agira de biodiversité ordinaire dans la gestion courante.

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* sur *intraforêt*

Tous les textes de ce numéro sont accessibles au format PDF dans la rubrique qui lui est désormais consacrée dans le portail de la direction technique (Recherche et développement/Documentation technique). Accès direct à partir du sommaire.

Pour rechercher un article particulier, utilisez le moteur de recherche de la base documentaire



Si vous désirez nous soumettre des articles, prenez contact avec nous :

ONF - Département recherche
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

