RenDez-Vous techniques

n° 22 - automne 2008

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

Dossier
p.21

La forêt et l'eau

Alisier torminal, alisier blanc, hybrides…

p. 61

Office National des Forêts

RenDez-Vous techniques

Directeur de la publication
Bernard Gamblin
Rédactrice en chef
Christine Micheneau
Comité éditorial
Joseph Behaghel, Yves Birot, Jean-Marc Brézard, Léo Castex, Jean-Michel Decoud, Jean-François Dhôte, Patrice Hirbec, Laurence Lefebvre, Pierre Leroy, Alain Macaire, Jérôme Piat, Thierry Sardin
Maquette, impression et routage
Imprimerie ONF - Fontainebleau
Conception graphique
NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique
page de couverture
En haut : C. Gassmann
En bas : L. Lévèque, ONF
Page d'ouverture de dossier : CEMAGREF ; C. Deck, ONF ; E. Lucot Université Franche-Comté
Périodicité
4 numéros par an, et un hors série
Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par abonnement auprès de la cellule de documentation technique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : dtcb-documentation@onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73
Prix au numéro (hors frais de port) :
n° ordinaire : 10 euros ; hors série : 20 euros
Abonnement : 35 euros : 1 an = 4 numéros ordinaires (prix du hors série pour les abonnés = 15 euros)
Dépôt légal : janvier 2009

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

sommaire

n° 22 automne 2008

3 connaissances
Restauration de deux bassins versants acidifiés des Vosges par amendement calco-magnésien
par Dominique Messant, Jean-Marc Baudoin, Jérôme Bock, Étienne Dambrine, François Guérold et Claude Nys

13 connaissances
Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique
par la Commission Ressources Génétiques Forestières

17 méthodes
La « décolonisation » en forêt domaniale des Pays de Monts
par Jean-Paul Bouffet et Alain Auffret

21 dossier pratiques
La forêt et l'eau

61 connaissances
Alisier torminal, alisier blanc, hybrides… comment s'y retrouver ?
par Brigitte Musch, Sylvie Oddou-Muratorio, Laurent Lévèque, Michel Vallance, Bénédicte Le Guerroué

68 méthodes
La sylvi-trufficulture et la truffe de Bourgogne : un nouveau pari qui concerne les forestiers
par Léon Wehrlen

73 pratiques
La truffe de Bourgogne, une opportunité des plateaux calcaires haut-saônois
par Hélène Périer, Gérard Besançon et Alain Macaire

éditorial

Rendez-Vous Techniques se concentre principalement, cet automne, sur deux thèmes fondamentaux pour la gestion forestière : la diversité génétique et l'eau.

La diversité génétique des peuplements forestiers est une des données importantes de la sylviculture ; elle ne se voit pas au premier coup d'œil, mais conditionne fortement l'avenir. Cette diversité est le « carburant » indispensable pour que puisse fonctionner la sélection naturelle, mécanisme conduisant à l'adaptation, dans un contexte incertain de changement climatique. La Commission nationale des Ressources Génétiques Forestières nous le rappelle en termes simples, avec des recommandations générales pour la gestion forestière courante. Elle est aussi au cœur de l'article sur les mécanismes d'hybridation des alisiers, dont on verra dans le prochain numéro les implications sylvicoles. La connaissance de ces processus aide à déterminer comment recruter et cultiver de l'alisier torminal en mélange dans les peuplements feuillus sans risquer d'altérer le potentiel génétique de l'espèce.

De façon bien plus « visible », la forêt et l'eau sont intimement liées. Sans reprendre l'ensemble de notre dossier, il est à noter que chacun s'accorde à reconnaître les bienfaits de la forêt pour l'eau en tant que « ressource en eau ». Certains aspects font encore débat comme le souligne Vasken Andréassian à propos du régime des eaux de surface. Le bénéfice qualitatif est, lui, avéré et se décline selon deux axes principaux : d'une part la forêt apparaît comme le mode d'occupation du sol le plus « protecteur », ce qui conforte notre gestion et ouvre des perspectives en matière de boisement des périmètres de captage, sous certaines conditions évidemment ; d'autre part, la production sécurisée d'eau « propre » exige des « bonnes pratiques » couramment appliquées par l'ONF dans la gestion durable des forêts publiques, sauf à contractualiser ponctuellement des mesures très spécifiques.

Hors dossier mais dans le même ordre d'idée, l'expérience de restauration de bassins versants acidifiés dans les Vosges par amendement calcomagnésien élargit le sujet : il s'agit ici de restaurer les sols victimes d'acidification excessive pour améliorer globalement le fonctionnement des écosystèmes forestier et aquatique, et améliorer ce faisant la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. L'objectif (ambitieux) est de tester et vérifier les processus écologiques à l'échelle du bassin-versant.

L'impact positif de la gestion forestière durable sur la qualité de la ressource en eau est rappelé par chacun des articles ; la valorisation économique, par le propriétaire forestier, de ce qu'il apporte à la société, n'est que très peu évoquée. Cela pose clairement la question du paiement du service environnemental rendu. Il faut aller jusqu'à envisager le partage des bénéfices faits par les sociétés qui exploitent ces gisements, quasi gratuitement aujourd'hui.

Le Directeur technique et commercial bois
Bernard GAMBLIN

Restauration de deux bassins versants acidifiés des Vosges par amendement calco-magnésien

Les sols naturellement pauvres et acides du massif vosgien sont vulnérables à la dégradation, notamment par les dépôts atmosphériques acidifiants accumulés depuis des décennies. Dans les secteurs les plus sensibles, cela affecte gravement la vitalité des peuplements forestiers et même la qualité des cours d'eau, avec des risques induits pour la santé humaine. D'où l'idée que l'amendement à l'échelle du bassin versant peut, en restaurant la qualité des sols, rétablir le bon fonctionnement des écosystèmes : testée sur deux sites atelier, elle donne après quatre ans des résultats concluants, avec des nuances.

Le développement industriel[1], depuis le dix-neuvième siècle, s'est caractérisé par un usage toujours croissant d'énergies fossiles. La combustion de ces énergies fut responsable d'émissions dans l'atmosphère de polluants acidifiants (NO_x et SO_2) qui, véhiculés parfois sur de grandes distances, se sont transformés en acide sulfurique et acide nitrique. Plus connue depuis les années 70 sous le terme de « pluies acides », cette pollution se dépose sur les écosystèmes terrestres sous forme de pluies, de neige, de brouillards, de poussières, de gaz et d'aérosols (Irwin 1989 *in* Baudoin 2007).

Les sols du massif vosgien sont naturellement pauvres et acides. Les plus sensibles d'entre eux, c'est-à-dire les plus pauvres en cations basiques (notamment Ca et Mg), s'avèrent incapables de « digérer » les dépôts atmosphériques polluants, s'appauvrissent en éléments minéraux et s'acidifient plus encore. Cette dégradation se poursuit aujourd'hui malgré la diminution sensible des dépôts acidifiants depuis une trentaine d'années. Ainsi 35 % des sols du massif vosgien sont passés du stade acide à très acide entre 1970 et 1990 (Dupouey *et al.* 1998) malgré la réduction, en Europe, des émissions de dioxyde de soufre de 61 %, d'oxyde d'azote de 26 % et d'ammoniaque de 24 %, entre 1980 et 2002 (Baudoin 2007). L'acidité des eaux du massif vosgien est également en augmentation depuis près de quarante ans (Probst *et al.* 1999, Angeli 2006) et la déminéralisation qui l'accompagne s'aggraverait même dans certains secteurs des Vosges (Tixier 2004).

Plusieurs hypothèses ont pu être avancées pour expliquer cet apparent paradoxe : l'influence sous-estimée et sous-évaluée des composés azotés (agriculture, automobile), la diminution des dépôts alcalins et la consommation toujours plus massive d'énergies fossiles par les pays émergents.

L'acidification et l'appauvrissement des sols ont des conséquences sur la santé et la vitalité des peuplements forestiers mais aussi sur la qualité des eaux. Le pouvoir tampon des sols est altéré et après un temps de latence plus ou moins long, l'acidification se communique aux eaux. La déminéralisation qui s'ensuit s'accompagne très souvent d'une augmentation de la concentration de certains métaux, notamment de l'aluminium. Ces eaux acides sont toxiques pour de nombreux invertébrés aquatiques, pour les poissons, et sont impropres à la consommation humaine en raison notamment de la présence

1 Une autre forme de pollution acidifiante est d'origine essentiellement agricole et se manifeste par la libération d'ammoniaque, transformé en ammonium, lui même oxydé en nitrate par les bactéries du sol.

d'aluminium voire de plomb dissous provenant des canalisations de distribution.
De nombreuses études internationales confortées par plusieurs études françaises dans le cadre du programme DEFORPA[2], ont démontré l'intérêt de l'amendement calco-magnésien pour améliorer la qualité des sols en leur apportant les minéraux susceptibles d'en neutraliser l'acidité, et au-delà revitaliser les forêts dépérissantes et plus généralement le fonctionnement des écosystèmes.

On peut certes amender une rivière ou un lac par dépôt direct de carbonate de calcium dans les eaux, ou bien une parcelle forestière seule, mais les réponses sont partielles, les effets peuvent ne pas être durables, les interactions entre les différents compartiments de l'écosystème ne sont pas prises en compte. Amender à l'échelle du bassin versant est la seule technique qui permette une réponse mesurable de cette action de fond sur l'ensemble des compartiments de l'écosystème : sols, eaux, végétation. C'est pourquoi l'ONF, l'INRA, le CNRS/LIMOS, et l'Université de Metz ont entrepris ensemble, dès 2001, une étude destinée à tester en vraie grandeur l'efficacité de l'amendement à l'échelle de bassins versants. Nous en présentons ici les résultats, quatre ans après l'épandage, ainsi que ceux d'une étude annexe demandée par la préfecture des Vosges concernant l'impact de l'amendement sur l'habitat du grand tétras, espèce menacée emblématique des hautes Vosges, dans le cadre de la mise en place de la ZPS « Massif vosgien ».

	Vosges Cristallines Site de Cornimont, sur granite	Vosges Gréseuses Site du Val de Senones, sur grès
Commune	**Cornimont**	**Moussey**
Bassin versant amendé : superficie totale forêts	Goutte de Lonfoigneux 75,8 ha FD de Cornimont (18,3 ha) FC de Cornimont (57,5 ha)	Basse des Escaliers 122,6 ha FD du Val de Senones (122,6 ha)
Bassin versant témoin : forêts	Ruisseau de Wassongoutte FD de Cornimont	Basse de Gentil Sapin FD du Val de Senones

Tab. 1 : présentation des sites atelier

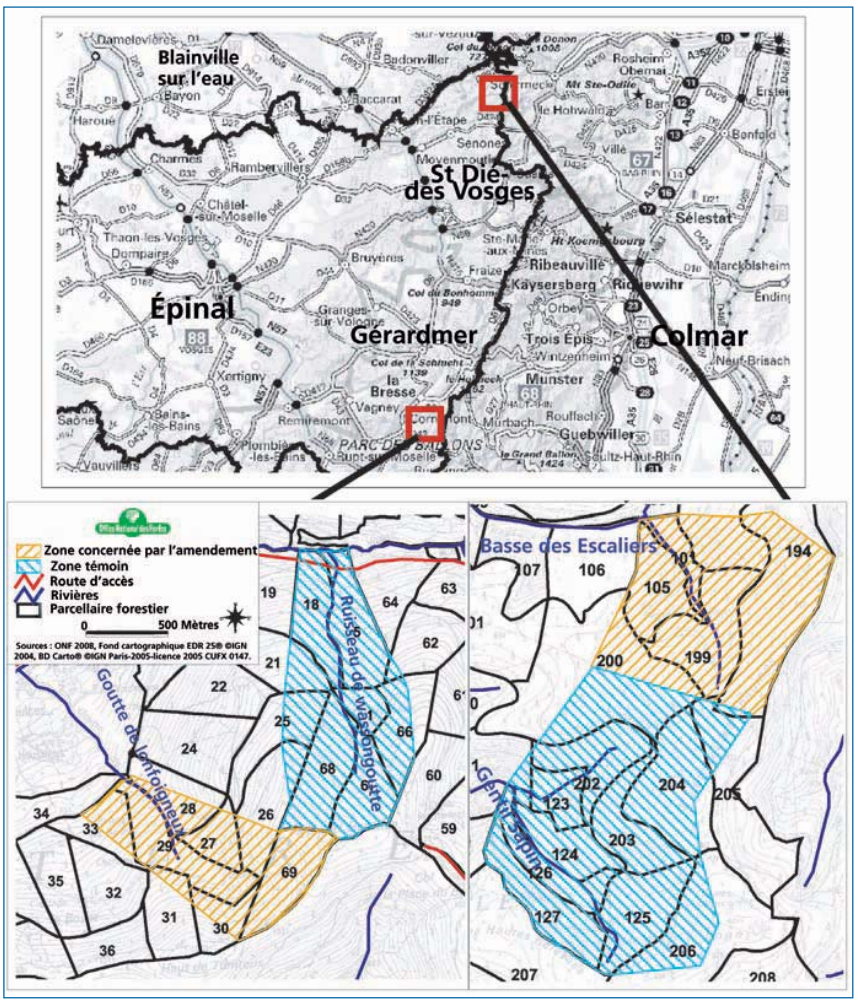


Fig. 1 : carte des sites atelier de Cornimont (à gauche) et Val de Senones (à droite)

2 Programme de recherche interministériel (agriculture, environnement, recherche) : DÉpérissement des FORêts et Pollution Atmosphérique (1984–1991).

Description des sites d'étude (sites atelier)

Deux sites, respectivement sur substrats gréseux et granitique (figure 1) ont été retenus, chacun comprenant deux bassins versants « acides », l'un amendé et l'autre à titre de témoin. En parallèle, des ruisseaux témoins non acides situés à proximité des bassins versants représentaient la qualité de référence à restaurer.
Un travail préalable de cartographie réalisé en octobre 2001 a permis de faciliter l'installation des placettes de mesures, représentatives des principales unités pédologiques. L'état initial des peuplements forestiers (dendrométrie, état sanitaire, composition foliaire), des sols (description, composition chimique et stocks) et de la végétation a été réalisé entre l'automne 2001 et le printemps 2002. Les analyses de sol ont permis de calculer la formule active et le dosage du produit à l'aide du logiciel REGESOL (INRA).

Les produits utilisés étaient composés d'un mélange de roches broyées : roches calcaires du Muschelkalk et dolomies issues de la carrière de Empfingen (Allemagne, Forêt Noire), gypse de la carrière de Trichtingen (Allemagne, Forêt Noire), potasses d'Alsace et phosphates israéliens (ces derniers uniquement sur Senones). Ces produits ont été contrôlés vis-à-vis de leur teneur en métaux lourds. La composition chimique du mélange s'élevait à 70 % de $CaCO_3$, 17 % de $MgCO_3$, 10 % de $CaSO_4$ et 3 % de KCl, ce dernier incorporé à titre de traceur hydrologique.

L'opération d'épandage s'est déroulée entre octobre et novembre 2003, par hélicoptère, à raison de 2,8 t/ha sur les 123 ha du site de Cornimont sur granite, et de 2,5 t/ha sur les 76 ha du site du Val de Senones sur grès.

Dispositif d'étude

L'impact de l'amendement sur la croissance, l'état sanitaire (coloration du feuillage-défoliation) et la végétation est suivi à l'aide de placettes permanentes de mesures de 0.34 ares, associées par couples Témoin/Amendé. Sur Cornimont (Granite), 6 couples de placettes permanentes ont été installés. Tous les arbres précomptables ont été inventoriés initialement, puis à intervalles de 3 ans. Il s'agit d'un peuplement irrégulier à petits bois, d'environ 25 à 28 m de haut, d'une densité de 400 à 650 tiges/ha, constitué d'un mélange de 2/3 de sapin, 20 % de hêtre et 13 % d'épicéa.
Sur Senones, 8 couples de placettes permanentes ont été installés. La majorité de la forêt étant dans une zone fortement affectée par la tempête, les relevés dendrométriques n'ont concerné qu'un seul couple ; l'inventaire des arbres précomptables y montre qu'il s'agit d'un peuplement irrégulier à petits bois, d'environ 29 à 31 m de haut, d'une densité de 350-450 tiges/ha, constitué d'un mélange de 2/3 de sapin et 1/3 d'épicéa.

La qualité chimique des ruisseaux est évaluée par l'analyse à une fréquence globalement mensuelle des paramètres suivants : cations majeurs totaux : Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Si, anions majeurs : NO_3, NO_2, Cl, F, SO_4, PO_4, C organique, spéciation de l'Al : Al^{3+}, complexes Al-OH, Al-Cl, Al-SO_4, Al-PO_4, Al-Si et Al-F, Al polymérique, Al organique, pH, conductivité, alcalinité totale (ANC*), métaux lourds (ces derniers n'atteignent nulle part leur seuil de dosabilité).

Pour évaluer la qualité biologique, l'étude de la décomposition de la matière organique allochtone dans 6 ruisseaux (2 témoins acides, 2 amendés des bassins versants et 2 témoins non acides à proximité des sites) a été réalisée au moyen de feuilles d'aulne et de hêtre disposées selon deux types de sachets : grillage plastique souple à maille de 10 mm et filets nylon à maille 0,5 mm, l'objectif étant d'apprécier l'influence des invertébrés aquatiques et notamment des gros déchiqueteurs sur la décomposition des feuilles. Les feuilles de hêtre des sacs à grosse maille ont servi à l'analyse des communautés fongiques et des invertébrés benthiques.

Pour mesurer l'effet de l'amendement sur l'habitat du tétras, 4 modalités sont testées sur chacun des sites. Sont ainsi évalués les effets croisés de l'amendement et de l'abroutissement par les cervidés sur la myrtille : témoin/amendé/enclos/exclos. Les enclos mesurent 16x16 m. Les observations sont réalisées sur des carrés permanents de 1 m² à raison de 20 carrés par modalité. Les mesures réalisées annuellement sont : relevés floristiques, fréquence, recouvrement, hauteur de la myrtille, ainsi que biomasse et analyses minérales.

* La Capacité de Neutralisation de l'Acide (Acid Net Capacity — ANC) correspond à la présence de minéraux alcalins dans la roche et comprend les carbonates et les silicates.

Les résultats en 2007 : l'influence du substrat

Les principaux résultats, 4 ans après amendement, s'avèrent assez homogènes sur les compartiments sols et végétation mais sont très différenciés pour ce qui est de l'évolution des qualités physico-chimiques et biologiques des cours d'eau.

Comme on le verra plus spécifiquement ci-après, la réponse des cours d'eau à l'amendement dépend fortement de la roche mère. Sur granite à plagioclase (site de Cornimont), compte tenu d'un crassin (horizon induré peu perméable d'origine périglaciaire existant vers 40 cm de profondeur), l'écoulement vertical est freiné et se fait latéralement à

faible profondeur, avec un transfert assez rapide des eaux. Sur grès (site de Val de Senones), la porosité restant très importante jusqu'à près de 50 mètres de profondeur, le temps de résidence de l'amendement est donc très long, et probablement de l'ordre de quelques décennies. Il s'ensuit que l'acidité actuelle des ruisseaux sur granite résulterait de dépôts récents, alors que sur grès elle proviendrait de dépôts passés (Angeli 2006). Et tout logiquement l'amendement de 2003 se répercute d'ores et déjà sur la composition du ruisseau sur substrat granitique alors que l'effet sur le ruisseau sur substrat gréseux risque fort de ne pas se faire sentir avant l'aube des années 2020.

Effets de l'amendement sur l'évolution de la qualité physico-chimique des cours d'eau

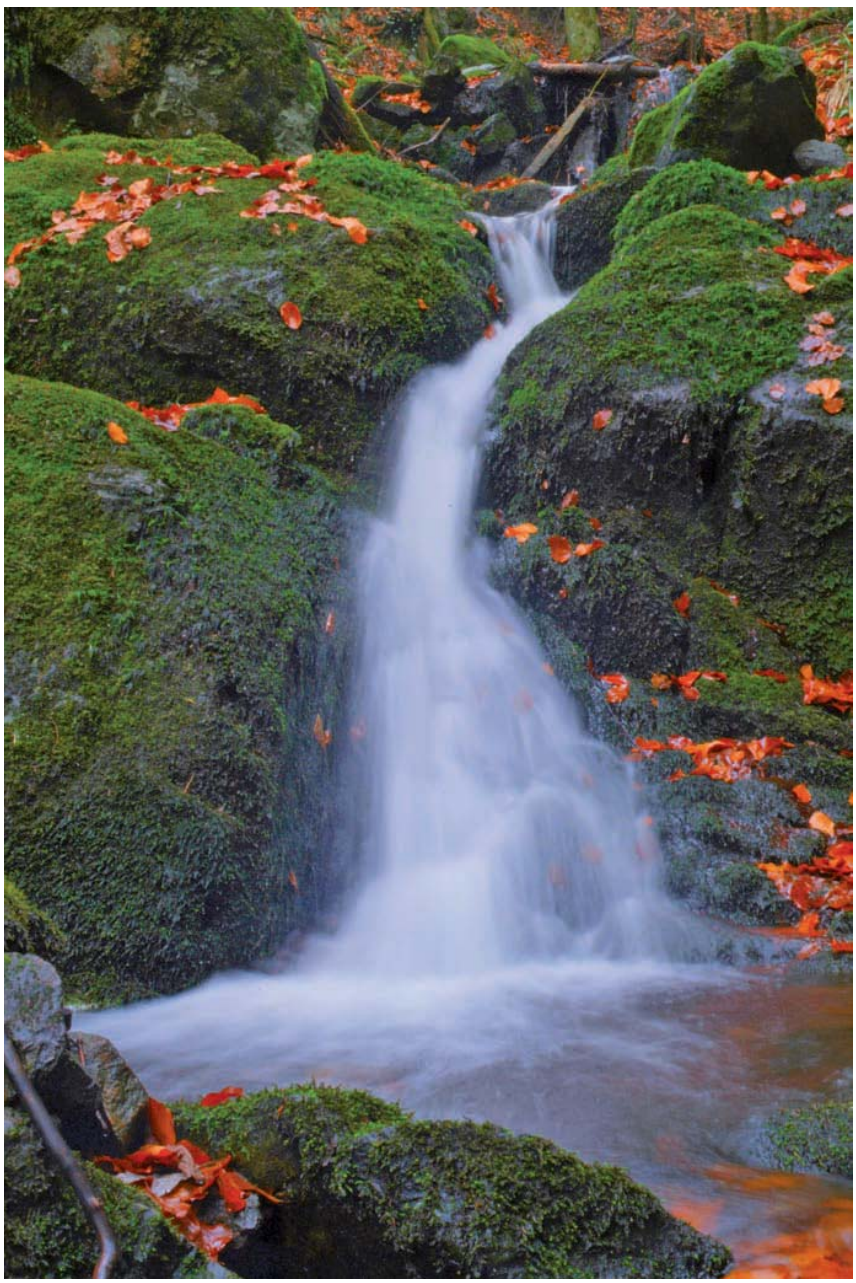
Une amélioration différenciée selon les bassins versants

Sur granite, le pH des ruisseaux augmente rapidement et très fortement après amendement (apport immédiat des éléments épandus par ruissellement ou directement dans les cours d'eau) et reste par la suite plus élevé que celui du ruisseau témoin sauf en période de crue hivernale. L'amplitude de cette réponse est cependant à nuancer : même si elle peut être jugée localement forte par rapport aux concentrations minérales initiales (de l'ordre du doublement pour Ca et Mg), les concentrations en Ca observées restent assez modestes. Il n'en demeure pas moins que l'amendement a initié une restauration rapide mais partielle de la physico-chimie des eaux. Elle se caractérise par une augmentation du pH, de la conductivité, de l'ANC, de la concentration en cations basiques, et par une diminution importante de la concentration en aluminium total. De plus, selon les bilans d'exportation plus de 95 % des éléments minéraux apportés (Ca, Mg et K) sont encore soit retenus par le sol, soit engagés dans les cycles biologiques ; l'amélioration, déjà sensible, devrait donc se perpétuer.

Sur grès, à l'exception d'un effet immédiat et temporaire après amendement dû à l'arrivée directe de produits dans les eaux, aucune évolution physico-chimique n'est actuellement observable.

Effets de l'amendement sur la qualité biologique des cours d'eau

La toxicité des eaux acides a provoqué directement, et par des effets en cascade, une importante érosion de la biodiversité dans ces écosystèmes en faisant disparaître un grand nombre d'espèces animales, végétales et microbiennes dans les ruisseaux touchés[3]. La dis-



F. Guérold, Université Metz

Feuilles de hêtre en décomposition dans un ruisseau forestier

3 Une baisse du pH des eaux en étiage en dessous de 6 provoque une disparition de 40 à 70 % de la richesse taxonomique (Guérold et al. 1997, cité par Nedeltcheva 2005)

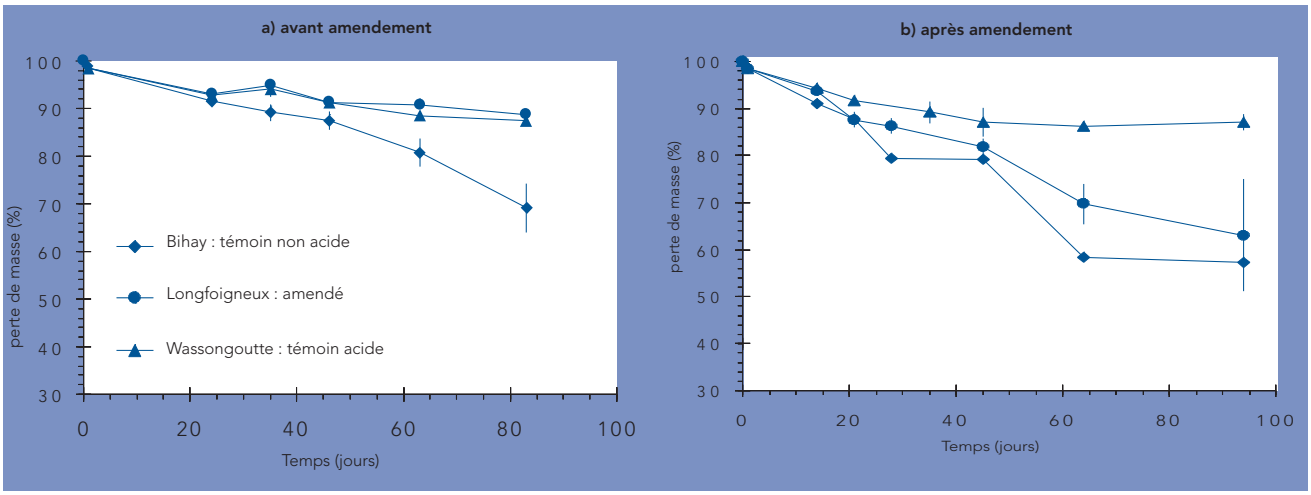


Fig. 2 : dégradation des litières de hêtre dans 3 ruisseaux du site granitique de Cornimont avant (a) et après (b) amendement

parition de la truite en est un exemple mais de nombreuses autres espèces (insectes, crustacés, mousses, champignons aquatiques) sont également sensibles.

Le fonctionnement écologique des ruisseaux forestiers repose en grande partie sur la décomposition des feuilles mortes qui tombent à l'automne (photo). Cette matière organique produite à l'extérieur de l'écosystème « cours d'eau » sert de nourriture à une multitude d'organismes aquatiques. Les champignons aquatiques sont les premiers à l'utiliser. Par leur action, ils fragmentent les feuilles, dispersant dans le milieu des particules fines qui servent à leur tour de nourriture à de nombreux animaux. Mais les champignons enrichissent également les feuilles en protéines, les rendant plus appétentes pour certains invertébrés qui, à leur tour, vont s'en nourrir et produire dans le milieu des particules. Finalement, ces invertébrés pourront servir de nourriture à la truite. Dans les cours d'eau acides, les feuilles ne se décomposent presque plus, signe que le fonctionnement écologique de ces eaux est fortement perturbé et que toute la chaîne est touchée.

Des litières qui se décomposent plus vite

L'amélioration de la qualité physico-chimique du ruisseau après amendement du bassin versant granitique (Cornimont) a rapidement entraîné une amélioration de la décomposition des litières dont la vitesse reste néanmoins inférieure à celle observée dans le ruisseau témoin non acide, mais s'en approche avec le temps (figure 2). Cette reprise de la décomposition des feuilles peut s'expliquer par une augmentation marquée de la richesse en champignons aquatiques puisque 10 nouvelles espèces sont apparues. Le rétablissement fonctionnel observé sur le ruisseau amendé sur substrat granitique est corrélé avec la diminution significative de ses concentrations en aluminium, en dessous du seuil de toxicité généralement admis pour les organismes aquatiques (200 µg. L^{-1}). Même si la récupération n'est pas encore complète, elle est de bon augure dans ce cours d'eau dont la biodiversité aquatique était très faible.

Une amélioration sensible de la diversité des champignons aquatiques

Par rapport aux ruisseaux non acidifiés, les ruisseaux acides se caractérisent par une forte diminution de la diversité des communautés fongiques aquatiques (hyphomycètes), de l'ordre de – 45 à – 74 %. La concentration d'aluminium en paraît la principale cause.

L'amélioration significative de la qualité physico-chimique du ruisseau amendé sur granite s'est traduite par un effet très encourageant sur ces communautés. Malgré une incapacité de migration depuis l'aval compte tenu du mode de dispersion passif des spores par le courant, une restauration importante de leur diversité est apparue. L'amélioration de la qualité de l'eau, et particulièrement la diminution des concentrations en aluminium, a permis l'installation d'une dizaine de nouvelles espèces qui aboutit à une richesse totale proche de celle des ruisseaux les plus diversifiés (figure 3 page suivante).

Une augmentation de la biomasse des macro-invertébrés, mais pas de leur diversité

Concernant les macro-invertébrés benthiques, les études préalables ont confirmé l'importante réduction de la richesse naturelle de leur communauté en milieu acidifié et le bouleversement profond de leur structure

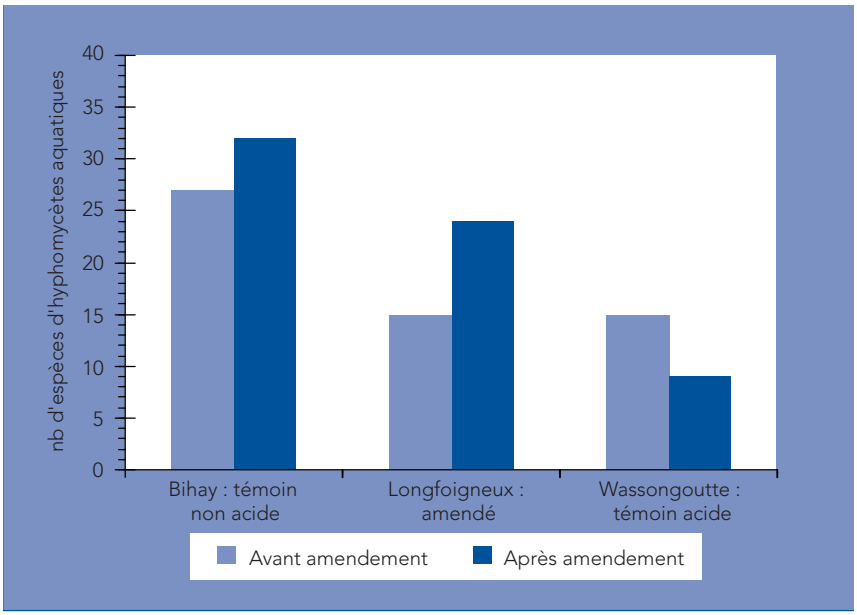


Fig. 3 : diversité en hyphomycètes aquatiques associés aux litières de hêtre en décomposition avant et après amendement

fonctionnelle. La restauration physico-chimique du ruisseau amendé sur granite n'a pas amélioré la diversité totale. À ce jour, l'absence de restauration de la communauté d'invertébrés n'est toutefois pas surprenante compte tenu de leur faible capacité de dispersion et de recolonisation vers l'amont. L'occurrence d'épisodes acides résiduels, à la faveur de crues par exemple, peut aussi annihiler les efforts de recolonisation. Cependant quelques écosystèmes préservés et diversifiés à proximité des sites acidifiés peuvent représenter des zones de dispersion. D'autre part certaines modifications de la structure des communautés (notamment l'augmentation de la présence des grosses larves de trichoptères déchiqueteurs, entraînant une augmentation significative de la biomasse de ces invertébrés) les rapprochent des structures de ruisseaux non acides et augurent bien de futures modifications fonctionnelles positives.

Le retour de la truite

Le plus marquant peut-être des effets de l'amendement est le retour de la truite. Après des années d'absence, ce poisson emblématique des Vosges recolonise naturellement le ruisseau amendé sur granite. De même, le taux de réussite des alevinages réalisés par la société de pêche s'améliore de manière sensible (communication Association de Pêche de Cornimont).

Effets de l'amendement sur les peuplements forestiers et la végétation

Des forêts en meilleure santé

L'amendement conduit à une amélioration globale et rapide de l'état sanitaire des peuplements, en particulier sur granite (Cornimont). Dès la deuxième année la fréquence des arbres jaunissants est moindre sur les zones amendées (moins de 5 % d'arbres jaunissants après chaulage contre 40 % sur le témoin de Cornimont). Le pourcentage de défoliation est significativement plus faible dans les zones amendées, pour les essences prépondérantes (sapin et hêtre) de Cornimont. On ne note cependant pas d'effet notable sur la défoliation du sapin sur grès (Senones).

En revanche, l'effet sur l'accroissement n'est pas encore démontré. Sachant, comme on a pu l'observer sur d'autres sites de recherche (Nys *et al.* ou Renaud *et al.*, 2001), que l'effet positif de l'amendement sur l'état sanitaire reste toujours observable 20 ans après l'installation des dispositifs, le suivi à long terme permettra vraisemblablement de constater des effets plus marqués.

Une légère amélioration de la composition des feuilles

L'analyse des feuilles et aiguilles, 3 ans après l'opération d'amendement, montre un effet très faible sur la composition des aiguilles de sapin, un début d'amélioration perceptible sur l'épicéa et une augmentation forte de la concentration de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans les feuilles de hêtre. C'est donc le hêtre qui réagit le plus rapidement à l'amendement. Les effets sur le résineux sont moins rapides, mais d'autres études montrent que l'effet devient positif sur un pas de temps de 5 années (Renaud *et al.*, 2001).

Une diminution de l'acidité des sols amendés

Au niveau de l'humus, l'amendement conduit à une réduction nette des couches OF/OH et à l'apparition de vers de terre, témoignant de l'amélioration du recyclage de la matière organique. Cependant les stocks de nutriments dans les humus sont peu modifiés après 3 ans, le pH s'améliore dans les humus et dans l'horizon de surface (10-20 premiers centimètres), les plus acidifiés, mais pas encore en profondeur. Ce n'est probablement qu'une question de temps car à

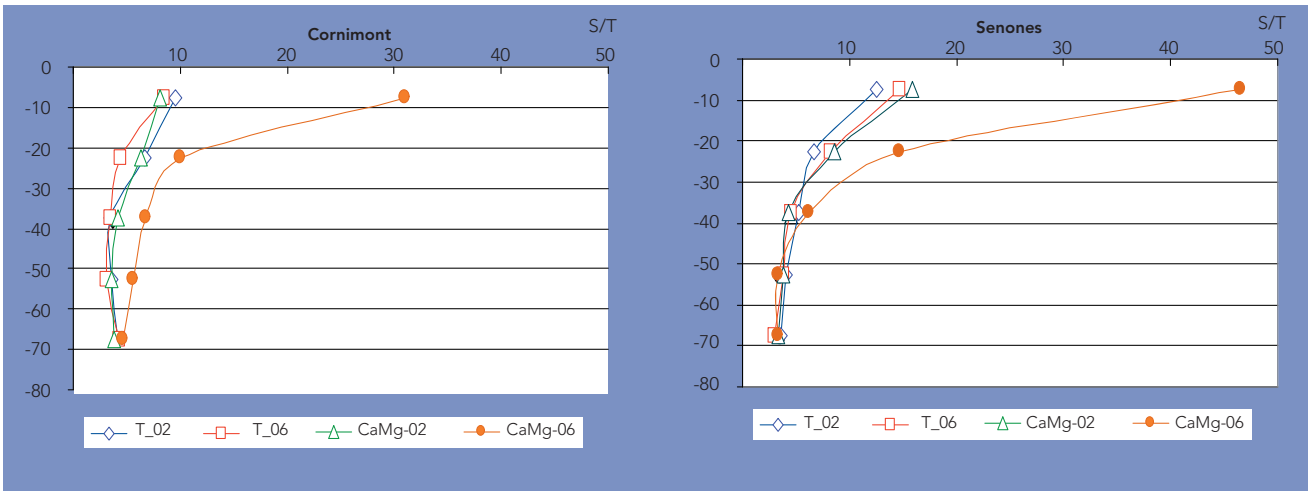


Fig. 4 : évolution du S/T (taille du « garde-manger ») entre 2002 et 2006 entre bassins versants témoin (T) et amendé (CaMg) à Cornimont (à gauche) et Senones (à droite)

plus long terme (15 ans) les plus anciens sites amendés dans les Vosges montrent une diminution forte de l'acidité et une augmentation de la réserve en nutriments (Renaud *et al.*, 2001).

Le rapport S/T qui est un indice de fertilité minérale (taux de remplissage du « garde-manger ») a triplé depuis l'amendement, à Cornimont comme à Senones (figure 4).

Une augmentation de la richesse spécifique, sans disparition d'espèces acidiphiles

L'amendement se traduit par une modification de la composition herbacée, avec apparition d'espèces indicatrices de milieu plus fertile sans disparition des espèces acidiphiles présentes initialement. Il y a donc augmentation de la biodiversité.

Le suivi de cette dynamique est indispensable, la question de l'impact sur la végétation étant primordiale dans le massif vosgien où les surfaces à enjeu environnemental marqué (ZPS « Massif Vosgien » notamment) sont conséquentes.

Effets de l'amendement sur l'habitat du tétras

Pas d'influence négative de l'amendement, mais un fort impact des cervidés

L'amendement modifie-t-il l'habitat du grand tétras et notamment entraîne-t-il une régression des espèces hyperacidiphiles, myrtille et callune, éléments de base de l'alimentation de l'animal ? Pour répondre à cette question, un dispositif complémentaire a été installé (cf. encadré) afin de tester les effets amendement d'une part, et abroutissement d'autre part, sur la composition floristique, le recouvrement, la fréquence, la hauteur, la biomasse et la composition minérale de la myrtille. Une description complète du dispositif figure dans le compte rendu final (Nys *et al.*, 2007).

Les premiers résultats révèlent une absence d'effet du calcium apporté sur la composition chimique de la myrtille et de la callune et une amélioration de leur taux de recouvrement et de leur biomasse. Des essais conduits antérieurement dans les Ardennes (Renaud *et al.*, 2001) montraient déjà que l'amendement augmentait la diversité végétale, notamment en espèces neutrophiles et nitrophiles, et cela sans réduction significative de la myrtille, que ce soit en recouvrement ou en fréquence, et sans modification de sa composition chimique.

À l'opposé, la pression des cervidés – et c'est un fait connu depuis longtemps dans le massif vosgien - est fortement préjudiciable à la biodiversité végétale en général et à la myrtille en particulier. L'état de déséquilibre grands ongulés – flore s'avère être le facteur principal de dégradation de l'habitat du grand tétras au niveau des strates herbacée et arbustive (figure page suivante).

Conclusions et perspectives

Si l'effet positif de l'amendement sur la restauration des sols et de l'écosystème « terrestre » est avéré, l'effet à long terme sur la qualité chimique des eaux devra être confirmé par la poursuite des études scientifiques. Notons aussi que tous les effets bénéfiques des amendements ne sont

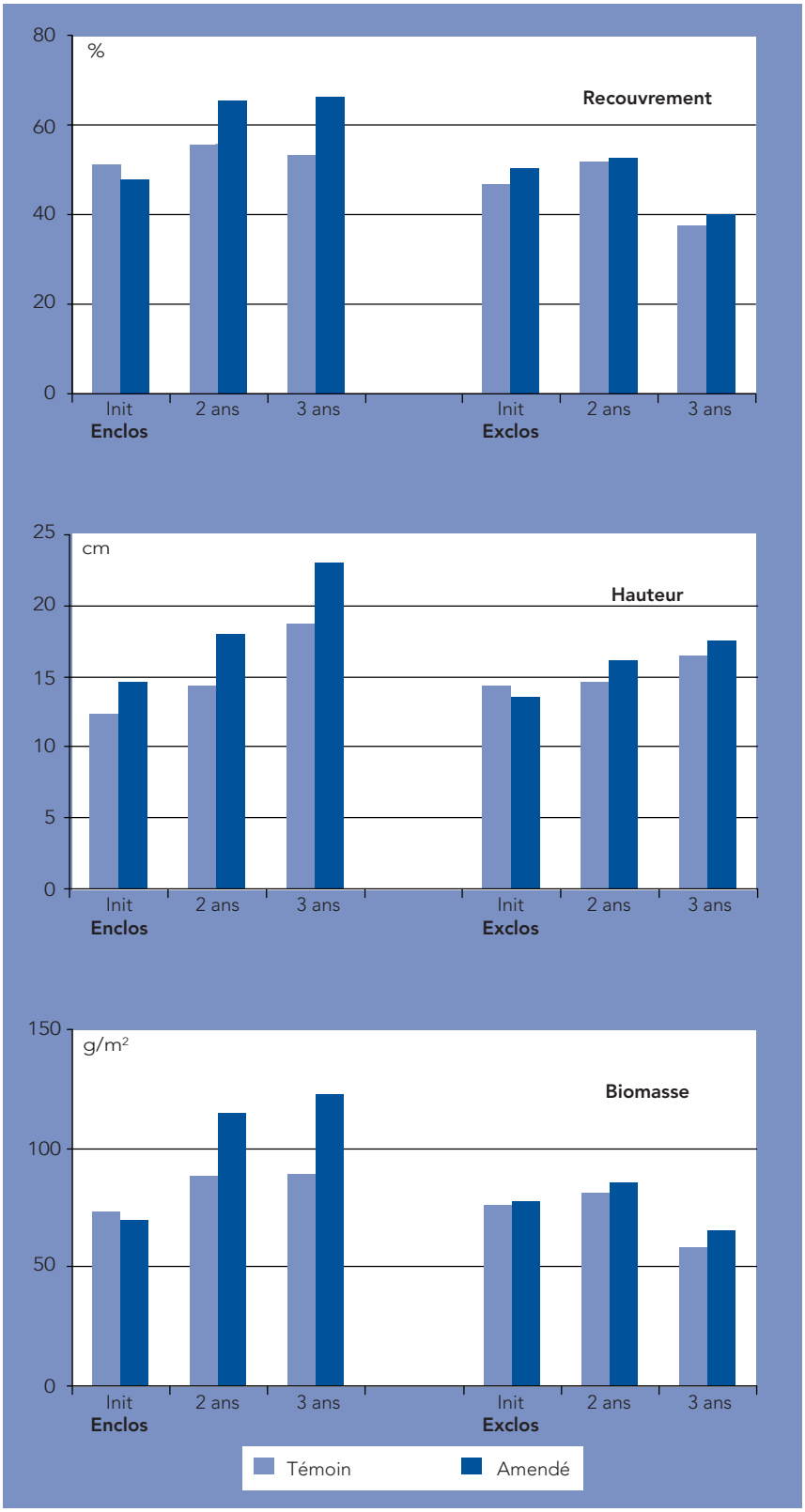


Fig. 5 : évolution de la myrtille à Cornimont en taux de recouvrement (en haut), hauteur moyenne (au milieu) et biomasse = poids total sec à 65 °C (en bas) ; comparaison témoin/amendé, enclos/exclos

pas immédiats : il faut du temps pour restaurer le fonctionnement d'un écosystème perturbé. Même si les dépôts atmosphériques ont beaucoup diminué depuis une dizaine d'années, les conséquences cumulées de plus d'un demi-siècle de fortes pollutions ne s'effacent pas d'un seul coup. Enfin, malgré les progrès enregistrés, certaines pollutions restent encore aujourd'hui bien réelles (dépôts azotés notamment).

Les dépérissements des années 80 dans le massif vosgien furent la résultante de deux effets, d'une part l'acidification d'origine anthropique et d'autre part la sécheresse de 1976 qui en fut le facteur déclenchant. Les peuplements forestiers, affaiblis par les carences chimiques, s'avèrent de fait plus sensibles à d'autres aléas. À l'époque 50 % de la sapinière vosgienne avait subi des dommages, dont 7,5 % des dommages importants (enquête ONF). Face à la recrudescence attendue des périodes de canicule, le risque est grand aujourd'hui de voir se renouveler à plus ou moins longue échéance les dépérissements de 1980 sur le massif vosgien.

Plus récente, la canicule de 2003 s'est révélée le facteur déclenchant de fortes défoliations, renouvelées depuis 2005, sur le hêtre près de Remiremont. Les analyses ont révélé un pH très faible et de fortes carences en calcium et magnésium dans le sol et dans les feuilles. Dans ce secteur les amendements, installés en 1991, ont mis en évidence des effets très nets 15 ans après, aussi bien sur le hêtre (photos) que sur le sapin ou l'épicéa. L'activité biologique est bien meilleure au niveau des sols, le taux de défoliation est quasiment nul et les analyses foliaires ne présentent plus de carence (hormis en potassium) dans les secteurs amendés.

C. Nys, INRA

C. Nys, INRA

C. Nys, INRA

Peuplements voisins de hêtre en FD d'Humont : amendé en 1991 (à gauche), non amendé… et aspect des feuilles correspondantes

Tout cela milite pour la réalisation d'amendements en vraie grandeur pour la restauration d'écosystèmes ainsi perturbés, en creusant cependant l'approche économique en termes d'investissement forestier mais aussi de financement du "service environnemental". Dans le cas des Vosges, l'INRA appuie l'ONF dans le diagnostic technique et estime que cette démarche d'amendement concerne au moins 600 ha de forêts domaniales : s'il n'est pas assuré que les arbres les plus dépérissants se rétabliraient, nous savons que les semis de hêtre trouveraient un milieu favorable à leur développement. Près de 2000 hectares de forêts communales relèveraient du même diagnostic dans cette zone.

Dans le massif vosgien proprement dit les sols sont certes naturellement acides mais certains sont tellement acidifiés qu'il convient d'être prêt, lors - ou en prévision - de toute nouvelle occurrence de dépérissement, à intervenir en traitement curatif, ou mieux préventif. L'amélioration de la qualité des eaux y est, en outre, non seulement un enjeu écologique mais aussi un enjeu de santé humaine. Les enjeux environnementaux forts des hautes Vosges requièrent cependant des précautions et beaucoup de communication. L'étude sur l'habitat du grand tétras a vocation à répondre à des craintes justifiées. Une cartographie fine est tout aussi indispensable car il ne serait bien évidemment pas envisageable d'amender des écosystèmes naturellement très acides comme les tourbières.

Dominique MESSANT
Jérôme BOCK
ONF, DT Lorraine, direction Forêt

Étienne DAMBRINE
Claude NYS
INRA Champenoux

François GUÉROLD
Jean-Marc BAUDOIN
Université de Metz

Bibliographie

La présentation des résultats de l'étude a fait l'objet du colloque « Vers une restauration de la qualité des sols et des eaux acidifiés du massif vosgien. Journée d'information et d'échanges du 20/09/2007 » organisé par l'ONF à Cornimont. La plaquette (4 p.) et les présentations scientifiques de ce colloque sont accessibles aux personnels de l'ONF dans Intraforêt (espace de la DT Lorraine ; accès direct par le n° 12a3b), ainsi que les derniers rapports scientifiques de l'étude (n° 14df6).

Ont concouru à la bonne marche de ce projet :

- Étude sur la qualité biologique des eaux : F. Guérold et J.-M. Baudoin (Université de Metz)
- Étude sur la qualité chimique des eaux : J.-P. Boudot, N. Angéli (CNRS LIMOS), E. Dambrine (INRA)
- Analyse des sols préalable à l'amendement : J.-P. Party (Sol Conseil)
- Étude des sols et de la végétation et de l'habitat tétras : C. Nys et J.-F. Picard (INRA)
- Étude des peuplements forestiers : J. Bock (ONF)

L'étude a été initiée et coordonnée par C. Richter puis par D. Messant (ONF). De nombreuses prises de données de terrain ont été effectuées par les personnels de l'ONF : B. Rochet, P. George, S. Leblond, G. Gehin, Y. Abel, D. Tourette, J.-M. Letz, C. Robert, R. Bindner, P. Mesnier, T. Barateau.

Le conseil général des Vosges, l'agence de l'eau Rhin-Meuse, la direction de l'Espace rural et de la Forêt (ministère de l'Agriculture), la DRAF/SERFOB, la DIREN et le conseil régional de Lorraine ont participé au financement de cette étude. La commune de Cornimont a accompagné l'étude et a accueilli un colloque en septembre 2007.

Le logiciel REGESOL, développé par l'INRA et utilisé dans le cadre de l'étude, permet de définir les préconisations d'amendement adaptées à chaque forêt et à chaque type de sol. http://www.regesol.com/

Rapports scientifiques propres à l'étude :
PARTY J.-P., 2002. Expérimentation de chaulage dans des bassins versants vosgiens à Senones et Cornimont. Strasbourg : Sol Conseil. Rapport de description des sols à l'état initial.

NYS C. *et al.*, 2007. Restauration de la qualité des sols et des eaux de deux bassins versants situés dans les Vosges gréseuses et les Vosges cristallines. Bilan 3 années après l'amendement calco-magnésien. Sites ateliers « Bassins versants de Cornimont et Senones ». Nancy : INRA.

NYS C., PICARD J.-F., MESSANT D., RICHTER C., 2007. Etude de l'impact des amendements CaMg sur le Tétras et son habitat. Nancy : INRA.

BOUDOT J.-P., ANGÉLI N., rapports annuels : décembre 2003 à 2007. Suivi de la qualité chimique de ruisseaux vosgiens en réponse à une opération de remédiation de l'acidification par apport d'amendements calco-magnésiens. Nancy : CNRS – LIMOS.

GUÉROLD F., BAUDOIN J.-M., WAGNER P., ROUSSELLE P., rapports mars 2004, mars 2005 et janvier 2008. Suivi de la qualité biologique de ruisseaux vosgiens en réponse à une opération de remédiation à l'acidification par apports d'amendements calco-magnésiens. Université de Metz.

Thèses :
NEDELTCHEVA T., 2005. Analyse spatiale de la composition chimique des ruisseaux vosgiens. Nancy I - INRA.

ANGÉLI N., 2006. Qualité chimique des ruisseaux vosgiens : évolution spontanée actuelle et réponse à une opération de remédiation par amendement. Nancy I – INRA, Limos,.

BAUDOIN J.-M., 2007. Biodiversité et fonctionnement de cours d'eau forestiers de tête de bassin. Effet de l'acidification anthropique et d'une restauration. Université de Metz.

Autres publications citées :
RENAUD J.-P., NYS C., PICARD J.-F., RICHTER C. 2001. Restauration de sols forestiers acides par un amendement calco- magnésien — Cas du Massif Vosgien et de l'Ardenne. Nancy : rapport ONF - INRA

DUPOUEY J.-L., THIMONIER A., LEFÈVRE Y., LE TACON F., BONNEAU M., DAMBRINE E., POSZWA A., LANDMANN G., 1998.. Désaturation et enrichissement en azote des sols forestiers du Nord-Est de la France au cours des dernières décennies RFF vol. L n° 5, pp. 391-401

PROBST A., PARTY J.-P., FÉVRIER C., DAMBRINE E., THOMAS A.-L., STUSSI J-M., 1999. Evidence of springwater acidification in the Vosges mountains (north-east of France) : influence of bedrock buffering capacity. Water, Air and Soil Pollution n° 114, pp. 395-411

TIXIER G., 2004. L'acidification anthropique des eaux de surface : effets sur les communautés de macro-invertébrés benthiques. Autoécologie et réponse d'espèces caractéristiques des ruisseaux de tête de bassin des Vosges. L.B.F.E., Université de Metz.

Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique

À la demande du ministère de l'Agriculture et de la Pêche (dgpaat/sous-direction de la forêt et du bois), la Commission nationale des Ressources Génétiques Forestières a rédigé à l'intention des propriétaires et gestionnaires forestiers une note sur le changement climatique, la diversité génétique et l'adaptation des forêts, que nous reproduisons ici intégralement. Les recommandations formulées s'inscrivent dans le cadre des préconisations du plan d'actions « Changement climatique » de l'ONF.

De façon générale, la notion de « ressources génétiques » recouvre une part de la biodiversité directement utile pour l'Homme. En forêt, la diversité génétique des arbres est aussi un facteur qui favorise la biodiversité globale de l'écosystème, facteur déterminant de son fonctionnement. Cette diversité, qu'il n'est pas toujours facile d'observer au sein des espèces, est en perpétuelle évolution, elle n'est pas figée. Suivant les lois de la génétique, elle est façonnée par la dynamique des peuplements, par les flux de graines ou de pollen entre peuplements et par la sélection, qu'elle soit naturelle ou d'origine anthropique. Dans le contexte du changement climatique, préserver durablement ce patrimoine sur le long terme est un enjeu global essentiel, étroitement lié à la gestion locale des forêts.

Nous abordons ici la gestion de la diversité génétique au sein de chacune des espèces, sachant que les stratégies de mélanges d'espèces sont bien sûr aussi pleinement justifiées pour une gestion durable dans le contexte du changement climatique.

Nous proposons quelques grandes recommandations générales, sans traiter systématiquement de chaque mode de sylviculture individuellement. Dans beaucoup de cas, plusieurs options sont possibles, il n'y a pas de réponse unique.

Parallèlement à ces recommandations générales de gestion forestière courante, des actions spécifiques de conservation et de transfert expérimental de ressources génétiques seront conduites par la recherche, notamment à l'initiative de la CRGF.

1 - Contexte climatique, un changement continu avec de fortes variations annuelles et régionales

Les experts du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) s'accordent sur un change-

ment significatif du climat à l'échelle du siècle, avec une forte élévation de la température moyenne, des changements de précipitations et une plus grande fréquence d'événements extrêmes (canicules, sécheresses, inondations, tempêtes…). Ces changements, certains, seront variables d'une région à l'autre. Il reste de grandes incertitudes sur l'amplitude des variations annuelles (ex. : l'augmentation de la température moyenne s'accompagnera-t-elle d'une élimination complète du risque de gel ?) mais aussi sur les modifications écologiques globales qui seront induites par le changement climatique (cortèges de parasites, mycorhizes, pollinisateurs, disperseurs de graines, essences invasives nouvelles…).

Le changement climatique est un processus qui s'inscrit dans la durée. À l'échelle du siècle, les forêts devront faire face à une succession de contextes environnementaux difficilement prévisibles et sans doute inédits, tant dans leur dimension physique (température, sécheresse…) que biologique. C'est à cette même échelle de temps que les décisions prises aujourd'hui produiront leurs effets.

2 - Contexte génétique : un potentiel d'adaptation à valoriser

Le maintien en bonne santé des écosystèmes forestiers actuels dans le contexte du changement climatique dépendra, d'une part, de la capacité de survie et de reproduction des arbres en place et, d'autre part, des évolutions adaptatives lors des prochaines phases de régénération. Le potentiel adaptatif d'un peuplement est la capacité d'évolution de ses caractéristiques génétiques d'une génération à l'autre. L'évolution des caractéristiques génétiques peut être naturelle ou organisée par l'homme (ou les deux).

Notions de qualité pour les ressources génétiques

la « meilleure qualité » = critère subjectif basé sur de multiples paramètres (économiques, écologiques,…) par rapport à un objectif assigné à la forêt à un moment donné

l'adaptation = qualité de survie, croissance et reproduction de la population dans des conditions environnementales données et constantes

l'adaptabilité = capacité d'évolution de la population dans un environnement changeant, incluant la plasticité des arbres en place et les évolutions génétiques entre générations

La région de provenance locale offre des garanties d'adaptation. Son adaptabilité n'est pas nécessairement suffisante, cela dépend de sa diversité génétique et de l'intensité des changements environnementaux

Il est généralement difficile de prédire la capacité de réponse des arbres en place aux changements qu'ils vont subir dans les années à venir (sans parler des incertitudes sur les scénarios climatiques et écologiques futurs). En revanche, on sait que les arbres forestiers, en général, se caractérisent par une grande diversité génétique au sein de chaque peuplement : cette diversité est le « carburant » indispensable pour que puisse fonctionner la sélection naturelle, mécanisme conduisant à l'adaptation. Le niveau de diversité intra-peuplement est variable d'une espèce à l'autre (plus faible pour les espèces dont l'aire est fragmentée), il peut aussi varier pour une même espèce du centre aux marges de son aire de distribution. Toutefois, les exemples historiques de transfert de matériel forestier ont montré que cette diversité génétique était souvent suffisante pour permettre des évolutions adaptatives fortes en une ou deux générations seulement.

Ayant la certitude que des changements écologiques majeurs vont

survenir, compte tenu de nos incertitudes sur les caractéristiques exactes de l'environnement futur, il nous faut tirer le meilleur parti de ce potentiel adaptatif. Pour cela, il faut avoir un double objectif :

- **choisir une sylviculture qui maintienne la diversité génétique sur le long terme** ;
- **favoriser les processus évolutifs**, pour permettre aux peuplements de coller au mieux à leur environnement dans cette « course au changement ».

3 - Recommandations : apporter des réponses graduées en fonction du degré de dépérissement à l'échelle du massif ou de la région

Dans l'immédiat, il convient d'apporter des réponses graduées aux problèmes posés en se gardant de toute anticipation hasardeuse. Tout en étant actifs et vigilants, deux écueils doivent être évités :

- si la substitution de provenances ou d'espèces doit être envisagée dans certains cas, un mouvement trop hâtif de substitution complète, éliminant de façon abusive des génotypes survivant à des conditions nouvelles, irait à l'encontre de l'objectif de faire évoluer nos ressources génétiques pour les préserver sur le long terme.
- le recours immodéré à tel ou tel matériel forestier de reproduction (MFR) supposé providentiel pourrait aller à l'encontre de l'objectif de maintien de la diversité.

La sylviculture peut influencer la diversité génétique et les processus évolutifs dans le contexte de changement climatique. Il s'agit par exemple de la sélection naturelle entre le stade semis ou jeune plant et le futur peuplement adulte. Le choix de la régénération naturelle permet d'exploiter au mieux la diversité génétique disponible dans le peuplement. Le recours à la plantation est intéressant quand celle-ci est réalisée à partir de MFR d'origines recommandées et de variétés sélectionnées pour leur adaptation ou leur plasticité. Dans ce cas, une plus forte densité initiale de l'espèce considérée augmentera le potentiel d'évolution par sélection naturelle.

On distingue différentes situations suivant l'impact constaté du changement climatique. **Le diagnostic de dépérissement imputé au changement climatique doit être vérifié et affiné, notamment en regard de la gestion passée :**

a) **en l'absence de dépérissements notables** dans les peuplements locaux, il faut favoriser la sélection naturelle par une forte diversité génétique dans les plus jeunes stades du peuplement :

- en régénération naturelle ou artificielle, s'assurer d'une régénération en densité suffisante relativement à l'effectif de population final ciblé dans le peuplement (distinction entre les espèces sociales et

Renouvellement par	Régénération naturelle	Plantation de matériel issu de la région de provenance locale	Plantation de matériel introduit (dans une zone où l'espèce existe déjà)
Avantages	- bonne adaptation - bon échantillonnage de la diversité génétique disponible localement - laisse jouer la sélection naturelle - bonne intégration dans l'écosystème, ce qui renforce sa capacité générale de résistance (co-adaptation)	- bonne adaptation - matériel généralement issu de peuplements choisis pour leur qualité - assez bonne intégration dans l'écosystème, ce qui assure une bonne capacité générale de résistance	- pallie un défaut de diversité génétique locale - apporte de nouvelles adaptations
Inconvénients	- risque d'un nombre limité de semenciers efficaces - risque d'un nombre de semis faible - risque d'une diversité génétique locale trop limitée et finalement incapable de s'adapter à l'ampleur des changements	- risque de mauvais échantillonnage de la diversité génétique lors des récoltes - moins de place laissée à la sélection naturelle - risque d'une diversité génétique régionale trop limitée et finalement incapable de s'adapter à l'ampleur des changements	- risque de maladaptation - risque de baisse de la diversité génétique globale si l'on introduit massivement du matériel à base génétique étroite - risque « d'étouffement génétique » d'une ressource locale menacée - risque de perturbation supplémentaire d'un écosystème déjà affaibli
Recommandations de gestion	- maximiser le nombre de reproducteurs efficaces - obtenir une densité de semis suffisante, sinon envisager des compléments	- mélanger des peuplements classés au sein de la région de provenance quand cela est techniquement possible - augmenter la densité initiale de plantation	- introduire du matériel originaire d'une région de provenance voisine, a priori de climat plus sec - introduire du matériel à base génétique large

disséminées) ;
■ en régénération naturelle, maximiser la diversité génétique dans les semis en augmentant la contribution effective d'un maximum d'adultes reproducteurs (y compris par la durée de la phase de régénération).

b) **si les taches de dépérissement** réduisent significativement le nombre de reproducteurs potentiels dans le peuplement mais qu'il reste au moins la moitié des individus sains, on recommande des compléments de régénération ou une plantation en plein à l'aide de MFR représentant bien la diversité des peuplements classés de la région de provenance locale. Pour accroître l'adaptabilité, on peut prévoir un « enrichissement génétique » par l'utilisation de MFR représentatifs des régions de provenances mitoyennes (a priori de climat plus chaud et sec).

c) **si le dépérissement est global,** qu'il touche toutes les classes d'âge et que la disparition de l'espèce considérée semble inévitable à l'échelle du massif, alors il n'y a pas d'autre choix que le transfert de provenances de la même espèce supposées mieux adaptées aux conditions futures, s'il en existe, ou la substitution d'essence objectif. L'accent devra alors être mis sur la diversité génétique du matériel introduit et sur la traçabilité du matériel utilisé en plantation, y compris en regarnis et enrichissements (conserver tous les documents relatifs à ce matériel). Parallèlement, il faudra porter une attention particulière aux éventuels arbres survivants susceptibles d'être porteurs d'adaptations génétiques particulières intéressantes, une stratégie de conservation adaptée devant alors être envisagée.

Pour les plantations (enrichissement génétique, transfert, substitution), on devra obtenir de la filière Graines et Plants des garanties de qualité génétique élevée des MFR (large

base génétique, adaptation, plasticité). Les actuels conseils d'utilisation des MFR, fondés sur les concepts d'adaptation et de performance locales, devront évoluer. Les contours des régions de provenance et d'utilisation des MFR devront peu à peu intégrer les nouveaux zonages climatiques. Ceci ne remet pas en question l'intérêt de la réglementation du commerce des MFR, qui garantit la qualité de l'information des utilisateurs. Celle-ci constitue en outre le seul outil permettant de garantir la diversité des RGF effectivement utilisées. L'utilisation de variétés forestières à base génétique étroite doit être raisonnée et contrôlée afin d'éviter une trop forte homogénéité génétique et de maintenir une réelle diversité génétique à l'échelle de chaque région. En outre, la réglementation des MFR permet de renforcer la traçabilité détaillée et pérenne de tous les mouvements de ressources génétiques, ce qui est primordial dans le contexte d'instabilité climatique dans lequel nous entrons.

Commission Ressources Génétiques Forestières (*)
Juin 2008

(*) Cette commission, constituée de scientifiques, de gestionnaires forestiers publics, privés et d'un représentant du réseau « forêt » de France Nature Environnement, propose au MAP et met en place une stratégie d'évaluation et de conservation de la diversité génétique des espèces d'arbres forestiers en France.
Président : François Lefèvre
(Courriel : francois.lefevre@avignon.inra.fr),
secrétaire : Éric Collin
(Courriel : eric.collin@cemagref.fr)

En résumé

■ si la rotation prévue est de moins de 20 ans (peuplier, taillis et futaies à courte rotation), choisir les MFR les mieux adaptés en évitant une trop forte uniformité à l'échelle régionale.
■ si la rotation prévue dépasse 20 ans, il faut prendre en compte adaptation et adaptabilité. Plus l'âge d'exploitabilité est élevé, plus les changements subis entre le stade juvénile et l'exploitation seront importants, plus l'assurance de diversité génétique devient importante.
■ pour les peuplements en place, l'adaptation de la sylviculture devra aussi prendre en compte la préparation de la phase de régénération pour assurer sa quantité et sa diversité génétique.
■ dans la phase de renouvellement, par régénération naturelle ou plantation, veiller à assurer une diversité génétique suffisante pour laisser prise à une sélection naturelle ultérieure.

Sites internet à consulter

http://agriculture.gouv.fr/sections/thematiques/foret-bois/conservation-ressources
http://agriculture.gouv.fr/sections/thematiques/foret-bois/graines-et-plants-forestiers
http://www.brg.prd.fr/brg/pages/les_rg_en_france/rgv_arbresForestiers.php

La « décolonisation » en forêt domaniale des Pays de Monts

À partir de 1936, l'essor des campings et colonies suscite, dans les forêts du littoral, de nombreuses concessions : leurs installations se développent jusqu'à la fin des années 80 puis c'est le déclin. Nombreux sont aujourd'hui les cas de non renouvellement à l'échéance ; comment s'applique la clause de remise en état des lieux ? Démonstration en forêt des Pays de Monts.

La forêt domaniale des Pays de Monts en Vendée est depuis 80 ans fortement mitée par divers équipements touristiques — 9 campings et 13 colonies — occupant environ 10 % de la surface de la forêt. Ces concessions n'ont pas vocation à perdurer et toute occasion de les voir disparaître doit être saisie.

Il a paru intéressant de présenter un dossier récent de retour à la forêt au travers de l'arasement du Centre de Vacances de la Ville d'Aulnay-sous-Bois. Après l'historique de l'installation touristique, les aspects juridiques et techniques seront examinés.

A. Auffret, ONF

La colonie d'Aulnay-sous-Bois, à l'échéance de la concession (2004)

L'historique

Sur le littoral vendéen, au nord de Saint-Gilles-Croix-de-Vie, la forêt domaniale des Pays de Monts est née suite à l'attribution à l'État de biens vacants et sans maître sur les matrices cadastrales de 1830 et à la création du Service des Dunes de l'Administration des Eaux et Forêts en 1862. La fixation des dunes est alors le premier objectif et va donner naissance à la forêt de pins maritimes.

La vocation du massif forestier va très vite évoluer. En effet, depuis la fin du 19e siècle, les stations balnéaires sont en plein essor à Saint-Gilles-sur-Vie, à Croix-de-Vie, à Sion-sur-l'Océan, à Saint-Jean-de-Monts, à Fromentine. L'arrivée du train en 1881 à Saint-Hilaire-de-Riez et à Croix-de-Vie est aussi une raison du développement touristique. Les estivants souhaitent bien sûr profiter des bienfaits des bains de mer et aussi du bon air marin et de l'ambiance forestière de la côte.

L'essor des campings et colonies à partir de 1936

La forêt domaniale va alors vivre au rythme des saisons touristiques… À Saint-Hilaire-de-Riez, dès 1932, les premiers campements de jeunes apprentis cheminots vont s'installer sous les grands pins. Les congés payés de 1936 vont favoriser l'arrivée de campeurs dans le massif. À l'époque, la volonté de l'État est aussi d'encourager les séjours à la mer tant des enfants en vacances que des salariés en congés. Les forêts domaniales peuvent offrir de vastes espaces et sont propices aux installations sommaires de ces années-là. Ainsi se multiplient les colonies de vacances et les campings.

En forêt, à Saint-Hilaire, on concède, en 1937, à la Compagnie des Chemins de Fer de l'État, 1 ha 82 pour la colonie des enfants de

cheminots. On installe alors des tentes, des petits abris en bois sous les pins. On se fournit en lait, eau, légumes à la ferme voisine. En fin de séjour, on range tout. En 1938, l'aménagement du camping de la Côte Vendéenne permet d'installer des campements très rudimentaires dans dix points du littoral. D'autres colonies sont créées… mais la guerre va arrêter cet élan touristique.

Dès juillet 1946, la reprise est amorcée. Dans les années 70 et 80, la forêt domaniale va compter jusqu'à 13 colonies dont 9 sur la commune de Saint-Hilaire-de-Riez : la route qui les dessert est appelée « route des colonies » par les gens du pays. La surface louée est importante, atteignant 240 ha soit 9 % de la forêt. L'occupation des terrains concédés, principalement en été, permet de maintenir une activité forestière quasi normale. Les forestiers considèrent la forêt alors comme non productrice et leurs soucis de gestion concernent surtout la dune littorale et le phénomène du dépérissement du pin maritime. Le contexte local est un développement du tourisme à vive allure et donc des stations balnéaires sans grand respect de l'environnement. Toutefois, pour l'ONF, la situation est sans grands soucis car, à ce moment-là, les sites sont bâtis et la primauté de la gestion forestière est réaffirmée dans les concessions et respectée par les concessionnaires.

Fin des années 80, le déclin

Mais, dès la fin des années 80, on constate un déclin rapide des colonies dû à diverses raisons :
- les normes techniques, les conditions d'organisation de plus en plus contraignantes,
- l'évolution du mode de vacances : la réduction du temps des séjours et la demande de lieux variables,
- l'organisation des classes de mer, nouvelle activité qui génère d'autres organisations et moyens,

J.P. Bouffet, ONF

La colonie d'Aulnay-sous-Bois, 5 mois après les travaux de remise en l'état « primitif »

- le coût de l'entretien et des améliorations,
- le prix de revient pour les familles et les collectivités.

Ainsi, l'on va voir se fermer les centres de vacances comme la colonie de Chaville en 1988, la colonie de la SNCF en 1989, la colonie de Villeneuve-Saint-Georges en 1994, la colonie de la Cité Joyeuse en 1999 et dernièrement la colonie d'Aulnay-sous-Bois en 2004. Dès lors, par l'arrêt de fonctionnement mais aussi par la réduction des surfaces (le loyer est calculé en fonction de la surface occupée), commence ce que l'on pourrait appeler la « décolonisation » de la forêt domaniale des Pays de Monts.

Aujourd'hui, on compte encore une surface de 117 ha de terrains concédés à l'usage de centres de vacances et de loisirs.

Le juridique

Les colonies ou centres de vacances sont concédés aux communes occupantes, essentiellement des villes de la banlieue parisienne, par bail administratif. Chaque concession comporte des clauses exorbitantes qui visent à protéger l'espace forestier. Ainsi, la primauté de la gestion forestière est systématiquement rappelée : « *la protection et la conservation de la forêt constituent des enjeux prioritaires qui prévalent sur tout autre intérêt particulier* ». Mais surtout la clause de remise en état des lieux est primordiale.

Une mise en œuvre récente de cette disposition mérite quelques commentaires : une commune a bénéficié d'un contrat d'occupation de terrain en forêt domaniale à compter du 1er juillet 1946. Elle y a édifié des bâtiments et ouvrages à usage de colonies de vacances. La convention a été successivement reconduite et pour la dernière fois en 1996. Enfin elle est arrivée à terme en 2004 sans renouvellement.

La question du devenir des ouvrages et bâtiments s'est donc posée sur les termes « *les lieux seront remis dans leur état primitif* ». La commune soutenait que cela concernait l'état des terrains en 1996 alors que l'ONF soutenait que l'adjectif « primitif » renvoyait à l'état des terrains avant l'installation de la colonie, donc en 1946.

L'affaire était sérieuse, le coût de remise en état portant sur plus de 160 000 euros. Intelligence et volontés réciproques d'aboutir rapidement à une libération des lieux sans s'enliser dans une procédure contentieuse conduisent l'ONF et la Municipalité, sous les conseils éclairés de leurs avocats à transiger à l'amiable. Même si l'ONF pouvait espérer un succès en justice, la durée du contentieux, avec appel très vraisemblable, aurait fait supporter à l'ONF, gardien de la forêt domaniale, un risque sérieux d'accident et de squattérisation des locaux délaissés des années durant.

C'était la première fois qu'une ville tentait de contester la clause d'arasement : 3 autres colonies avaient été arasées entre 1988 et 2003. Aujourd'hui, même s'il n'y a pas eu de décision contentieuse, la clause d'arasement a montré son utilité et doit être systématisée dans toutes les occupations en forêt domaniale comportant du bâti sans rapport avec la forêt.

Ce type de clause peut être transposé au cas par cas aux autres occupations de la forêt par des installations diverses. Elle se complète sur les installations de camping par la systématisation de la charte ONF « Camping » qui incite plus que fortement les gestionnaires de sites à étudier des équipements réversibles, certes sur le long terme mais aussi à court terme (des chalets toilés sur planchers en bois peuvent ainsi être démontés et stockés en période hivernale laissant ainsi respirer l'espace dunaire et forestier).

La technique

La « décolonisation » de la forêt va poser aux locataires et à l'ONF le problème de la remise

J.P. Bouffet, ONF

Désamiantage : conditionnement des déchets

J.P. Bouffet, ONF

Arasement d'un bâtiment

J.P. Bouffet, ONF

Le criblage du sol

J.P. Bouffet, ONF

Les déchets de criblage

Étapes du chantier de remise en état des lieux

en l'état primitif, autrement dit la démolition du bâti et l'évacuation des déchets pour revenir à la forêt ou tout au moins à un espace plus ou moins boisé ouvert au public, comme les autres parties de la forêt.

La démolition au cours de ces années a pris des aspects bien différents :
- à *Chaville*, les bâtiments en bois ont été vendus à une autre collectivité, mais une partie des maçonneries a été enterrée,
- à *la SNCF*, il y avait peu de bâtiments ; ils ont été arasés et enfouis sur place,
- à *Villeneuve-Saint-Georges*, la commune a financé les travaux pour araser, désamianter, évacuer les déchets en trois chantiers étalés sur 4 ans.

J.P. Bouffet, ONF

Installation… de la linaire des sables

La colonie d'Aulnay-sous-Bois a bénéficié de notre expérience et aussi de la volonté des deux parties, après négociation, de réaliser vite et bien ce chantier. En fait, le paiement des travaux par la commune nous a permis de mettre en œuvre un marché.

La certification ISO 14001 et les règles de démolition et de recyclage des déchets nous ont permis de travailler dans un respect maximal du sol sableux et des arbres existants. En commençant par vider les locaux, par désamianter les toits, puis en continuant par araser les bâtiments, en triant les matériaux, les déchets, en concassant les bétons et les fondations, l'espace s'est vidé progressivement.

Ainsi les installations, dortoirs, infirmerie, laverie, cuisine, maison, salle de jeux, restaurant, annexes diverses, station d'épuration, citernes, transformateurs, lignes électriques et téléphoniques ont disparu. Il ne reste dans le sol de cet espace que quelques tuyaux ou câbles. Le sable a été criblé sur environ un mètre de profondeur et remis en place en laissant un modelé irrégulier de dunes, une petite mare a même été creusée pour les animaux de la forêt. La dernière opération a consisté à défaire la petite route d'accès et poser une barrière en bois. Ce chantier a duré un peu plus d'une année. Au 1er février 2008, nous avons pu enlever les panneaux d'interdiction d'accès au public.

Et après ? Comment revient-on à un espace boisé ?

À *Chaville*, une plantation de pins laricio a été faite et elle est bienvenante. À *la SNCF*, des plantations de pins laricio et autres pins ont été réalisées et des semis naturels de pins maritimes assurent un avenir bien forestier. Également, une coupe de régénération définitive de pins maritimes vient d'être pratiquée cet hiver. À *Villeneuve-Saint-Georges*, la régénération naturelle est toujours attendue malgré les semenciers des alentours tant pins maritimes que chênes verts. À *Aulnay-sous-Bois*, il y a quelques petits semis de pins maritimes et chênes verts très épars mais déjà dans les ornières d'un engin, une plante protégée, la linaire des sables, s'est installée. N'est-ce pas le petit plus qui fait plaisir ?

Jean-Paul BOUFFET
Agent patrimonial
ONF, UT Vendée

Alain AUFFRET
Responsable territorial
gestion foncière
ONF, DT Centre-Ouest

Dossier

La forêt et l'eau

Forêt et eau, le thème n'est pas nouveau, mais plus que jamais d'actualité : les enjeux s'intensifient, les politiques internationales et nationale se précisent, les connaissances et savoir-faire progressent. Ce dossier aborde les impacts de la forêt sur la ressource eau en termes quantitatifs, qualitatifs et de service économique ; il met l'accent sur ce qui fait encore débat, les questions à creuser, sans négliger les aspects immédiats : divers exemples de gestion de la forêt pour l'eau.

- p. 22 Gestion de l'eau : quels enjeux pour la forêt et les forestiers ?
  par Vincent Pereira et Olivier Ferry
  - p.25 Quelles questions se pose-t-on encore au sujet du lien entre couvert forestier et hydrologie ?
    par Vazken Andréassian
- p. 30 Quel peuplement pour quelle protection des eaux souterraines ? Entre idées reçues et faits démontrés
  par Robert Jenni
  - p. 34 Les méthodes d'évaluation économique des services rendus par la forêt pour la production d'eau potable
    par Julien Fiquepron
- p. 39 Deux exemples de gestion forestière pour l'eau potable : Rennes (35) et Masevaux (68)
  par Daniel Helle, Jean de Marin de Carranrais, Vincent Pereira et Julien Fiquepron
  - p. 44 Le boisement, un bienfait pour l'eau en Bretagne
    par François Aureau
- p. 47 Gestion forestière et eau potable – Quelques exemples à travers le monde
  par Catherine Deck
  - p. 51 Alsace : inventaire de l'eau sous tous ses aspects en milieu forestier
    par Julien Prinet
- p. 56 Le reméandrement des ruisseaux forestiers : un outil pour atténuer les excès du drainage en forêt de Chaux
  par Éric Lucot, François Degiorgi, Pierre-Marie Adot, Vincent Pereira, Vincent Augé et Pierre Durlet

Gestion de l'eau : quels enjeux pour la forêt et les forestiers ?

Voici, pour ouvrir notre dossier, un rapide tableau de l'évolution récente des politiques publiques sur la prise en compte des forêts comme outil de gestion des eaux. Ce contexte ouvre des opportunités, pour autant que les forestiers proposent des démarches pertinentes aux acteurs de l'eau. Car l'inverse ne va pas encore de soi.

La forêt, outil de gestion de l'eau

L'intérêt des acteurs de l'eau pour les espaces forestiers dans la protection ou la reconquête des eaux (rivières, nappes) dégradées par les pollutions diffuses ainsi que pour l'atténuation des catastrophes naturelles locales liées à l'eau, est relativement récent. Si l'on excepte le rôle tampon des ripisylves, ayant fait l'objet de nombreuses études et publications (Fustec *et al.*, 1996 ; Décamps *et al.*, 2002 ; Piegay *et al.*, 2003 ; Wasson, 2008), l'influence de la forêt sur les ressources en eau est encore quantitativement mal connue (ONF, 1999 ; Lavabre *et al.*, 2000, Bardy *et al.*, 2004).

Néanmoins, les acteurs de l'eau préconisent de plus en plus souvent des règles empiriques, fondées sur le bon sens et le retour d'expérience, pour maintenir ou renforcer la fonction protectrice des formations boisées. Ainsi, l'implantation de nouveaux captages d'alimentation en eau potable privilégiera la forêt pour être naturellement protégés par la mise en œuvre d'une gestion durable de cet espace. De même, le chevelu de cours d'eau forestiers se verra reconnaître un rôle de « poumon » des grands cours d'eau, zone refuge pour certaines espèces sensibles aujourd'hui menacées (écrevisse à pieds blancs, lamproie de Planer, chabot…).

La forêt semble donc recouvrer progressivement un statut d'« outil de gestion des eaux », qu'elle avait eu dans un passé largement ignoré par la moderne politique de l'eau. Cette reconnaissance porte des valeurs très forte, dans la société actuelle, de préservation d'un sanctuaire de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques.

Pour répondre à de telles attentes, le forestier doit être capable à la fois de porter cette dimension presque symbolique de la « forêt protectrice » tout en apportant la preuve que son action de tous les jours contribue effectivement à la protection de notre patrimoine commun : l'eau.

Un paradoxe en voie de résorption ?

Alors que la forêt apparaît comme un outil efficace pour protéger la ressource en eau, sa prise en compte par les acteurs des politiques publiques liées à la gestion de l'eau reste insuffisante (Ferry, 2006). Ces dernières étant basées sur le principe de « pollueur-payeur », la forêt, considérée comme un écrin de protection naturel est un « non sujet ». Les services rendus par la forêt seraient donc considérés comme acquis, ne justifiant pas la mobilisation de moyens au titre de la politique de l'eau.

Toutefois, la généralisation d'une approche territoriale conduite à l'échelle de bassins hydrographiques, a permis de sensibiliser les acteurs locaux aux enjeux d'une gestion intégrée, mettant en évidence le rôle protecteur des forêts (Ferry, 2004). La gestion de l'eau et la gestion du territoire sont de plus en plus liées pour maîtriser l'impact des activités humaines. Ceci conduit inéluctablement les acteurs de l'eau à rencontrer les forestiers car, en tant que gestionnaires d'espaces, ces derniers apparaissent de plus en plus aux yeux de tous comme ayant une part de coresponsabilité dans la gestion de l'eau et des milieux aquatiques.

La rencontre inéluctable de ces deux groupes d'acteurs est entamée et se poursuivra progressivement, sous réserve d'améliorer la complémentarité des outils institutionnels et budgétaires qui soutiennent leur action de gestion (SDAGE/DRA-SRA, SAGE-Contrats de rivières/Chartes forestières de territoires).

La directive cadre sur l'eau, une opportunité à saisir

La directive communautaire 2000/60, dite « directive cadre sur l'eau (DCE) », engage les états membres dans un objectif de reconquête d'un « bon état écologique de l'eau et des milieux aquatiques ». Cet objectif est à atteindre avant 2015, sauf justification technique ou économique particulière.

Cette récente évolution de la politique européenne sur l'eau, renforçant la politique française de l'eau à l'échelle de bassin versant et interpellant la politique forestière dans le sens d'une prise en compte accrue de l'environnement, risque de stimuler l'évolution des outils territoriaux ainsi que la synergie entre les acteurs de l'eau et de la forêt. En faisant de la gestion par bassin versant l'un de ses principes d'action, la DCE place en effet la gestion de l'espace au cœur de la politique de l'eau.

La place de la forêt et des forestiers dans cette approche spatiale de la protection de l'eau reste toutefois encore à préciser : comment et à quel niveau la forêt peut-elle contribuer à l'atteinte du bon état écologique de l'eau et des milieux aquatiques ? Quels sont les cadres d'action et les intérêts communs pouvant conduire les acteurs de l'eau et de la forêt à travailler ensemble ?

La 5e conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe (5-7 novembre 2007, Varsovie) constitue une étape décisive dans la reconnaissance du rôle de la forêt. Par le biais de la résolution 2 « forêts et eau » (MCPFE, 2007), les états signataires et la Commission européenne s'engagent à :

- gérer durablement les forêts par rapport à l'eau ;
- conduire des politiques coordonnées sur l'eau et les forêts ;
- mieux comprendre et anticiper les effets du changement climatique ;
- évaluer économiquement les services des forêts liés à l 'eau.

Ce dernier point constitue une perspective nouvelle et intéressante, facilitant le développement et la mise en œuvre de mesures tels que les paiements pour les services environnementaux (PSE), afin d'élargir et de diversifier la base financière pour la gestion durable des forêts et afin de maintenir les factions protectrices des forêts.

Une dynamique de projets à poursuivre...

L'évaluation des services rendus par les forêts relatifs à la qualité et à la quantité des ressources en eau et à la réduction des crues, dont la société bénéficie, est un axe de travail à privilégier.

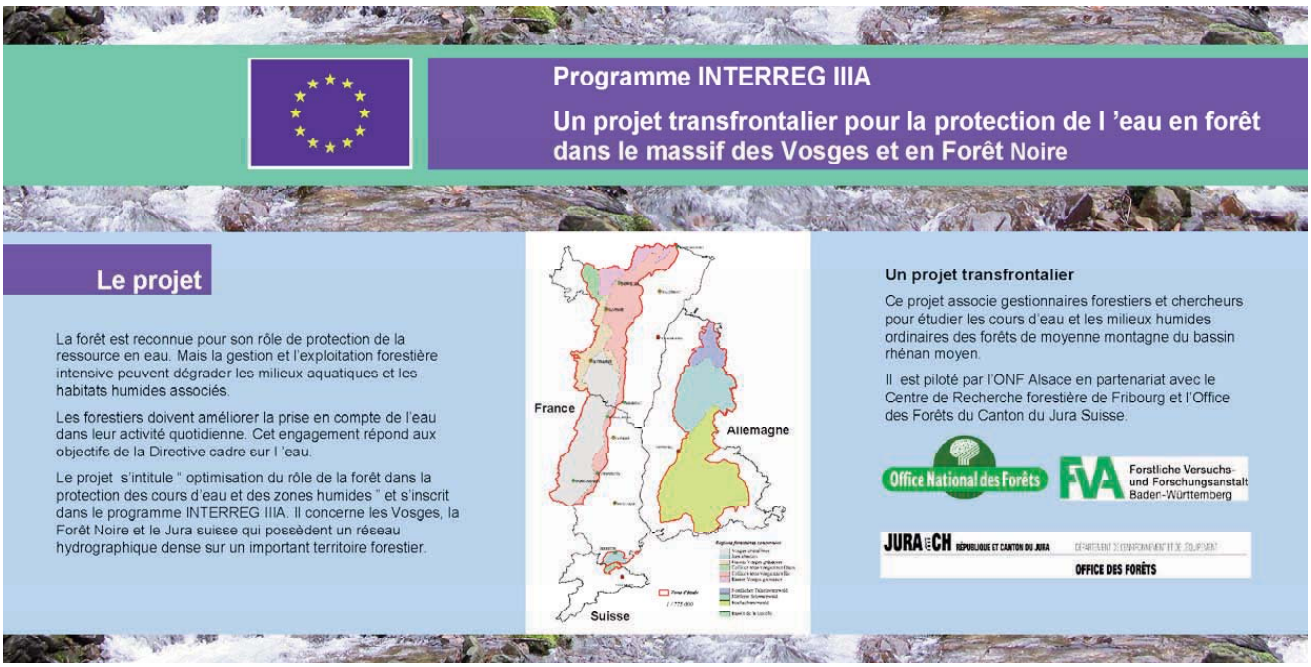
Plusieurs projets pilotes, de niveau européen, ont permis d'apporter des éléments de réponse mais aussi de rapprocher les acteurs de l'eau et de la forêt sur des enjeux concrets :

- la protection des milieux aquatiques et des zones humides (Life « Ruisseaux de têtes de bassins et faune patrimoniale associée », Interreg « Optimisation du rôle de la forêt dans la protection des petits cours d'eau et des zones humides », Life « Rhin vivant ») ;
- la gestion des risques naturels (Life « Forests for water ») ;
- la protection de la ressource en eau : projets en cours (Interreg « Alpeau », Life « Semeau »).

Cette dynamique de projets mobilisant les acteurs de l'eau et de la forêt doit être maintenue pour donner à la forêt la place qu'elle mérite. Notre responsabilité est donc de continuer à proposer des projets de partenariat aux acteurs de l'eau, de façon à illustrer tous les enjeux de contribution de la forêt à l'atteinte des objectifs de la DCE. Le passage à une collaboration systématique ne doit pas être considéré comme « allant de soi » et l'effort doit venir des forestiers. Ceux-ci ne doivent pas oublier, quelle que soit leur conviction sur le rôle positif de la forêt, que celle-ci est rarement une priorité spontanée pour les acteurs de l'eau. ces derniers sont focalisés sur « les problèmes à résoudre » plus que sur ce couvert protecteur à maintenir en bon état de fonctionnement.

...sans négliger les efforts au quotidien

Enfin, précisons que ces projets ne doivent pas masquer les efforts réalisés au quotidien par les gestionnaires forestiers, au titre des engagements PEFC ou ISO 14001. L'amélioration continue des pratiques pour protéger au mieux l'eau et les milieux aquatiques est désormais une



réalité et constitue une évolution significative des pratiques forestières.

Vincent PEREIRA
ONF, DT Franche-Comté
direction Développement
et animateur réseau « Eau » de l'ONF

Olivier FERRY
Responsable filière projets
ONF, DT Rhône-Alpes
direction Développement

Bibliographie

BARDY M., COLIN M., GENIN B., LE TREIS M., 2004. Interactions « eau et forêt » dans le cadre du projet Life « Forests for water ». Nancy : ENGREF. Rapport de TGE, 65 p.

DÉCAMPS H, DÉCAMPS O, 2002. Ripisylves méditerranéennes. Arles : MedWet Station Biologique Tour du valat. 139 p.

MCPFE, 2007. Déclaration et résolutions de Varsovie. 5e Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe, 5-7 novembre 2007, Varsovie, Pologne. Paris : ministère de l'Agriculture et de la Pêche. 15 p.

FERRY O., 2004. La forêt au service de l'eau : une perspective européenne ? Revue Forestière Française, vol. 56, n°1, pp. 47-64
FERRY O., 2006. Quels constats pour une forêt au service de l'eau ? Quelques enseignements du projet Life Forests for water. Revue Forestière Française, vol. 58, n°4, pp. 399-407

FUSTEC E., FROCHOT B., BENDJOUDI H., ROCHER J., THIBERT S., 1996. Les fonctions des zones humides, synthèse bibliographique. Nanterre : Agence de l'eau Seine Normandie. Rapport, 145 p.

LAVABRE J., ANDREASSIAN V., 2000. Eaux et forêts. La forêt, un outil de gestion des eaux ? Paris : Cemagref Éditions, 116 p.

ONF, 1999. Bulletin technique de l'ONF n° 37 – L'eau et la forêt. Synthèse bibliographique réalisée par Christine Fort. Fontainebleau : ONF. 240 p.

PIEGAY H., PAUTOU G., RUFFINONI C., 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau. Écologie, fonctions et gestion. Paris : Institut pour le développement forestier. 463 p.

WASSON J.G. (coord.), 2008. L'arbre, la rivière et l'homme. Paris : ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable/D4E. Rapport CPNB, 64 p.

Quelles questions se pose-t-on encore au sujet du lien entre couvert forestier et hydrologie ?

En ce qui concerne le régime des cours d'eau, le rôle réputé bénéfique du couvert forestier prête à discussion. Des idées reçues tenaces subsistent, fondées sur des faits mal observés ou mal interprétés. Vazken Andréassian fait ici la part de ce que la recherche permet de d'affirmer aujourd'hui et des questions qui restent encore à explorer.

Pour tous les forestiers, *Eaux* et *Forêts* paraissent intimement liées. Et pour beaucoup, il semble aller de soi que les forêts ont sur l'eau une triple influence bénéfique sur (i) l'alimentation et le débit des sources, (ii) sur la réduction des crues et de l'érosion, et (iii) sur la pluviosité. Historiquement, ces influences forestières ont été l'objet de nombreux débats : dès 1821, le ministre de l'Intérieur de Louis XVIII, Siméon, s'est emparé de la question en lançant une vaste enquête (relayée par les préfets du royaume) pour rechercher les causes « *des refroidissements sensibles dans l'atmosphère, de variations subites dans les saisons et d'ouragans ou d'inondations extraordinaires auxquels la France semble devenir de plus en plus sujette, et que l'on attribue en partie aux déboisements des montagnes, aux défrichements des forêts* » (Bainville et Ladoy, 1995). Le débat s'est poursuivi de façon très active jusqu'à la fin du second empire, alimenté par les prises de positions de personnalités scientifiques (Arago, Gay-Lussac, Boussingault, Lamarck…), politiques (Siméon, déjà cité, mais aussi le maréchal Vaillant, ministre de Napoléon III), et par des tentatives – trop peu nombreuses malheureusement – de dépasser le débat d'idées pour aller observer et mesurer sur le terrain l'effet réel de la forêt sur le cycle hydrologique (Belgrand, 1853; Belgrand, 1854a; Belgrand, 1854b; Jeandel *et al.*, 1862 ; Matthieu, 1878).

SMALL EXPERIMENTAL WATERSHED AT COWEETA

ALL FOREST GROWTH WAS CUT DOWN TO BROOM-HANDLE SIZE AND ALLOWED TO REMAIN WHERE IT FELL. SPROUTS HAVE BEEN KEPT CUT BACK TO THE GROUND SINCE, WITH NO DISTURBANCE. AS A RESULT, THERE IS A WEALTH OF FAUNA AND FLORA, AND THE SOIL IS EXCEEDINGLY POROUS AND OF A BEAUTIFUL CRUMBLIKE STRUCTURE.

Déboisement contrôlé d'un bassin versant (Coweeta, Caroline du Nord, USA) ; extrait de la revue « The scientific monthly », novembre 1948

Les premières tentatives françaises pour asseoir le débat scientifique sur des faits incontestables se sont révélées insuffisantes (Andréassian, 2001). Ce sont les hydrologues américains qui, à partir du début du 20e siècle, se sont emparés de la question et ont lancé des expérimentations de déboisement contrôlé à travers le pays, sur un ensemble de bassins versants (Bosch et Hewlett, 1982; McCulloch et Robinson, 1993). Leurs travaux apportent des références indiscutables pour qualifier le rôle hydrologique de la forêt (Hewlett, 1982).

Ce que l'on sait : les synthèses disponibles

Plusieurs synthèses récentes des connaissances sur le rôle hydrologique de la forêt ont été publiées. Pour ce qui est des articles francophones, on peut signaler notamment 5 publications récentes dont nous rappelons ici sommairement la teneur (bien entendu, la littérature anglophone sur le sujet est elle aussi abondante).

Les articles de Cosandey dans les *Annales de Géographie* (1995) et la *Revue Forestière Française* (2006) s'intéressent aux causes de la réduction du volume annuel des écoulements des bassins versants forestiers. Il est généralement admis que la forêt (comparée à d'autres formations végétales) réduit l'écoulement annuel. L'auteur explique cela par deux ensembles de processus : (i) une meilleure utilisation des réserves en eau du sol qui permet une plus forte évaporation d'été (si les conditions climatiques et pédologiques sont favorables), et (ii) l'interception d'une partie des précipitations incidentes, qui permet une utilisation optimale de l'énergie advective, et donc une plus forte évaporation. C'est essentiellement de la combinaison des conditions climatiques et pédologiques que dépend l'importance du rôle joué par la forêt sur l'évaporation, donc sur le bilan d'écoulement annuel.

L'article de Hurand et Andréassian (2003), publié dans le n° 2 des *Rendez-vous techniques de l'ONF*, retrace les principaux enseignements acquis sur les bassins versants expérimentaux américains et discute de l'impact du déboisement sur le régime hydrologique.

L'article d'Andréassian (2004a), publié dans *la Houille Blanche*, détaille l'histoire des débats qui ont opposé forestiers et hydrologues sur la question du rôle hydrologique de la forêt, puis replace les arguments utilisés par chacune des parties par rapport aux résultats obtenus sur les bassins versants expérimentaux.
Enfin, on peut aussi citer un article d'Andréassian (2008), publié dans *Pour la Science*, qui détaille la méthodologie expérimentale utilisée par les hydrologues pour analyser les « traitements » (boisement ou déboisement) appliqués aux bassins versants forestiers appariés.

Dans la mesure où les *Rendez-Vous techniques* ont déjà évoqué la question, nous nous contenterons d'évoquer ici les deux questions qui nous paraissent essentielles pour les forestiers français : La forêt attire-t-elle les pluies ? La forêt régularise-t-elle l'écoulement des rivières ?

La forêt attire-t-elle les pluies ?

Beaucoup de gens (et en tout état de cause, un bon nombre de forestiers) croient encore aujourd'hui que la forêt attire les pluies, en imaginant comme Baudrillart (1823) que les forêts « *attirent les nuages par le mouvement de leurs feuilles* ».

Une référence discutable

Si cette croyance s'est longtemps appuyée sur des considérations mythologiques, ou sur des récits d'explorateurs du Nouveau Monde, les forestiers français aiment faire référence à une campagne de mesure menée par Auguste Matthieu, alors directeur adjoint de l'École Forestière de Nancy, de 1867 à 1877, en trois stations distinctes autour de Nancy (une station se trouvait au centre du massif forestier de Haye, une seconde était située en lisière, la troisième se situait à une vingtaine de kilomètres en terrain agricole). Les observations avaient montré que la station située dans la zone agricole recevait 20 % de pluie en moins que les deux stations forestières. Cette différence était sans doute l'effet combiné du hasard et d'un problème de métrologie de la pluie bien connu aujourd'hui, celui de la sous-captation des pluviomètres exposés au vent (Sevruk et Nespor, 1994). Notons qu'Auguste Matthieu avait eu la prudence d'écrire au sujet des relevés qu'il avait fait réaliser que « *la série d'observations est malheureusement isolée, et l'on ne peut nier que la déduction tirée des résultats obtenus aux environs de Nancy a besoin, pour devenir une loi inattaquable, d'être fortifiée par beaucoup d'autres observations du même genre, poursuivie en des lieux divers et dans des forêts de toutes essences* ». Malheureusement, de pareilles expériences ne se généralisèrent pas, et les forestiers français s'empressèrent de considérer le résultat de Nancy comme une règle générale.

Que peut-on dire à ce sujet aujourd'hui ?

Il faut faire la part entre le cas général et les cas particuliers. On considère qu'à l'échelle d'un massif forestier, l'influence des arbres sur la pluie est négligeable. On avance parfois le chiffre de 1 à 2 % de pluie en plus au-dessus des massifs forestiers (Aussenac, 1996), liée à la plus grande rugosité des arbres par rapport à d'autres types de végétation. Mais il faut reconnaître qu'avec un tel pourcentage, on est dans la marge d'incertitude des mesures…

À une très grande échelle cependant (celle de l'Amazonie par exemple, couverte par d'immenses massifs forestiers), le recyclage continental de l'humidité prend de l'importance : ceci a poussé certains climatologues à calculer – au moyen de modèles numériques de climat – que la suppression hypothétique de l'ensemble du couvert

forestier aurait pour conséquence une baisse significative des précipitations (de l'ordre de 20 %). Malheureusement, ce résultat s'appuie sur des hypothèses extrêmement irréalistes : les climatologues ont en effet considéré dans leur modèle le remplacement de la forêt par un sol nu ! Il aurait été plus réaliste de connaître les conséquences de la conversion de l'Amazonie forestière en une zone d'agriculture irriguée par exemple (après tout, les plantes cultivées renvoient elles aussi l'humidité du sol dans l'atmosphère).

Pour l'heure, on ne dispose pas d'arguments suffisants pour affirmer que la forêt *fait plus pleuvoir* que tout autre type de végétation. L'idée reçue selon laquelle le déboisement est l'une des principales causes de la réduction des ressources en eau et selon laquelle la forêt fait pleuvoir est un cas classique de confusion entre causes et effets : le plus souvent, la forêt n'attire pas la pluie, mais la forêt est présente parce qu'il pleut suffisamment ; ou bien, la forêt est présente en altitude parce que le sol et les pentes n'y sont guère favorables à la culture. Sous de nombreux climats, il existe un gradient pluviométrique orographique qui fait qu'il pleut plus en montagne qu'en plaine : il serait erroné d'en attribuer la responsabilité aux forêts.

Source : http://www.hubbardbrook.org/

Expérimentation de déboisement sur un bassin versant (Hubbard brook, Maine, USA)

La forêt régularise-t-elle l'écoulement des rivières (crues et étiages) ?

Pour répondre à cette question, on peut s'appuyer sur les résultats d'un ensemble d'expérimentations rigoureuses réalisées sur de petits bassins versants. Ces expériences ont été faites pour l'essentiel aux États-Unis et en Australie. En France, ces expérimentations n'ont été réalisées qu'en Guyane (Fritsch, 1990), quoique l'on dispose d'au moins deux cas de déboisement *accidentel* qui se rapprochent des conditions des expérimentations américaines. Le traitement a consisté à déboiser expérimentalement un petit bassin versant forestier, tout en gardant un bassin voisin intact en référence. Sur cette base, on peut conclure que :

- la forêt consomme en général plus d'eau qu'un autre type de couvert végétal, de telle sorte que le déboisement a habituellement pour effet d'augmenter la production d'eau d'un bassin versant, et le reboisement de la réduire ;
- il n'y a pas de réponse simple en ce qui concerne l'influence de la forêt sur les crues. Ce que l'on peut dire de général, c'est que les crues rares sont peu affectées par le boisement ou le reboisement. L'effet de la forêt (par rapport à un sol nu) est surtout sensible sur l'érosion, et non pas sur les crues ;

■ en ce qui concerne l'influence de la forêt sur les basses eaux (étiages), le reboisement a tendance à réduire les débits d'étiage, et le déboisement à les accroître (dans la mesure où le déboisement ne s'accompagne pas d'une dégradation du sol forestier).

Faut-il pour autant conclure qu'il n'y a plus rien à apprendre, que plus aucune question n'est posée ? Ce serait bien sûr aller trop vite. De nombreux aspects du rôle hydrologique de la forêt font encore débat, et nous proposons ci-dessous une liste des questions qui restent aujourd'hui en suspens.

Conclusion : les questions qui restent ouvertes

Parmi les questions auxquelles les expériences sur les bassins versants expérimentaux n'ont, à notre avis, pas apporté de réponse satisfaisante, on peut citer quatre thèmes principaux.

Les questions d'échelle de temps et d'espace
Les gestionnaires de la ressource en eau souhaitent appliquer les résultats scientifiques à des bassins versants assez grands, de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de km², alors que les bassins de recherche sur lesquels les expériences de déboisement et de reboisement ont porté font rarement plus d'un demi km². Le passage d'une échelle à l'autre n'est pas simple, et des rétroactions hydroclimatiques insoupçonnées pourraient se produire sur de plus grands bassins. Cela est d'autant plus vrai que l'échelle de temps à laquelle se produisent les modifications des grands bassins versants est lente, alors que les changements induits par les expérimentations sont quasi-instantanés.

L'évolution du comportement des peuplements au cours de la croissance
On a tendance à considérer que par sa seule présence, la forêt devrait avoir un impact sur les flux d'eau dans le bassin versant. Mais les recherches des forestiers australiens (Vertessy *et al.*, 2001) – qui ont porté, comme il se doit, sur l'eucalyptus – indiquent que la consommation des arbres peut dépendre fortement de son âge et de sa physiologie, de telle sorte qu'il faudrait pour comprendre ces effets pouvoir évaluer un ensemble de descripteurs pertinents et non pas la seule *surface terrière*.

Les impacts de long terme
Toutes les questions relatives à l'impact du changement climatique butent sur la question de la distinction entre variabilité naturelle et changement de fond. Pour répondre à ces questions, il est important de disposer de chroniques fiables de débits pour des stations de référence. Aux États-Unis, ce réseau existe, c'est celui des observatoires LTER (Long Term Ecological Research). En France, les bassins versants de recherche, dont les séries approchent des cinquante années, pourraient jouer un tel rôle à l'avenir (à condition que leur suivi ne soit pas interrompu).

La nécessité de distinguer l'impact des arbres de ceux du sol forestier
Si on parle souvent de *l'arbre qui cache la forêt*, en hydrologie l'arbre a plutôt tendance à *cacher le sol*. L'une des clés de la compréhension des effets à long terme du boisement, du déboisement réside sans doute dans l'étude de la relation entre les peuplements et le sol. Ce dernier peut en effet conserver pendant des décennies la mémoire des changements qu'il a subis. Par exemple, l'impact à long terme des reboisements des services RTM a pu être étudié par le Cemagref et l'ONF sur le site de Draix dans les Alpes de Haute Provence (Mathys *et al.*, 1996). Sur les marnes noires extrêmement sensibles à l'érosion, la forêt et le génie civil ont pu favoriser la reconstitution d'une couche de sol qui a véritablement métamorphosé la *personnalité* du basin versant.

Poursuivre la recherche

Pour répondre à toutes ces questions que se posent forestiers et hydrologues, des travaux de recherche restent nécessaires. On peut dans un premier temps s'appuyer sur un réseau restreint de bassins versants dits de recherche, qui sont en France gérés essentiellement par le Cemagref (Réal Collobrier, 83 ; Draix, 04 et Orgeval, 77), le CNRS (Mont Lozère, 48), et l'Université de Strasbourg (Strengbach et Ringelbach, 68). Mais il faudra ensuite étendre les études aux bassins versants du réseau national de suivi des débits, administré par le Ministère de l'Environnement et par d'autres opérateurs tels qu'EDF, afin d'évaluer **aux échelles de gestion** et **sur un nombre significatif de cas** les conséquences des changements actuels.

Vazken ANDRÉASSIAN
Chef de l'équipe hydrologie
Cemagref, Antony

Bibliographie

ANDRÉASSIAN V., 2001. L'invention des bassins versants expérimentaux pour tenter de résoudre la controverse hydrologique sur les forêts au 19e siècle. Bulletin du GFHN n° 46, pp. 73-81

ANDRÉASSIAN V., 2004. Couvert forestier et comportement hydrologique des bassins versants. La Houille Blanche n° 2, pp. 31-35

ANDRÉASSIAN V., 2008. Quel effet la forêt a-t-elle sur les écoulements ? Dossier Pour La Science n° 58, pp. 38-41

Cemagref

Seuil hydrométrique (mesure des débits) sur l'Orgeval, en forêt de Choqueuse (77)

AUSSENAC G., 1996. Forêts et eaux : relations entre écosystèmes forestiers et ressources en eau. Bulletin du Conseil Général du GREF.

BAINVILLE V., LADOY P., 1995. Préoccupations environnementales au début du XIXe siècle: la circulaire n°18 du 25 avril 1821. La Météorologie, numéro spécial avril 1995, pp. 88-94

BAUDRILLART J.J., 1823. Traité général des Eaux et Forêts, chasses et pêches, 1. Paris : Arthus Bertrand, 816 p.

BELGRAND E., 1853. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. Annuaire de la Société Météorologique de France n° 1, pp. 176-193

BELGRAND E., 1854a. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux. Annales des Ponts et Chaussées n° 61, pp. 1-27

BELGRAND E., 1854b. De l'influence des forêts sur l'écoulement des eaux pluviales. Annuaire de la Société Météorologique de France n° 2, pp. 81-87

BOSCH J.M., HEWLETT J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology n° 55, pp. 3-23

COSANDEY C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? Annales de Géographie n° 581-582, pp. 7-25

COSANDEY C., 2006. Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau. Revue Forestière Française, vol 58 n° 4, pp. 317-328

FRITSCH J.-M., 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie des petits bassins versants. Montpellier : Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Thèse de doctorat, 392 p.

HEWLETT J.D., 1982. Principles of Forest Hydrology. Athens :The University of Georgia Press. 183 p.

HURAND A., ANDRÉASSIAN V., 2003. Le couvert forestier et l'hydrologie des basins versants. Rendez-vous techniques de l'ONF n° 2, pp. 37-41

JEANDEL F., CANTÉGRIL J.B., BELLAUD, L., 1862. Etudes expérimentales sur les inondations. Paris : Bureau des Annales Forestières. 144 p.

MATHYS N., MEUNIER M., BROCHOT S., 1996. The forest effect on floods in small mountainous catchments: some results from experimental catchments of Draix, France. *In* : Conference on Ecohydrological Processes in Small Basins, Strasbourg (France) September 24-26, 1996. Technical documents in Hydrology, n° 14. Paris : UNESCO, pp. 123-128

MATTHIEU A., 1878. Météorologie comparée agricole et forestière. Paris : Imprimerie Nationale, 70 p.

McCULLOCH J.S.G., ROBINSON, M., 1993. History of forest hydrology. Journal of Hydrology n° 150, pp. 189-216

SEVRUK B., NESPOR V., 1994. The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. *In* : M. Desbois and F. Desalmand (Editors), Global Precipitation and Climate Change (NATO ASI Series; vol. I, 26). Berlin : Springer Verlag, pp. 231-246

VERTESSY R.A., WATSON F., O'SULLIVAN S.K., 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. Forest Ecology and Management n° 143, pp. 13-26

Quel peuplement pour quelle protection des eaux souterraines ? Entre idées reçues et faits démontrés

Les forestiers, les professionnels de l'eau et le grand public en sont convaincus : la forêt est la meilleure protection des eaux souterraines. Certes, mais quelle forêt et avec quelle gestion ? Comment optimiser cette fonction de protection des eaux afin de garantir la meilleure eau potable ? Chacun a sa petite idée là-dessus, mais il n'existe que peu d'études scientifiques qui comparent les effets de différents modes de sylviculture sur les eaux souterraines.

Dans le cadre de travaux préparatoires au projet Interreg franco-suisse Alpeau, dont l'objectif est de mieux connaître la relation entre la sylviculture et la qualité des eaux souterraines, une recherche bibliographique a pu être réalisée sur le thème «Gestion forestière et protection des eaux souterraines» par Maître et Jenni (2007). Cet article se veut une synthèse vulgarisée de cette bibliographie. La publication complète est disponible auprès de l'auteur.
Deux paramètres ont particulièrement été approfondis :
1. La quantité : quelle couverture forestière permet la meilleure réalimentation des nappes souterraines ?
2. La qualité : quelle couverture forestière garantit une eau de la meilleure qualité possible ?

La quantité

On est les meilleurs

C'est bien (re) connu, la forêt est la meilleure couverture du sol pour les eaux souterraines, car elle permet une plus grande infiltration des eaux que les autres milieux. Bharati *et al.* (2002) a notamment démontré que la forêt permet une infiltration 2 à 5 fois plus importante que, dans un ordre décrois-

C. Gassmann

Une eau de source pure et abondante ? C'est une des missions du forestier de garantir sa pérennité !

sant, les prairies, les cultures et les pâtures. L'interception et l'évapotranspiration globale (sur une année) de la forêt sont pourtant plus importantes que celles des autres couvertures du sol, mais leur influence va surtout dépendre de l'intensité et de la répartition des précipitations (cf. ci-dessous).

Plus d'infiltration sous jeunes feuillus que sous vieux résineux

Si de nombreuses études ont pu mettre en évidence la supériorité qualitative de la forêt, en matière de protection des eaux, par rapport aux autres milieux, peu se sont attelées à comparer les types de peuplements entre eux. Deux publications approfondissent ce thème.

La première, de Brechtel et Pavlov (1977), a comparé des peuplements de différentes essences et de différents stades de développement. Les feuillus sont particulièrement favorables, car en hiver ils interceptent sensiblement moins d'eau de pluie que les résineux. Quant aux jeunes peuplements, ils interceptent non seulement moins d'eau, mais ils en transpirent également moins.

La deuxième publication, de Salihi (1984), s'est quant à elle intéressée au bilan hydrique de deux peuplements voisins, le premier de hêtre et le second d'épicéa. Pour les mêmes raisons que précédemment, le peuplement de hêtre permet globalement une meilleure infiltration (56 % sous hêtre, 41 % sous épicéa, précipitation d'environ 1 000 mm/an). Il est néanmoins intéressant de constater que ces résultats sont soumis à de fortes variations en fonction de la répartition et de l'intensité des précipitations. Lors d'années très sèches (pas d'infiltration) ou très humides (forte infiltration), il n'y a pratiquement pas de différences entre les types de peuplement.

ONF, agence Basse-Normandie

Les dégâts d'exploitation provoquent un tassement qui imperméabilise le sol et détruit les horizons supérieurs, anéantissant leur fonction de filtre biologique

Attention au compactage du sol

Si l'infiltration dans les eaux souterraines dépend d'abord du sous-sol, elle dépend également du sol. Les sols limoneux, très fréquents en forêt, sont particulièrement sensibles au tassement du sol. Lüscher, Frutig et Thees (2005) ont démontré qu'un seul passage de machine suffisait déjà à compacter irréversiblement les horizons supérieurs du sol. Il n'est pas difficile de s'imaginer que ce compactage provoque une imperméabilisation du sol et influence sensiblement l'infiltration des eaux dans les aquifères.

La qualité

Presque les meilleurs

Du point de vue qualitatif, par rapport aux autres milieux, la forêt s'en sort une fois de plus très bien. Seules les eaux «minérales» issues d'aquifères montagneux font encore mieux. Par rapport aux zones agricoles (20 – 50 mg/l, parfois plus encore…), la teneur en nitrate des eaux souterraines issues de milieux forestiers est bien moindre (5 – 10 mg/l). Ces résultats dépendent bien sûr de l'activité biologique du sol et de la végétation, laquelle assure un recyclage important de l'azote, diminuant d'autant sa lixiviation dans les eaux souterraines.

Élément clé : activité biologique du sol

Comme l'activité du sol est l'élément clé de la qualité des eaux souterraines, les peuplements assurant une bonne activité biologique renforcent encore cette dynamique. Les feuillus peuvent donc être préférés aux résineux, et un étagement des peuplements optimisera le fonctionnement du système.

Effet des coupes rases

Les coupes rases ont mauvaise presse auprès du public. Mais du point de vue scientifique elles sont intéressantes, car elles représentent le choc le plus spectaculaire qu'on

puisse infliger à l'écosystème forestier. Différentes études ont cherché à mettre en évidence leur influence sur les eaux souterraines. Toutes constatent une brusque augmentation de la concentration en nitrate, déjà après quelques semaines. Mais les courbes plafonnent rapidement avant de descendre et retrouver leur valeur initiale après 10 ans environ (figure 1). À noter toutefois que les maxima atteints restent nettement en dessous des valeurs limites légales.

Ce phénomène s'explique facilement. La mise en lumière provoque une brusque minéralisation des matières humiques accumulées et des rémanents de coupe, mais la végétation herbacée luxuriante qui se développe rapidement réutilise une bonne partie de ces éléments nutritifs.

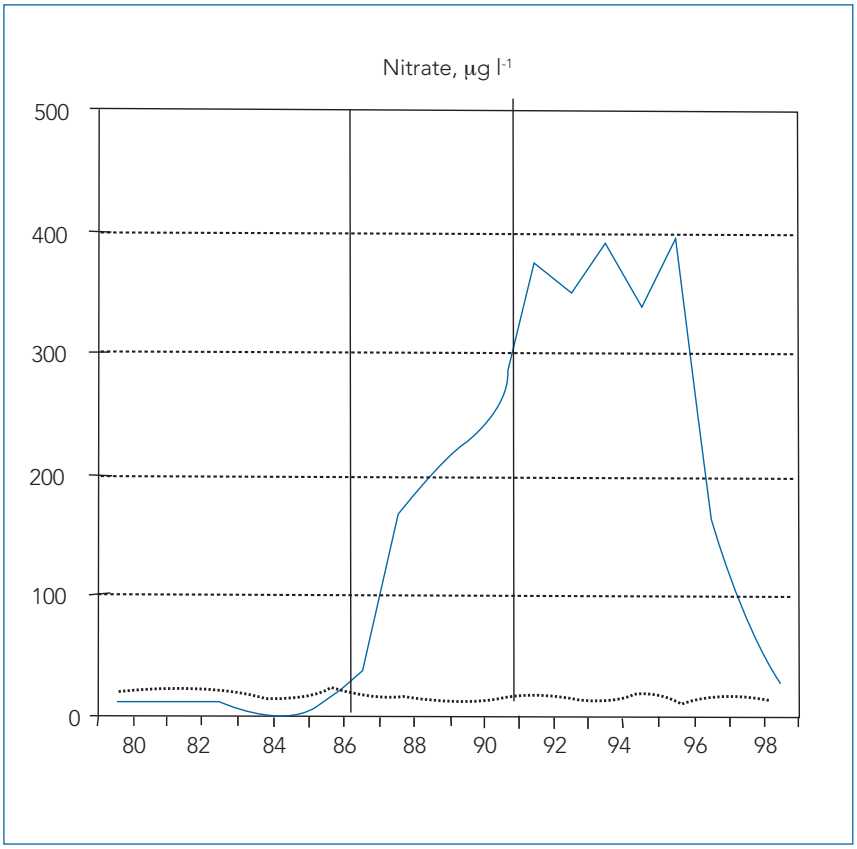


Fig. 1 : évolution temporelle des concentrations en nitrates dans les eaux du sol après une coupe rase réalisée en 1987 (d'après Henriksen et Kirkhusmo, 2000)

Des effets des coupes rases ont aussi été constatés, mais pas toujours documentés, au niveau de la turbidité des eaux captées directement sous le système racinaire.

Produits phytosanitaires

Par rapport aux agriculteurs, les forestiers font une utilisation très sobre des produits phytosanitaires. Les produits de lutte contre le bostryche liseré font exception. Leur emploi est généralisé pour la conservation des piles de bois à la fin du printemps. On ne sait à ce jour pas clairement quelle quantité et quels types de résidus se retrouvent dans les eaux souterraines. Mais il est néanmoins évident « qu'un insecticide ne peut être que nocif pour l'environnement ».

Dans les pays industrialisés, la lutte contre les micropolluants représente un des défis majeurs du 21e siècle, que ceux-ci soient d'origine phytosanitaire, médicale ou autre. Les premières études dans les eaux des lacs (CIPEL 2007) montrent que de nombreux micropolluants sont persistants dans l'eau. Bien que leur concentration ne dépasse pas la limite légale, des recherches sont en cours pour déterminer dans quelle mesure certains produits, même à des concentrations infimes, pourraient déjà avoir un effet nocif sur l'environnement en général, et sur l'être humain en particulier.

Synthèse et pondération

Les différentes publications scientifiques passées en revue dans le cadre des travaux préparatoires du projet Alpeau confirment ce que l'on pensait instinctivement :

- les feuillus sont préférables, tant du point de vue qualitatif que quantitatif ;
- une gestion en coupes progressives ou jardinatoires est propice à une très bonne protection des eaux ;
- il est important de veiller à protéger les sols du compactage et du labourage durant les exploitations ;
- l'usage de produits phytosanitaires devrait être évité dans les zones d'alimentation des nappes souterraines.

Néanmoins, avant d'appliquer aveuglément ces résultats sur le terrain, il est indispensable de bien les pondérer en fonction de l'humus, du sol et sous-sol. Par exemple, sur les sols biologiquement très actifs (mull), l'influence du peuplement est très nettement moindre que sur les sols acides (humus brut). Il est également aisément imaginable que le rôle du peuplement risque d'être différent sur le karst, où le sol forestier représente la seule filtration de l'eau, que sur des sédiments, où la fonction du sol forestier est surtout de ne pas charger l'eau en polluants.

S. Dumas, ONF

Une forêt étagée et mélangée a un écosystème très dynamique recyclant la grande majorité des matières nutritives

Perspectives et conclusion

Le projet Alpeau permettra d'approfondir certaines connaissances de la relation forêt – sol – eau souterraine. L'objectif est de disposer d'outils d'appréciation de la fonction de protection des eaux souterraines transposables sur le terrain par les praticiens forestiers disposant de connaissances de base sur les humus, les sols et l'hydrogéologie.

Les études scientifiques confirment ce que le bon sens forestier soupçonnait. Les types de gestion forestière favorisant l'activité biologique et le développement d'une végétation diversifiée et abondante protègent au mieux les eaux souterraines.
Attention, l'eau souterraine est un bien très précieux et très dépendant de notre activité terrestre. L'action en forêt est axée sur sa continuité dans le temps, et la protection des eaux souterraines s'inscrit dans cette durabilité. S'il est possible de faire un peu tout en sylviculture sans compromettre gravement la qualité des eaux, il n'en est pas de même au niveau de l'exploitation des bois, où les dégâts au sol, compactage ou labourages, peuvent péjorer gravement les eaux souterraines.

Robert JENNI
ingénieur forestier EPFZ
Bureau Nouvelle Forêt sarl
Fribourg (Suisse)

Bibliographie

BHARATI L., LEE K.H., ISENHART T.M., SCHULTZ R.C., 2002. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA. Agroforestry Systems n° 56, pp. 249-257

BRECHTEL H.M., PAVLOV M.B., 1977. Niederschlagsbilanz von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen in der Rhein-Main-Ebene. Kuratorium für Wasser und Kulturbauwesen

HENRIKSEN A., KIRKHUSMO L.A., 2000. Effects of clear-cutting of forest on the chemistry of a shallow groundwater aquifer in southern Norway. Hydrology and Earth System Sciences n° 4, pp. 323-331

SALIHI O.O.A., 1984. Potentielle Verdunstung eines Buchen- und eines Fichtenwaldes auf der Basis von Daten des deutschen Wetterdienstes als Parameter der aktuellen Evapotranspiration. Dissertation. Universität Göttingen

CIPEL (Commission internationale pour la protection des eaux du Léman), 2007: Tableau de bord
LÜSCHER P., FRUTIG F., THEES O., 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald ist kein Luxus. — Zür. Wald n° 6, pp. 10-13

MAÎTRE V., JENNI R., 2007: Etude bibliographique sur la relation forêt – eau souterraine. Disponible auprès de l'auteur.

Les méthodes d'évaluation économique des services rendus par la forêt pour la production d'eau potable

La forêt peut contribuer à produire de l'eau de qualité. Il est possible de sécuriser et d'optimiser ce service via des contrats. Cette perspective implique le développement d'évaluations économiques du service environnemental rendu. Examinons quelques méthodes pour y parvenir.

En France, la forêt est reconnue comme essentiellement favorable à la qualité de l'eau tant du point de vue de l'opinion que des politiques publiques (Ferry 2006). Les avis scientifiques appuient ce constat : relativement aux autres usages du sol (agricole et urbain), la forêt est considérée comme le moins polluant pour l'eau (Benoît et Papy, 1997). Il existe de nombreux travaux portant sur l'influence de la forêt sur l'eau, toutefois l'évaluation économique reste rarement abordée. Afin de combler cette lacune, l'INRA et l'IDF mènent une action conjointe intitulée « forêt et eau », dont l'objectif est précisément la valorisation des services de production d'eau propre rendus par la forêt, en vue de leur contractualisation. Notre travail se concentre sur la contribution de la forêt à la fourniture d'eau potable car celle-ci réunit les meilleures conditions pour contractualiser le service. En effet, la distribution d'eau potable est un service marchand (via l'incontournable facture d'eau) avec des acteurs identifiés, des exigences fortes en termes de qualité et de quantité : donc une demande potentielle de service. D'ailleurs l'alimentation en eau potable induit déjà des contraintes pour les forestiers via les démarches de protection de cap-

J. Fiquepron, IDF

Captage d'eau potable en forêt (FC Masevaux)

tages, dont la mise en application n'est pas sans difficulté. Nous choisissons de nous situer dans un cadre de forêts multifonctionnelles, où le forestier ne renonce pas à sa production marchande de bois, mais doit inclure de nouvelles contraintes liées à la fourniture d'un service environnemental.

Cet article a donc pour objet de présenter différentes façons d'évaluer ce service et de donner un exemple d'outil de contractualisation (des exemples d'application des méthodes sont présentés dans l'article suivant de ce même dossier pp. 39-43).

Une demande croissante d'évaluation du service

L'idée de rémunérer les services environnementaux fournis par les forêts est bien sûr présente depuis longtemps dans l'esprit des forestiers. Mais quel serait l'intérêt de vendre un service si personne ne s'y intéressait en face ? Sur ce point la demande se précise, et ce à différents niveaux. Au niveau européen, la MCPFE (Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe), dans la déclaration de Varsovie, engage les État signataires et la Communauté européenne à incorporer l'évaluation économique des services des forêts liés à l'eau dans les politiques et à faciliter le développement des outils économiques, tels que les paiements pour les services environnementaux.

Au niveau français, le Grenelle de l'environnement et les Assises de la forêt confirment cet engagement ; ils visent notamment à « asseoir le rôle de la forêt dans la protection de la ressource en eau potable » et à « rémunérer les services supplémentaires rendus par la forêt ».

Parallèlement, grâce à la sélection de sites pilotes, l'action conjointe « forêt et eau » nous a permis de vérifier que des collectivités en charge de l'eau potable étaient prêtes à contractualiser le service rendu par les forestiers. Le contexte semble ainsi favorable ; l'État encourage ces mesures et il est possible de réunir des fournisseurs de services (forestiers) avec des acheteurs potentiels (collectivités). En conséquence, nous relevons un besoin d'évaluation en terme de référence pour négocier des contrats et en terme d'aide à la décision pour les pouvoirs publics.

Des territoires plus boisés : une influence positive sur l'eau potable

Pour quantifier l'impact de la forêt sur le prix et la qualité de l'eau, nous avons mené une étude économétrique à l'échelle du territoire français. Au vu de la variabilité des liens entre la forêt et la qualité de l'eau, nous avons choisi de couvrir l'ensemble du territoire français en nous appuyant sur des données communes et observées dans chaque département. Ainsi, nous avons collecté des données relatives à la gestion de l'eau et des données sur les usages du territoire et l'occupation des sols, dont la proportion de surfaces boisées à l'échelle du département.

La méthode de traitement et d'exploitation des données est basée sur l'estimation d'un modèle à équations simultanées comprenant une équation du prix de l'eau, deux équations sur des indicateurs de qualité des eaux brutes (pesticides et nitrates) et une équation sur le mode de gestion du service d'alimentation en eau potable (régie ou délégation de service public). Les principaux résultats d'estimation montrent un effet positif de la forêt sur la qualité des eaux brutes relativement aux autres usages du sol, avec un effet indirect sur le prix de l'eau, meilleur marché pour les consommateurs.

Les résultats obtenus amènent à des discussions à l'échelle de notre territoire, relatives aux choix d'occupation des sols, mais aussi aux incitations potentiellement applicables auprès des propriétaires forestiers.

Qualifier le service rendu selon l'action du forestier

Avant de parler d'évaluation économique et de contractualisation, il faut d'abord s'entendre sur le type de service rendu. Ainsi, nous distinguons deux niveaux de service, selon le rôle actif ou passif du sylviculteur. Nous discernons le service rendu par la simple existence de forêt de celui lié à des actions sylvicoles spécifiques pour l'eau potable. Cette nuance est importante, elle est d'ailleurs sous-entendue dans l'expression « services supplémentaires » au paragraphe précédent.
Les services liés à l'existence d'un couvert forestier donneront plus difficilement lieu à une contractualisation, mais il n'est pas inutile de s'y intéresser. Leur évaluation permet de justifier la place de la forêt et de l'activité forestière relativement aux autres couverts et usages du territoire (cf. encadré).

Comment donner une valeur à un service non marchand

Un travail préalable d'enquête au niveau national nous a permis de confirmer qu'à l'heure actuelle, le service rendu par la forêt pour l'eau potable n'était pas marchand. Se pose alors la question de valoriser un service qui n'a pas de prix ou qui n'existe pas encore. Les méthodes d'évaluation employées en économie de l'environnement sont classiquement séparées en deux catégories (Bontemps et Rotillon, 2003).

Les méthodes indirectes sont généralement basées sur l'obser-

J. Fiquepron, IDF

Boisement de protection d'un captage alimentant la ville de Rennes

vation des comportements : on parle également de préférences révélées. Elles concernent des biens non marchands implicitement échangés sur des marchés dits proches (exemple de l'évaluation du paysage via les transactions immobilières).

À l'opposé, les **méthodes directes** permettent d'évaluer un bien pour lequel il n'existe pas de marché proche : on parle également de préférences établies ou déclarées. Elles consistent à interroger les individus sur leurs préférences, notamment sur leur consentement à payer pour une amélioration de l'environnement. Ces méthodes ne s'appuient pas sur des comportements observés, mais sur des réponses face à des scénarios hypothétiques. Elles sont bien adaptées à l'examen de mesures en projet. Afin d'évaluer les services rendus par la forêt pour l'eau, nous faisons appel à ces deux catégories de méthodes.

Les méthodes d'évaluation indirectes

Le type de données disponible oriente fortement le choix des méthodes. Notons que celles-ci peuvent être complémentaires. Leur combinaison permet de mieux intégrer les enjeux selon les différents acteurs : forestiers, collectivités, ou ménages.

Les dépenses de protection

Le principe est assez intuitif : il s'agit de comptabiliser les dépenses effectuées pour prévenir ou réparer soit une dégradation de l'environnement, soit les impacts négatifs d'un environnement réellement dégradé (Nations unies, 1993). Les dépenses de protection permettent d'estimer un consentement à payer minimal des acteurs. Minimal, car ces derniers peuvent attribuer au service rendu une valeur bien supérieure à la dépense engagée. En prolongement de cette méthode, il est fréquent d'estimer les coûts évités grâce aux dépenses de protection. Cette méthode peut être appliquée pour les boisements de protection de captages[1] d'eau potable, comme à Rennes par exemple.

Étude des dommages

L'étude des dommages se déroule en deux phases. La première étape consiste à établir un lien de causalité entre une modification de l'environnement et ses conséquences ; citons le cas d'une exploitation de coupe qui aurait provoqué un pic de turbidité dans les eaux captées. Dans la seconde étape, il s'agit d'associer une valeur monétaire au lien mis en évidence précédemment (volumes d'eau perdus, travaux de nettoiement des captages, dépenses d'analyses d'eau supplémentaires…). L'étude des dommages peut justifier l'adoption de mesures préventives en forêt.

Études technico-économiques

Nous développons des études technico-économiques afin de tester l'opportunité d'établir des actions forestières spécifiques pour l'eau potable. Cette approche est appliquée sur des captages plus ou moins dépendants des activités forestières, dits « plus ou moins forestiers ». Les captages « forestiers » répondent à deux critères :
- leur production est directement liée aux activités en surface, c'est-à-dire qu'ils n'exploitent pas de l'eau « fossile » ;
- les taux de boisement de leurs périmètres de protection, ou mieux, de leur bassin d'alimentation y sont importants.

Les études technico-économiques nécessitent également plusieurs étapes. En pratique, nous comparons dans un premier temps les dépenses de fonctionnement et le coût des infrastructures de captages « plus ou moins forestiers » au sein d'un service d'eau[2], comme celui de Masevaux. Dans les cas où des captages forestiers sont moins onéreux à exploiter, il est possible de dégager une marge de manœuvre financière pour développer des actions de prévention en forêt pour l'eau. Il peut néanmoins être justifié de le faire également pour des captages dits « coûteux », notamment en cas de ressource en eau limitante. En effet, le manque d'eau disponible incite à optimiser tous les points de prélèvement. Une étape parallèle consiste à définir

1 Un captage désigne tout ouvrage utilisé couramment pour l'exploitation d'eaux de surface ou souterraines

2 Un service d'eau regroupe l'ensemble des ouvrages qui permettent de capter l'eau, de la traiter et de la distribuer aux abonnés qui dépendent d'une collectivité locale en charge de l'eau.

des mesures sylvicoles optimales pour l'eau potable, en essayant de qualifier leur efficacité. Dans un second temps, nous évaluons les surcoûts pour les forestiers liés à l'adoption de ces mesures spécifiques ; nous les qualifions de surcoûts techniques. Ensuite, nous estimons les coûts de transaction nécessaires à la mise en œuvre de ces mesures. Ils comprennent les coûts d'animation pour l'application des mesures et les coûts de contrôle. Ces différentes étapes permettent d'argumenter économiquement une contractualisation d'actions forestières pour l'eau potable, notamment en établissant des références coût/efficacité de mesures forestières.

Évaluation directe : la méthode des choix multi-attributs

Alors que les méthodes d'évaluation indirectes précédemment évoquées sont basées sur des critères techniques, le service rendu par la forêt comporte également une autre dimension, « plus subjective ». Sa prise en compte requiert des méthodes particulières, comme celle des choix multi-attributs. Cette méthode consiste à interroger des individus sur leurs préférences face à des scénarios hypothétiques qualifiant le passage d'un état initial à un état final définis (Dachary-Bernard, 2007). Les scénarios sont caractérisés par des attributs de différentes valeurs. La construction d'un modèle économique permet de produire des prix implicites pour les différents scénarios.

Nous utiliserons cette méthode dans le but d'estimer le consentement à payer des ménages pour une eau « naturelle » d'origine forestière. Ce travail de recherche argumentera l'intérêt de gérer préventivement l'eau en collaboration avec les forestiers afin d'obtenir une eau de qualité avec un minimum de traitements. Le service considéré est la qualité de l'eau potable distribuée aux ménages. Cette qualité de l'eau distribuée est interprétée au sens large : elle est caractérisée par les paramètres physico-chimiques de l'eau distribuée mais également par l'origine de l'eau brute et par les mesures de prévention et de traitement de potabilisation prises pour garantir la qualité de la ressource. Nous cherchons à identifier un aspect « confiance des ménages » pour de l'eau forestière. Il semble pertinent de valoriser une image positive de l'eau venant de la forêt, alors que plus de la moitié des Français pense que les eaux usées sont retraitées directement en usine pour produire de l'eau potable (C.I.eau, 2008).

Le paiement des services environnementaux : un exemple de support pour la contractualisation

Nous avons vu différents moyens d'évaluer un service environnemental, reste à présenter une finalité de ces évaluations : la contractualisation du service. Les outils de paiement du service environnemental (PSE) permettent de transformer des effets non marchands de l'environnement en incitations financières réelles pour les acteurs locaux à même de fournir ces services. Ils permettent

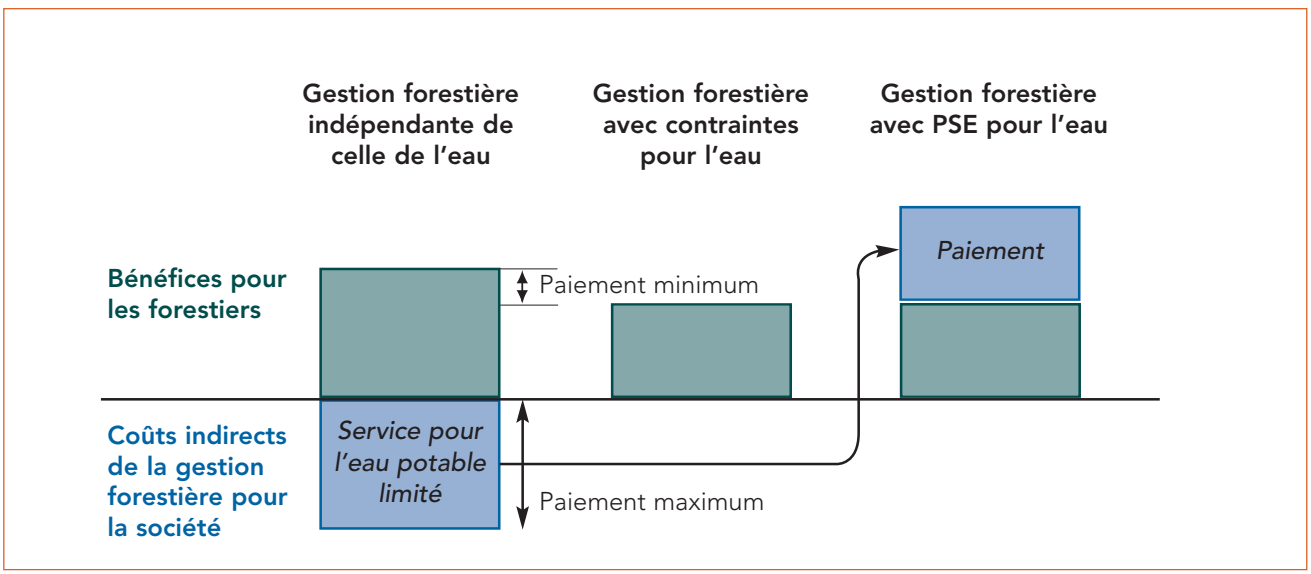


Fig. 1 : la logique du paiement des services environnementaux (PSE), d'après Wunder et al. (2008)

d'internaliser la valeur du service qui jusque-là était externe au marché et donc potentiellement sans valeur pour les acteurs. Nous retenons la définition des PSE d'après Wunder (2005) comme :
- une transaction volontaire, où
- un service environnemental défini (ou un usage du sol favorable à la sécurisation de ce service)
- est acheté par (au moins) un acheteur de service,
- à (au minimum) un producteur de service,
- si et seulement si le producteur du service sécurise la fourniture du service (conditionnalité).

Le principe de PSE appliqué à la forêt et à l'eau potable est présenté en figure 1. Retenons la présentation de l'encadrement du paiement, entre une simple indemnisation des surcoûts des forestiers (paiement minimum), et une rémunération équivalente au montant du service rendu (paiement maximum).

La mise en œuvre de PSE forestiers pour l'eau est plus particulièrement développée en Amérique latine. La France peut sembler en retard sur cette question. Le contexte réglementaire est en partie responsable de ce décalage. En effet, les PSE d'Amérique latine concernent essentiellement la conservation de forêts existantes. En évitant le défrichement, ils sécurisent la fourniture d'un service de protection de la ressource en eau. En France, les défrichements sont efficacement contrôlés par la réglementation, d'autant plus sur des territoires sensibles pour l'eau potable. Notre réglementation prend donc, en partie, le rôle des PSE.

Pour conclure

Au final, les services rendus par la forêt pour l'eau potable ne sont pas actuellement marchands en France. *A fortiori*, il n'y existe pas de véritable paiement des services environnementaux forestiers pour l'eau. Il reste néanmoins des opportunités pour le développement de mesures de prévention pour l'eau potable en forêt : citons les modalités d'exploitation de coupes ou la réalisation de boisements. Ces mesures peuvent relever du domaine contractuel, où les méthodes d'évaluation économiques du service rendu trouveront toute leur place. Encore la moitié des démarches de protection de captages est à finaliser d'ici 2010 (d'après le Plan National Santé Environnement). Il reste également à mettre en œuvre les plans d'action pour protéger les captages menacés par des pollutions diffuses (prévus dans la loi sur l'eau et les milieux aquatiques). Le champ de développement des services forestiers pour l'eau paraît considérable.

Julien FIQUEPRON
Ingénieur forêt et eau
IDF et INRA
LEF, Laboratoire d'Economie Forestière (Nancy)
julien.fiquepron@cnppf.fr

L'action conjointe INRA et IDF « forêt et eau » est soutenue financièrement par le ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Bibliographie

BENOIT M, PAPY F., 1997. Pratiques agricoles sur le territoire et qualité de l'eau alimentant un captage, In l'eau dans l'espace rural, INRA, pp 323-338

BONTEMPS P., ROTILLON G., 2003. Économie de l'environnement. Paris, La Découverte, 118 p.

C.I.eau, 2008. Baromètre C.I.eau/TNS SOFRES 2008 - 13ème édition « Les Français et l'eau », principaux résultats, 20 p.

FERRY O., 2006. Quels contrats pour une forêt au service de l'eau ? Quelques enseignements du projet LIFE Forests for Water. Revue Forestière Française, pp 399-406

MCPFE, 2007. Déclaration de Varsovie, 5ème conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe, 5-7 novembre 2007. http://www.mcpfe.org/francaise/general

DACHARY-BERNARD J., 2007. La méthode des choix multi-attributs appliquée aux Mnts d'Arrée. Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales, n° 84-85, pp 133-166

NATIONS UNIES, 1993. Manuel de comptabilité nationale - Comptabilité économique et environnementale intégrée, version intérimaire. Département de l'information économique et sociale et de l'analyse des politiques, Etudes méthodologiques, Série F n°61, 182 p.

WUNDER S., ENGEL S., PAGIOLA S., 2008. Taking stock : A comparative analysis of payments for environmental services programs in developed and developing countries. Ecological Economics, vol. 65 n° 4, pp 834-852

Deux exemples de gestion forestière pour l'eau potable : Rennes (35) et Masevaux (68)

Nous avons réuni ici deux exemples très différents de la contribution de la gestion forestière à la production d'eau « propre ». Pour illustrer les méthodes exposées à l'article précédent, chacun de ces deux témoignages est accompagné d'un encadré sur l'évaluation économique correspondante du service environnemental rendu.

Boisement des périmètres de protection des captages : exemple de la Ville de Rennes

Contexte

L'approvisionnement en eau potable du bassin rennais provient de 4 secteurs et comprend deux retenues, deux prises en cours d'eau et une alimentation souterraine.

La Ville de Rennes est propriétaire des usines et des réseaux, elle est maître d'ouvrage des procédures de définition et de gestion des périmètres de protection des captages et des plans de gestion de la ressource en eau (partie réglementaire de la protection des ressources en eau). Le SMPBR (syndicat mixte de production d'eau potable du Bassin Rennais), lui, a pour mission de développer les nouvelles ressources, a la maîtrise d'ouvrage des études, et est responsable de la protection des ressources et de la coordination sur les bassins versants. Il évalue le programme pour l'amélioration de la qualité de l'eau (partie contractuelle de la protection).

Les bassins d'alimentation des captages sont très agricoles (80 % de SAU), la forêt n'occupant que 9 % du territoire. De ce fait, les pollutions diffuses agricoles constituent la principale menace sur la qualité des eaux captées, notamment pour les nitrates dont les concentrations restent préoccupantes.

ONF

Boisement des périmètres de captage de Rennes I

La dégradation de la qualité des ressources en eau a conduit le SMPBR a s'investir dans un programme de reconquête de la qualité de l'eau, prioritairement axé sur la réduction des apports et transferts d'azote, mais aussi des pesticides et des matières organiques. Les outils réglementaires (périmètre de protection des captages, Directive Nitrates) étant considérés comme insuffisants, le SMPBR a choisi de mener une démarche de négociation, de conseil et de partenariat avec les agriculteurs, notamment via les programmes Bretagne Eau Pure.

Boisement des captages

Le boisement des terres est réalisé sur des territoires ciblés et constitue un moyen de sécuriser l'occupation de l'espace, en éloignant les usages néfastes (pâturages intensifs, cultures). La Ville de Rennes cherche à boiser les

terrains difficilement valorisables en prairie de fauche car non mécanisables (pente trop forte par exemple). Elle cherche également à limiter le ruissellement à l'amont des ressources superficielles en plantant des haies sur talus.

Sur les captages du secteur I près de Fougères (adduction de Rennes I), pour mener à bien ces opérations de boisement, la Ville de Rennes a profité de l'opportunité des échanges fonciers induits par la création de l'autoroute A84 pour avoir la maîtrise foncière des périmètres de protection des captages. À ce jour, ce sont près de 150 ha (25 ha de Périmètre de Protection Immédiat et 139 ha de Périmètre de Protection Rapproché) qui ont fait l'objet d'acquisition à l'amiable dont 70 ha ont été boisés. Pour achever la protection des terrains sensibles, il reste 15 ha à acquérir, dont 10 à boiser.

Le boisement a été réalisé en 2 tranches (1999-2000, 2001-2002), en suivant les recommandations d'une étude paysagère réalisée par un bureau d'étude et un expert forestier. Le choix des essences a été guidé par le cahier des charges de l'agence de l'eau (voir l'article de F. Aureau, dans ce dossier), en privilégiant les essences locales : chêne pédonculé et sessile (70 %), hêtre (10 %), essences accessoires (20 %) dont merisier (3 %), frêne (1,5 %), peupliers et autres feuillus.

La plantation a été réalisée sans retournement de la prairie pour ne pas altérer la qualité de l'eau par minéralisation de la matière organique (lessivage d'azote). Le travail du sol a donc été uniquement effectué sur la ligne de plantation.

Avec un taux de reprise de 90 %, le boisement est considéré comme un succès. Son rôle de protection

Rennes : application de la méthode des dépenses de protection

• Dépenses de protection

Les dépenses de protection des captages de Rennes I comprennent les postes suivants :

Dépenses liées au boisement de 71,5 ha : 1 090 000 € HT
42 000 € pour la maîtrise d'œuvre ;
450 000 € pour les travaux et 3 ans d'entretien (6 300 €/ha) ;
600 000 € pour les acquisitions foncières.

Dépenses liées aux actions d'animation sur le bassin versant (essentiellement envers les agriculteurs, sur la fertilisation et l'usage de produits phytosanitaires) : 1 780 000 € sur la période 1996-2006.

Montant des dépenses de protection sur 10 ans : **0,16 €/m³** d'eau produit, dont **0,04 €/m³** liés aux boisements.

• Coûts évités

Le coût d'un projet de changement de ressource s'élevait à 41 150 000 € (travaux d'interconnexion avec une usine d'eau potable à l'estuaire de la Vilaine). Plus précisément, la protection de la ressource a permis de reporter la nécessité de créer à court ou moyen terme une nouvelle interconnexion, sans l'annuler définitivement. En rapportant cet investissement aux volumes produits sur 10 ans par les drains de Rennes I, le coût s'élèverait à **1,50 €/m³**. De plus, ce coût ne prend pas en compte les achats d'eau, pour un volume de 27,5 millions de m³ sur 10 ans.

Ainsi, pour le site des drains de Rennes I, la démarche de protection préventive s'avère 10 fois moins onéreuse que la démarche curative.

Le suivi de l'évolution des teneurs en nitrates de l'eau des drains (figure 1) constitue un indicateur d'efficacité des actions de prévention. L'amorce de la baisse des teneurs coïncide avec la mise en place des boisements. Nous ne sommes toutefois pas en mesure de discerner l'effet du boisement de celui du changement de pratiques agricoles.

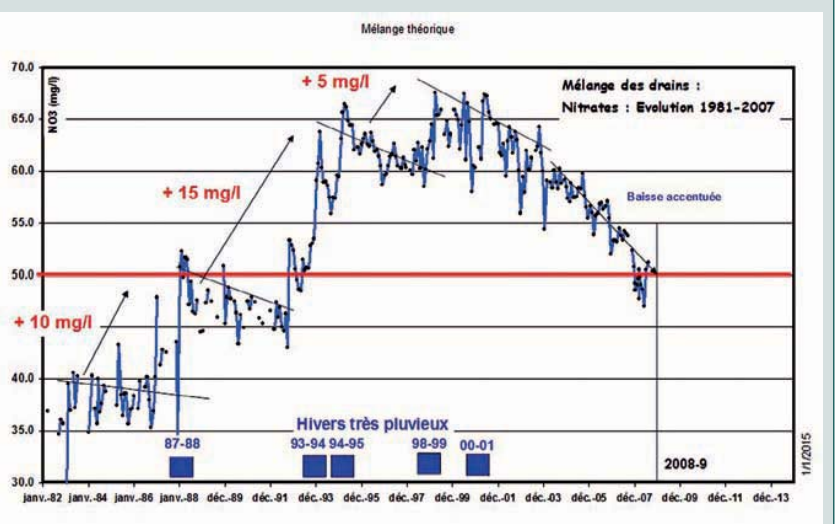


Fig. 1 : suivi de l'évolution des teneurs en nitrates de l'eau des drains de Rennes I (source SMPBR)

est optimisé via la rédaction d'un plan de gestion, intégré à l'aménagement de la « forêt des captages de la Ville de Rennes » qui comprend aussi les boisements plus anciens des rives de la retenue de Chèze-Canut. L'objectif est bien de concilier la protection de la qualité de l'eau, la production de bois et la préservation de la biodiversité.

Masevaux : incidence de la gestion de l'eau potable sur la gestion forestière communale

La forêt communale de Masevaux s'étend sur environ 1 253 ha ; elle occupe le flanc oriental des Hautes Vosges sur les deux versants de la vallée de la Doller orientée selon l'axe est-ouest. Les altitudes se situent entre 400 et 1 160 mètres. La forêt se décompose en trois séries, dont deux montagneuses situées de part et d'autre de la vallée de la Doller. La première série, dite du Rossberg, couvre 597,29 ha ; elle est très pentue, parsemée de rochers et exposée sud – sud-est, avec une fertilité moyenne des sols (environ 6 m³/ha/an d'accroissement). La deuxième série, dite du Sudel, couvre 483,19 ha ; elle est moins pentue que le Rossberg, exposée au nord et la fertilité est bonne (environ 8 m³/ha/an d'accroissement). La troisième série, dite de l'Allmend, est une série de plaine de 165,13 ha où la fertilité est moyenne (5 à 6 m³ ha/an d'accroissement).

L'importance de la forêt pour l'alimentation en eau de la ville

C'est dans la deuxième série de la forêt communale que se situe l'essentiel des captages de la ville de Masevaux ; avec les captages de la forêt de Houppach, ils représentent plus de 80 % de l'alimentation en eau potable (un autre forage se situe en plaine à proximité de la ville et s'alimente sur la nappe phréatique de la rivière Doller). Les huit captages du Sudel sont donc dans la zone forestière la plus productive et la plus riche de la forêt. Ils sont installés sur les formations volcaniques les plus récentes de l'ensemble inférieur de la série géologique de Thann-Giromagny. Ces petits aquifères sont très localisés et superficiels, donc très dépendants des conditions météorologiques et vulnérables aux pollutions superficielles ; leur domaine d'alimentation (d'infiltration) correspond à celui du bassin versant défini par la topographie.

Depuis 1983, les captages forestiers alimentent en eau potable la ville de Masevaux et le village de Lauw pour un total de consommateurs de l'ordre de 5 000 personnes, ainsi que le pôle industriel de la Zac de l'Allmend et les différentes entreprises et établissements de la ville (piscine municipale, hôpital, etc.). La ville de Masevaux gère son alimentation en eau en régie communale complète, du captage au traitement des eaux usées, sans intervention de prestataire extérieur. La volonté de la commune et de ses services techniques est d'aboutir à une eau consommable avec le minimum de traitements chimiques intermédiaires, d'où l'importance de zones de captage très préservées.

À partir de ces constatations, une concertation permanente s'est mise en place entre l'ONF, les élus et les services techniques de la ville de Masevaux. Dans un premier temps et depuis maintenant 12 ans (ce qui à l'époque était d'avant-garde) la commune a décidé de fournir gratuitement de l'huile de chaîne bio à tous les affouagistes qui interviennent dans le périmètre de protection des captages. De plus, les lots leur sont attribués à un prix réduit, pour compenser certaines contraintes d'exploitation : extraction de tous les rémanents dans les périmètres immédiats, réalisation des chantiers dans des délais plus courts. Le permis d'exploiter n'est attribué par l'agent ONF qu'au vu du bon de mise à disposition d'huile bio des services techniques. Bien entendu l'ensemble des bûcherons communaux utilisent eux aussi le même lubrifiant pour chaîne de tronçonneuse pour les interventions dans ces mêmes zones.

Adaptation de la gestion forestière

Par la suite, la gestion de la tempête de décembre 1999 dans ces zones sensibles a tenu compte des paramètres de protection des eaux. L'exploitation nécessitait une élimination des rémanents par incinération à la demande de la DDASS ainsi qu'un débardage à distance avec des câblages sur longues distances et des coûts d'exploitation très élevés. Des dossiers de subventions ont été montés, en particulier avec les services de l'agence de l'eau Rhin-Meuse : 70 % de subvention sur les 10 878,00 € d'exploitation des chablis dans les zones captages. Ces subventions étaient complémentaires de celles du conseil général (6,09 €/m³).

En 2003, la rédaction du nouvel aménagement forestier a intégré complètement cette nouvelle donne de gestion sur les 140 ha concernés, à savoir application en gestion courante des dispositions générales préconisées dans les arrêtés de déclaration d'utilité publique des périmètres de protection de captages (lesquels figurent dans les annexes de l'aménagement) et gestion spécifique autour des captages. Concrètement et pour donner quelques exemples précis :

- les places de dépôts ont été supprimées dans le périmètre immédiat de captage ;

Masevaux : étude technico-économique

• Présentation du service d'eau
Population desservie : 5 000 personnes
Volume distribué moyen : 262 000 m³/an
2 types de ressources :
- 2 forages en nappe alluviale
- 10 captages de sources en forêt
plus de 80 % du volume produit provient des captages en forêt, mais leur débit est limitant en étiages, périodes où les forages sont plus utilisés. Les précautions de gestion, sur les périmètres de protection de captage (PPC) concernent 180 ha de forêt communale (secteurs du Sudel et de Houppach).
Pour les coûts et les volumes d'eau distribuée, nous présentons des moyennes annuelles calculées sur les années de référence 2005, 2006 et 2007.

• Surcoûts de gestion forestière liés aux captages
Surcoût de gestion forestière en PPC, à la charge de la commune : 5 900 €, soit 0,027 €/m³
Surcoût d'encadrement, à la charge de l'ONF : 1 230 €, soit 0,006 €/m³
Surcoût d'équipement d'un débardeur avec de l'huile hydraulique biodégradable, à la charge de l'entrepreneur : 170 €, soit 0,001 €/m³ (coût rapporté au volume exploité en PPC de Masevaux, le coût total est de 1 400 €/an)

• Analyse des coûts opérationnels
Le coût de la prévention pour les captages forestiers
Actuellement, le coût de la prévention en forêt pour la commune se chiffre à **8 900 €.** Les dépenses concernent la gestion forestière (nettoyage des rémanents à l'amont des captages, débardage par câble des coupes de chablis, huile de chaîne biodégradable, recours plus fréquent au câblage pour l'abattage et « kits bûcherons » contre les pollutions accidentelles), dans une moindre mesure, elles visent la remise en état des chemins forestiers et l'encadrement de la fréquentation du public.

Le coût des dommages
Les précautions actuelles n'évitent pas tous les dommages liés aux exploitations forestières. Ils se chiffrent à 3 800 € (remise en état des chemins et nettoyage des installations de captage).

Différentiel de coûts entre forages et captages
Actuellement, les coûts d'exploitation des forages (0,175 €/m³), sont deux fois plus élevés que ceux des captages (0,086 €/m³). Les forages sont plus onéreux à cause des dépenses liées à l'énergie et à la maintenance (pompes, filtres). Quant aux captages, le principal poste de dépenses (hors actions de prévention en forêt) est lié à la surveillance des installations.

Généralisation du débardage par câble
Afin d'améliorer la protection des captages, la ville de Masevaux souhaite généraliser le débardage par câble dans les PPC. Cette option ferait passer les surcoûts de gestion forestière pour la commune de 5 900 € à 13 400 € : soit près de **75 €/ha**. Cette augmentation serait en partie compensée par la limitation des dommages. Les forages resteraient dans ce cas 70 % plus chers que les captages (0,103 €/m³).
Si l'intérêt de généraliser le débardage par câble aux PPC de Masevaux doit être testé grandeur nature, nous pouvons déjà dire que dans le cas où ce serait « un luxe », celui-ci resterait raisonnable.

- les travaux de voirie sont réalisés sans cylindrage vibré à proximité des captages, après vérification et autorisation des services techniques de la ville ;
- tous les rémanents d'exploitation sont extraits, dans un périmètre de 50 m autour des captages ;
- aucune nouvelle piste de débardage (ou chemin forestier) ne sera créée à moins de 100 m des captages ;
- les feuillus sont privilégiés à proximité des captages pour leur impact positif sur la qualité de l'eau ; les essences acidifiantes comme l'épicéa et le pin sylvestre seront extraites aux abords immédiats des captages.

Illustration imprévue par la gestion de crise

Le dernier événement qui résume ce parcours et l'amélioration des interventions sur ce type d'enjeu, remonte au 10 juin 2007 : ce soir-là une tornade localisée a provoqué 2 000 m³ de dégâts, essentiellement dans les périmètres rapprochés des principaux captages de la ville de Masevaux. Immédiatement une cellule de crise Commune/ONF se met en place ; sont définis les degrés de pollution des captages, quantité de bois sinistrés, types de dégâts (volis/chablis), surface concernée. À l'issue de ces premières investigations des stratégies d'exploitation et de commercialisation sont définies à savoir :

■ exploitation par câble avec remise en place des souches, pour ne pas perturber les sols et éviter l'accumulation d'eau croupie en grande quantité dans les trous de souches (éhoupage au sol, tige relevée au câble, abattage « normal ») ; cela revient à 35 €/m³, hors honoraires ONF, mais avec un gain de volume d'environ 10 % dans la patte des chablis (exploitation en pente) tandis qu'une exploitation classique au tracteur, ici trop perturbante et polluante, reviendrait hors honoraires à 28 €/m³ (18 €/m³ d'abattage/façonnage + 10 €/m³ de débuquage/débardage/redressement des souches au tracteur) ;

J. Fiquepron, IDF-INRA

FC Masevaux : débardage de la coupe de chablis au câble

■ extraction des houppiers complets, pour éviter la décomposition d'une trop grande quantité de matière organique ;

■ commercialisation des chablis résineux dans le cadre du contrat existant (environ 80 €/m³) : 80 % du volume résineux exploité sur la commune étant commercialisé par contrat, il a suffi de transférer les volumes prévus sur les parcelles sinistrées ;

■ mise en prévente des feuillus, essentiellement des hêtres (56,60 €/m³ qualité B/C 30 % de qualité D) ;

■ vente façonnée en bloc du BIL (bois d'industrie en long) issu d'une partie des houppiers (32 €/m³) ;

■ commercialisation du reste des houppiers par le biais de la filiale ONF énergie (purge et billons 24 €/tonne, branches à 1 €/tonne).

Pour conclure

Ces années ont été émaillées d'évènements qui ont perturbé l'alimentation en eau de la commune, pollution de captage par des limons lors de chantiers d'exploitation (pluie torrentielle exceptionnelle sur une coupe pourtant éloignée des captages) ou de voirie (captage non intégré dans les bases cartographiques fournies par la DDASS). Ces difficultés étaient liées à des erreurs de gestion, mais surtout à des déficits de communication. C'est dans ce domaine que nous avons amélioré notre fonctionnement (contact régulier avec les services techniques de la ville et les élus, utilisation de plans communs fournis par l'ONF, réunion de planification des travaux et des exploitations). Cette amélioration dans la qualité d'exécution de la gestion mixte eau/forêt n'a été possible que grâce à la clarté du message des élus de la commune auquel nous avons juste dû donner une réponse technique la plus adaptée possible.

Daniel HELLE
Syndicat mixte de production d'eau potable du Bassin Rennais (SMPBR)
eau.rennes@ville-rennes.fr

Jean DE MARIN DE CARRANRAIS
Responsable UT de la Doller
ONF, DT Alsace

Vincent PEREIRA
ONF, DT Franche-Comté
direction développement et animateur du réseau "Eau" de l'ONF

Encadrés de
Julien FIQUEPRON
IDF et INRA
LEF, Laboratoire d'Economie Forestière (Nancy)
julien.fiquepron@cnppf.fr

Le boisement, un bienfait pour l'eau en Bretagne

Au-delà de l'exemple de la Ville de Rennes, exposé à l'article précédent, le boisement des périmètres de protection des captages concerne l'ensemble de la Bretagne, dont les ressources d'eau potable sont particulièrement vulnérables à la pollution, notamment par les nitrates. En 1997, l'ONF et l'agence de l'eau Loire-Bretagne mettaient au point le cahier des charges de ce type d'opération, qui connaît depuis un certain succès.

La protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine est actuellement au centre des préoccupations de nombreux acteurs du territoire et tout naturellement les forestiers se sentent concernés. Cette protection, comme l'a rappelé la directive cadre sur l'eau, doit s'effectuer à deux niveaux : d'une part à celui de la ressource dans son ensemble (aire d'alimentation du captage d'eau potable) et d'autre part au droit de la zone de captage sur une étendue définie par un hydrogéologue agréé (périmètre de protection).

Suivant le contexte géographique, les mesures de prévention apparaissent sous des formes diverses : par exemple, en zone de montagne où la forêt est fortement présente sur les bassins versants, un périmètre de protection immédiat, dont l'objectif premier est de préserver l'eau potable de pollutions accidentelles, ponctuelles ou malveillantes, se manifeste le plus souvent comme une clairière, clôturée et strictement entretenue, au cœur d'un massif forestier ; la gestion durable, menée dans le respect d'engagements environnementaux, contribue alors à garantir la qualité de l'eau.

F. Aureau, ONF

Captage de Plomodiern

Dans une région comme la Bretagne, une rapide analyse des conditions naturelles permet d'apprécier la problématique particulière de la protection des captages. Sur le socle granitique armoricain, la ressource pour la production d'eau potable se trouve dans des eaux souterraines peu profondes (nappes phréatiques et nappes alluviales) et dans des eaux superficielles (cours d'eau, lacs et retenues). De ce fait, les zones d'alimentation sont nombreuses et de taille relativement réduite ; en outre, compte tenu de l'importance et de la dispersion des activités agricoles dans le secteur, elles présentent une vulnérabilité certaine aux pollutions diffuses.

Contribuer par le boisement et la gestion forestière à la gestion durable de l'eau

Ainsi, depuis une quinzaine d'année dans les départements de l'Ouest, un certain nombre d'initiatives volontaristes et innovantes ont été prises, qui vont dans le sens d'une efficacité accrue des périmètres de protec-

tion. Retenons parmi ces initiatives le rachat, par le maître d'ouvrage du captage, de terrains situés en amont (périmètre de protection rapproché) pour y mener une activité rentable non polluante vis à vis de la ressource en eau : le boisement. De fait, Il s'agit de constituer des zones de dépollution naturelle qui pourront contribuer, par leur rôle de filtre, à réduire le taux de nitrate dans la ressource.

La création d'une forêt réunit de nombreux avantages, à commencer par une occupation durable et maîtrisée des terres (pas de produits phytosanitaires ni engrais). L'érosion réduite des sols forestiers permet de diminuer la turbidité des eaux captées et leur teneur élevée en humus permet une meilleure filtration de l'eau : les polluants potentiels (phytocides, nitrates) sont soit retenus dans le sol ou dans la zone non-saturée, soit dégradés avant d'atteindre la zone saturée. Le coût d'exploitation s'en trouve donc réduit sur le long terme. Ajoutons que le boisement peut être source d'amélioration des qualités paysagères du site tout en produisant à terme un éco-matériau : le bois (avec contribution à la séquestration du carbone).

L'idée directrice est ainsi d'associer dès la conception, au niveau local, la gestion durable de la forêt et la gestion durable de l'eau. À titre d'illustration de l'effort engagé sous l'impulsion de l'Office national des forêts, on recense entre 1996 et 2006, dans le département du Finistère, la réalisation de 20 chantiers de boisements communaux (Elliant, Drennec, Plabennec, Plomodiern, Saint Urbain, Landrevarzec, etc.) ayant comme vocation principale la production de « l'eau la plus pure possible », pour une surface totale 315 hectares.

F. Aureau, ONF

Boisement du captage de Plomodiern

Créer une forêt pour la reconquête de la qualité de l'eau : une action concertée avec l'agence de l'eau

Dès 1997, l'agence de l'eau Loire–Bretagne et l'ONF se sont rapprochés pour développer une réflexion commune en vue de réaliser une « Étude pour le boisement des terres situées en périmètre de protection de captages d'eau potable ». Ce travail a permis de déterminer, en fonction de conditions locales, les prescriptions et recommandations à observer pour ce type d'opération. Ainsi, il a pu être précisé sous forme de cahier des charges :

- la définition de zones écologiques homogènes déterminant les choix d'essences possibles ;
- les itinéraires techniques adaptés à la protection de l'eau en fonction des essences et des densités de plantations retenues (estimation des coûts pour chaque norme) ;
- les principes d'une sylviculture à long terme pour la gestion durable des boisements sans nuisance pour la qualité de l'eau (peuplements mélangés avec un traitement irrégulier).

Au fil des projets, les forestiers ont pu affiner les techniques et développer leur savoir-faire. Aujourd'hui, un regard vers le territoire communal de Plomodiern, dominant la baie de Douarnenez, permet de bien saisir à la fois l'esprit de cette démarche originale et les modalités de réalisation.

L'exemple de Plomodiern

L'opération, réalisée en 2004, a été globale : il s'agissait pour la collectivité - maître d'ouvrage - de réaliser simultanément la mise en conformité, imposée par la loi avant 2010, des anciens périmètres de protection immédiate de captage et d'amplifier l'action par le boisement sur 15,46 ha de terrains qu'elle avait rachetés préalablement. Ainsi la lutte contre les pollutions diffuses dans la zone d'alimentation du captage a été couplée à la protection immédiate contre les pollutions accidentelles. La maîtrise d'œuvre de l'ensemble du projet a été confiée à L'ONF.

Avant de s'engager dans ce type de boisement, il convenait de bien identifier les contraintes réglementaires (DUP du captage), hydrogéologiques (vulné-

rabilité de la nappe, pollution existantes ou potentielles), physiques (accessibilité, relief) et écologiques (sol, végétation). L'option de maintenir les haies bocagères existantes a naturellement été privilégiée : il s'agissait de conserver le potentiel « boisé » existant…en évitant au passage de brutaliser le sol. Une attention particulière a alors pu être portée sur le choix des essences : le chêne sessile a été retenu comme essence « objectif » structurante, il est en mélange avec des feuillus sociaux (châtaignier, hêtre, noisetier, sureau charme à la densité de 400 plants/ha) qui améliorent la stabilité du peuplement et facilitent l'obtention d'une future régénération naturelle. La densité de plantation choisie (1 200 plants/ha) a permis l'installation spontanée de strates herbacée et arbustive, favorables à la fixation des nitrates.

Préalablement à la mise en place des plants sur des parcelles anciennement pâturées, un travail de sous-solage a été effectué suivant les courbes de niveau ; il s'agissait de casser la semelle profonde du sol tout en évitant le ruissellement. Puis, conscient de la rigoureuse proscription de l'utilisation de phytocides, pesticides, engrais ou amendements, le maître d'œuvre a fait le choix de placer, sur un quart des plants, un paillage individuel et une protection gibier.

Résultats et conclusion

Dans plusieurs communes qui possèdent des périmètres opérationnels boisés depuis une quinzaine d'années (Elliant, Saint Urbain) des résultats positifs apparaissent en matière de nitrates où la teneur est aujourd'hui passée en dessous de la concentration maximum admissible de 50 mg/l. Par ailleurs, les peuplements forestiers ont atteint l'âge de la première éclaircie, elle devrait localement être exploitée en bois-bûche, apportant ainsi une énergie de proximité fort appréciée.

En Bretagne, comme ailleurs, la qualité de l'eau potable dépend donc directement des efforts de protection déployés sur le terrain pour préserver cette ressource naturelle. L'intérêt pour l'économie et la santé de disposer d'aquifères de qualité l'emporte déjà, dans bien des cas, sur les restrictions d'utilisation des sols (éloignement de l'activité agricole du point de captage) : une maîtrise foncière publique associée à une forêt façonnée pour préserver la ressource en eau est assurément une piste d'avenir. Cette pratique est, le plus souvent, encore limitée au boisement des périmètres de protection ; il est tout à fait concevable de l'envisager progressivement à l'échelle de l'aire d'alimentation du captage.

François AUREAU
Chef de produit Eau
ONF, direction du développement

Bibliographie

Études ONF/agences de l'eau

Agence de l'eau Loire-Bretagne, ONF, 1997. Etude et cahier des charges pour le boisement des terres situées en périmètre de protection de captages d'eau potable.

Agence de l'eau Adour-Garonne, ONF, 2003. « Eau potable : Boiser les périmètres de protection rapprochée des captages »

Autres références

POINTEREAU P., 2001. « La forêt et la protection des eaux : l'expérience de la ville de Munich » ; Forêts de France n° 443, pp. 15-18

VERNOUX J.F., WUILLEUMIER A., DÖRFLIGER N., 2007. « Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis à vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique ». Rapport BRGM, 75 p.

Gestion forestière et eau potable
Quelques exemples à travers le monde

La préoccupation des grandes villes du monde pour la qualité de leurs ressources d'eau potable n'est pas nouvelle, non plus que l'intérêt que certaines d'entre elles portent à la forêt pour garantir cette qualité. Voici un aperçu de la diversité des politiques mises en œuvre, dont le projet Interreg « Alpeau » cherche à tirer des enseignements généralisables.

A travers le monde, plusieurs villes se sont dotées d'une gestion forestière particulière pour protéger leur ressource en eau potable avec deux grandes périodes :

- fin 19e et début du 20e siècle, certains sites ont eu une politique d'acquisition foncière des terrains situés autour de leurs captages et les ont majoritairement reboisés ;
- depuis les années 70, les études scientifiques décrivant les différents rôles de protection des eaux souterraines par la forêt se sont multipliées. Ces résultats ont relancé l'intérêt porté par ces villes à leur gestion forestière et incité d'autres villes à protéger leurs bassins versants par une gestion forestière adaptée avec des modes d'actions variés.

Une politique géographiquement très partagée

En Europe, la ville de Vienne (Autriche) peut être qualifiée de *leader* par la gestion stricte qu'elle a mise en place dans ses forêts et la recherche scientifique qu'elle a menée dans ce domaine pour définir des codes de bonnes pratiques et des objectifs de gestion adaptés à chaque station (voir encadré n° 1 p. 48). En Allemagne, Munich a développé des contrats avec les agriculteurs et adopté une gestion particulière sur ses forêts, ainsi qu'Hanovre qui remplace ses plantations résineuses par des peuplements feuillus. En Suisse, une petite ville, Winterthur a mis en place elle aussi une gestion adaptée en restaurant ses forêts alluviales, tandis que Bâle pompe l'eau du Rhin pour la réinfiltrer dans une forêt feuillue servant de filtre avant de la «repomper» purifiée à proximité dans la nappe. En France, Saint Étienne a été pionnière et possède désormais une gestion forestière optimisée (voir encadré n° 2 p. 49). À Vittel, Nestlé possède une forêt que l'ONF gère spécifiquement et a acquis des terrains agricoles pour imposer ensuite des contraintes particulières aux exploitants. Enfin, une petite commune alsacienne, Masevaux, protège à son échelle sa ressource en eau tout en exploitant sa forêt, par une gestion extensive et des exploitations par câble quand cela est nécessaire.

Aux États Unis, plusieurs grandes agglomérations comme Boston (voir encadré n° 3 p. 50), New York, Baltimore, San Francisco et Seattle ont lancé des programmes massifs pour investir dans la protection de leurs bassins versants, par des mesures agricoles et forestières. Au-delà des mesures forestières appliquées, ces exemples américains sont particulièrement enrichissants par la variété de contrats que les collectivités passent avec les propriétaires pour protéger la ressource en eau. Il est également important de signaler que le choix d'opter pour la protection des bassins versants plutôt que la construction de grandes centrales de filtration et purification de l'eau relève de considérations strictement économiques.

Au Japon, Tokyo a adopté une gestion particulière pour protéger son bassin versant exclusivement forestier. Et d'autres exemples existent encore, tels que Melbourne ou Manille.

Un consensus technique sur la gestion forestière

Un large consensus ressort de ces différents sites concernant les mesures de gestion forestière. L'objectif principal est la recherche de peuplements stables, pérennes, résilients et adaptés en station. Quasiment toutes ces villes ont opté pour la futaie irrégulière à jardinée, garantissant une couverture forestière continue. La priorité est donnée au mélange d'essences et aux feuillus. Excepté le cas de

1 - Quelques données sur le site de Vienne (Autriche)

• Principaux chiffres
- Captage de 2 sources, provenant de 3 massifs karstiques
- 400 000 m³/jour approvisionnant 1,78 million d'habitants
- Zone de protection de 60 000 ha
- 66 % de couverture forestière dont la majorité, 33 000 ha appartiennent à Vienne
- L'eau est simplement chlorée préventivement avant distribution.

L'eau coûte 1,20 €/m³ au consommateur.

• Recherche scientifique
- Conception du modèle de l'hydrotope avec l'Université de Bodenkultur de Vienne, et application à toute la forêt de protection.
- **Modèle de l'hydrotope** : surface où les conditions hydrologiques sont relativement homogènes. Il prend en compte des données phytoécologiques, pédologiques et topographiques, avec le but d'optimiser les fonctions hydrologiques de la station considérée.

• Gestion forestière dans la forêt appartenant à Vienne
- Pour l'instant, majorité d'anciennes plantations d'épicéas.
- Objectifs : régénérer ces plantations par les essences préconisées par le modèle de l'hydrotope, avoir une couverture forestière continue (futaie irrégulière à jardinée), obtenir des peuplements stables et résilients
- Pour cela : taux de prélèvement limité, exploitation par câble quasi systématique, huiles bio, pas de pesticide — mais importants problèmes de pression de gibier

• Modalité d'action
Acquisition foncière réalisée essentiellement depuis 1870, encore ponctuellement d'actualité

• Coût
La forêt est déficitaire (n'y sont prélevés que 2/3 des bois qui pourraient l'être), mais 6 % du prix de l'eau est consacré à la compensation des coûts de gestion.

C. Deck, FIF/ONF

Vienne : Régénération de hêtre sous une ancienne plantation d'épicéas

Tokyo, toutes les villes continuent à exploiter le bois de leurs forêts, mais en prenant des précautions particulières, plus ou moins exigeantes selon les sites. Le respect des sols étant très important, les débardages se font au câble, ou au tracteur en limitant l'impact sur les chemins et en exploitant quand les sols sont le moins sensibles. Les sources de pollution potentielles sont également évitées au maximum, avec l'absence de traitement chimique ou pesticide et l'utilisation d'huiles biodégradables. Enfin, ces villes développent fortement l'information et l'éducation du public sur l'origine de l'eau qu'il boit et sur le rôle protecteur de la forêt. Ces forêts sont ainsi gérées de façon multifonctionnelle, assurant protection, production et bien souvent aussi accueil du public.

La diversité des modalités de mise en œuvre

Les modalités de mise en œuvre de cette gestion diffèrent en fonction des sites, mais de grandes tendances sont perceptibles. En Europe, l'acquisition foncière prévaut et date le plus souvent d'achats et de reboisements du 19e siècle. Cependant, certaines villes comme Munich ont instauré un système de contractualisation avec des agriculteurs sur leur bassin versant pour leur faire respecter certaines contraintes d'exploitation.

En Amérique, la problématique est plus récente et les villes ne disposent pas de grandes forêts communales couvrant l'essentiel des bassins d'alimentation, même si elles ont pu acquérir les terrains à proximité des ouvrages. Plusieurs types de contrats avec les propriétaires agricoles et forestiers ont ainsi vu le jour, pour garantir la qualité des eaux.

2 - Quelques données sur le site de Saint Étienne (Loire, France)

• Principaux chiffres

- Captages par drains à faible profondeur (1,5 à 2,5 m) actuellement 30 km de drains connectés sur un champ captant de 1 200 ha dont 600 ha en FC
- 29 000 m³/jour approvisionnant potentiellement 60 000 personnes
- 100 % de couverture forestière sur le bassin versant du champ captant
- L'eau est préventivement chlorée et traitée aux UV

L'eau est malheureusement mélangée à une autre eau de qualité moindre d'origine collinaire. Ceci rend le prix de l'eau non significatif.

• Gestion forestière en FC

- Actuellement : sapinière traitée en futaie irrégulière à jardinée.
- Objectif : favoriser le hêtre (on se trouve normalement dans la hêtraie-sapinière)
- Pas de réelle contrainte pour l'exploitation du bois (tracteur) autre que l'interdiction de passage au-dessus des drains.
- Défrichement à l'aplomb des drains (emprise de 3 m de part et d'autre pour les résineux, 5 m pour les feuillus)
- Huiles bio, pas de pesticides
- Présence très régulière d'un agent forestier sur le massif (il habite juste à côté)

NB : En forêt privée, la gestion est de fait similaire.

• Modalités d'action

- Acquisition foncière passée (la majorité des terrains ont été acquis vers la fin du 19e siècle et le début du 20e) et présente (acquisitions d'environ 7 ha/an)
- Convention de 22 000 €, historiquement entre la ville de St Étienne et l'ONF, puis entre la Stéphanoise qui exploite les eaux et l'ONF (surveillance technique, travaux légers et entretien des périmètres)

• Coût

Les surcoûts de gestion liés à l'eau peuvent être estimés par :

- le prix de la convention,
- la surface forestière perdue au-dessus des drains (environ 22 ha),
- les surcoûts liés aux contraintes d'exploitation.

St Étienne : défrichement au-dessus d'un drain, avec borne bleue indicatrice

G. Sabot, ONF

Mutualiser les expériences et promouvoir les bonnes pratiques : un objectif urgent

Si les sites ayant mis en place une gestion forestière particulière pour protéger leur ressource en eau potable sont assez nombreux, les échanges et retours d'expérience sont quasi inexistants. Ceci est d'autant plus regrettable que de nombreuses autres agglomérations cherchent aujourd'hui à valoriser l'eau souterraine forestière, peu chère et de qualité, et à gérer leurs forêts de manière optimale. Communiquer sur ces exemples, définir des codes de bonnes pratiques et développer des outils de

3 - Quelques données sur le site de Boston (États Unis)

• Principaux chiffres

- Captages de sources et rivières, «stockés» dans de grands réservoirs à l'air libre
- 600 000 m^3/jour approvisionnant 2,2 millions d'habitants
- Zone de protection de 48 000 ha (=surface des réservoirs et cours d'eau encadrés d'une zone tampon de 120 m de chaque côté)
- Couverture forestière de 87 %
- 57 % de la zone de protection appartiennent au service des eaux de la ville et 18 % sont protégés par d'autres agences gouvernementales
- L'eau est uniquement chlorée (non filtrée).

L'eau coûte environ 1 $/$m^3$ au consommateur (assainissement compris).

• Gestion forestière dans la zone appartenant à Boston (22 000 ha)

- La forêt était jusqu'ici gérée en futaie régulière.
- Nouveau plan de gestion (2007) : irrégulariser les peuplements en régénérant 1 % de la surface chaque année
- Régénération par petites ouvertures
- But : obtenir une forêt «naturelle», vigoureuse, résiliente, diversifiée en essences (principalement feuillues).
- Délimitation de la forêt entre 3 zones de sensibilité différente (en fonction de la distance aux rivières et réservoirs), conduisant à des contraintes de gestion différentes (limitation des taux de prélèvements, diamètres des ouvertures, techniques d'exploitation)
- Peu ou pas de pesticides
- Lutte contre les plantes invasives (*Acer platanoides, Berberis thunbergii, Polygonum cuspidatum, Celastrus orbiculata, Lythrum salicaria*…), car elles entraînent une modification des écosystèmes et constituent une menace pour la résilience des forêts.

• Modalités d'action

- Acquisition foncière passée et présente
- Réquisition de certains terrains : outil juridique permettant d'acquérir un terrain si un propriétaire en fait un usage incompatible avec la protection de la ressource en eau (compensations financières pour le propriétaire)
- «Conservation Restriction» : achat de droits de développement à des propriétaires privés (achat de certains usages du terrain — > restrictions de développement, telles que l'interdiction de construction de bâtiments, l'exploitation du sol, le stockage de matériaux dangereux…)
- «Payment In-Lieu of Taxes» (PILOT) : part de la taxe d'utilisation de l'eau reversée à titre de compensation financière aux collectivités qui possèdent des terrains sur le bassin versant
- Assistance technique aux collectivités et propriétaires privés (rédaction voire financement des plans de gestion forestiers)

• Coût

Annuellement : 26 millions de dollars de dépenses (= 14 millions de budget pour le service des eaux + 5 millions pour les financements PILOT + 7 millions pour l'acquisition foncière), contre 500 000 à 1 million de dollars de revenus forestiers. Ces dépenses sont financées par les consommateurs (cela représente un très faible pourcentage de leur facture d'eau).

contractualisation sont devenus des enjeux urgents afin de pérenniser nos ressources en eau potable ; ce sont aussi les objectifs du projet transfrontalier Franco-suisse « Alpeau ». Ce projet Interreg IVA associe, pour la part française, des intercommunalités de l'eau (Chambéry Métropole, SM3A sur l'Arve, SIEM et CCCL sur les Moises), le conseil général de Haute-Savoie, l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse et l'ONF Rhône-Alpes, porteur du projet ; il associe côté suisse les cantons de Vaud, Neuchâtel et Fribourg, les villes de Lausanne et Neuchâtel, l'université de Neuchâtel et l'OFEV (Office Fédéral de l'EnVironnement).

Catherine DECK
stagiaire FIF
dans le cadre du projet Alpeau

avec **Claude BARTHELON**
ONF, DT Rhône-Alpes

Alsace : inventaire de l'eau sous tous ses aspects en milieu forestier

La gestion forestière en faveur de l'eau ne vise pas seulement à assurer la conservation d'une ressource en termes quantitatifs et qualitatifs. Plus globalement, elle se préoccupe des hydrosystèmes et des conséquences de leurs éventuels dysfonctionnements. En Alsace, un projet Interreg permet de mettre au point un dispositif de connaissance et diagnostic adapté à l'exigence d'une action « multifonctionnelle » cohérente.

Entre 2006 et 2008, l'ONF Alsace a effectué un inventaire des milieux aquatiques en forêts de montagne (versant alsacien des Vosges et du Jura). Cette action a été menée dans le cadre du projet Interreg IIIA « Optimisation du rôle de la forêt dans la protection des cours d'eau et zones humides », qui associe les gestionnaires forestiers français et suisses ainsi que des scientifiques allemands. Les travaux sont développés sur les territoires forestiers des moyennes montagnes du bassin rhénan moyen (Vosges, Forêt Noire et Jura suisse), dont le contexte environnemental et les enjeux socio-économiques sont très comparables. Parmi les 8 actions développées dans ce programme, la description des milieux aquatiques est une action phare qui s'inscrit dans une démarche de diagnostic, étape préalable à la mise en œuvre des objectifs fixés par la directive [européenne] cadre sur l'eau (DCE, 23 octobre 2000).

Pourquoi un inventaire ?

Pour établir un diagnostic

Pour mieux gérer il faut connaître. L'inventaire de terrain est incontournable mais exige un investissement important : les relevés, effectués dans chaque triage, ont mobilisé près de 200 agents patrimoniaux pour un total de 996 équivalent homme jour. Un cadrage préalable est donc nécessaire afin d'assurer une forte cohérence avec les besoins du gestionnaire : quels sont les objets recherchés, selon quelle méthode, à quelle échelle et pour quelles utilisations ? Quel rendu ? Quel mode de réactualisation ? Au total, cet inventaire a permis de décrire plus de 1 500 km de cours d'eau et près de 1 100 zones humides sur 166 000 ha de forêt publique.

Pour créer une base de données hydrographique adaptée aux besoins d'un gestionnaire

L'intégration des données dans les supports SIG permet d'enrichir la plate-forme de données environnementales de la DT ONF Alsace. Le simple porté à connaissance, savoir où se situent les zones humides et les cours d'eau, est déjà très utile pour le gestionnaire. Au-delà, le SIG doit permettre d'étoffer le volet hydrographique dans les documents de gestion (carte du réseau hydrographique et des biotopes humides) et doit également être à disposition des forestiers pour la gestion courante. Deux utilisations se distinguent : le SIG comme outil d'analyse et l'outil cartographique pour la consultation (grâce notamment au déploiement de Canopée®).

Pour identifier les priorités de gestion

L'analyse ciblée des données permet d'identifier les secteurs à enjeux, résultats du croisement entre sensibilité et degré de dégradation des milieux. Le gestionnaire hiérarchise ainsi les interventions en fonction des priorités identifiées. Ces priorités se déclinent localement en accord avec les orientations du SDAGE et des

SDAGE en faveur des inventaires des zones humides

Le SDAGE Rhin - Meuse indique clairement la nécessité « d'appuyer la gestion des milieux aquatiques sur des connaissances solides, en particulier en ce qui concerne leurs fonctionnalités ». Parmi les actions qui en découlent, le soutien aux inventaires des zones humides dites ordinaires est un point essentiel. Ces multiples zones humides ponctuelles forment des réseaux dont les principales fonctions écologiques assurent des services essentiels. En forêt ces services ont pu être érodés par une réduction de la fonctionnalité de ces milieux. L'étude du réseau hydrographique forestier permet d'appréhender les dysfonctionnements de ces hydrosystèmes.

SAGE (schéma directeur et schémas d'aménagement et gestion des eaux ; voir encadré p 53), ou encore des documents d'objectifs Natura 2000.

L'acquisition des données ne constitue pas une garantie de prise en compte des milieux aquatiques. Un travail de sensibilisation des propriétaires, gestionnaires, et exploitants doit appuyer la démarche.

La description du réseau hydrographique : méthode et état des lieux

Recherche des singularités structurales

La méthode employée est dérivée du protocole allemand FVA-ESTRUKA de description du milieu physique des ruisseaux forestiers. Par rapport aux méthodes standards (tableau 1) elle se base sur une approche pragmatique de description des éléments artificiels qui jalonnent le cours d'eau (passage busé, seuil, enrochement…), des structures naturelles qui modifient le profil (embâcles, chutes…), ainsi que des peuplements forestiers rivulaires. Initialement prévu pour des levés de terrain avec ordinateur de poche (PDA), ce protocole a été adapté à une description « papier » sur le terrain. Chaque cours d'eau est gradué de la source à la confluence, au pas de 50 m, sur fond orthophotoplan au 1/5000e. Sur un tableau *ad hoc*, l'agent peut ainsi référencer chaque objet décrit par son positionnement kilométrique (PK) sur le ruisseau. Cette méthode permet, une fois les données saisies, un positionnement automatique des objets sous SIG. Cela évite une longue phase de digitalisation et pallie la difficulté de s'équiper en matériel. Le rythme de progression est estimé à 3 km/jour.

La desserte forestière : principale contrainte sur le réseau hydrographique en forêt

Le profil en long des cours d'eau forestiers est rarement modifié. La principale contrainte vient de la coexistence entre les hydrosystèmes et le réseau de desserte. Sur l'ensemble du réseau prospecté, 22 à 24 % du linéaire est bordé (dans une bande de 25 m) par une voie de communication. Retenons en particulier que près de 11 % du linéaire est directement contraint par une infrastructure linéaire située en contact avec les berges (route, piste forestière et remblais) et que 1,5 % du linéaire présente des ouvrages de consolidation de berges (remblais, enrochement de soutènement de pistes). On note par conséquent une réduction des biotopes humides associés et une contraction du lit majeur. Sur les hydrosystèmes à régime fluvial cet impact est notoire ; pour les hydrosystèmes à régime torrentiel l'absence de lit majeur réduit la perturbation. De façon secondaire, la présence d'une voie à proximité d'un cours d'eau peut aboutir à des dégâts indirects, dépôts de bois sur berge, circulation d'engins dans les ruisseaux, dégradation des routes lors d'épisodes torrentiels. En montagne les franchissements sauvages, directement dans le lit des ruisseaux, sont fréquents : près de 300 points de passages ont été répertoriés (1 franchissement/5 km de cours d'eau).

Par ailleurs, il a été observé en moyenne un ouvrage artificiel (passage busé, ponceau…) tous les

Méthode	Principe	Mode opératoire	Limites
LAWA 1993 Länderarbeitsgemeinschaft Wasser — Allemagne	- Cartographie des ruisseaux et rivières (largeur lit mineur < 10 m) - Recensement de 25 éléments structurels par compartiment - Note de 1 (pseudo-naturel) à 7 (totalement artificiel) - Évaluation en référence à l'État Naturel Potentiel Actuel du Cours d'Eau = ENPACE	- Découpage en tronçons de 50 ou 100 m de long - Construction de l'état de référence (ENPACE) - Description 1 km/jour - Chaque paramètre est affecté d'une note, la moyenne donne la note globale	- Pas recommandé pour les ruisseaux de tête de bassin versant. - N'intègre pas les paramètres liés à la gestion forestière - Compétences fines en matière d'hydrosystème
SEQ Physique (Système d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau) 1992 Agence de l'Eau Rhin-Meuse — France	- Appliqué aux cours d'eau du bassin Rhin-Meuse - Paramètres référencés par compartiments - Une note par paramètre - Évaluation par comparaison à un état de référence	- Découpage du cours d'eau en tronçons homogènes (200 m à 5 km) - Description 3-4 km/jour - Logiciel Qualphy qui permet une analyse automatique et directe	- Pas recommandé pour les ruisseaux de tête de bassin versant - N'intègre pas les paramètres liés à la gestion forestière - Compétences fines en matière d'hydrosystème
FVA-ESTRUKA – 2004 FVA Baden-Württemberg Allemagne	- Cartographie des singularités structurales des cours d'eau forestiers	- Pas de travail préalable à la description de terrain - 3 km/jour - Saisie sur PDA ou fiche terrain	- Pas de système d'évaluation standardisé pour la comparaison objective des hydrosystèmes entre eux

Tab. 1 : comparatif de 3 méthodes de description du milieu physique des cours d'eau

600 m de cours d'eau contre un pour 3 km dans les hydrosystèmes de plaine ; 35 % des ouvrages répertoriés sont estimés infranchissables pour la faune piscicole. Ce chiffre indique un degré de déconnexion élevé. En application de la DCE et de la loi sur l'eau les travaux et installations doivent respecter la continuité écologique. L'inventaire de ces ouvrages permettra d'identifier les sites les plus pertinents pour mener des opérations de restauration.

Des ruisseaux, des aulnes… et des épicéas

Les ripisylves et formations apparentées sont présentes sur 15 % du linéaire de façon discontinue. Il s'agit principalement d'aulnaies et d'aulnaies-frênaies, formant des habitats biologiques à forte valeur patrimoniale. L'alimentation en eau résulte de battements de nappe, de mécanismes de submersion ou encore des ruissellements latéraux de bas de versant.

À l'inverse, 12 % du linéaire décrit traverse des peuplements résineux monospécifiques (épicéas, douglas) préjudiciables à la qualité des hydrosystèmes : impact sur la qualité de l'eau, dégradation des habitats. Globalement, la situation relevée pour les peuplements rivulaires est plutôt satisfaisante, sauf à signaler une priorité pour ces secteurs enrésinés : y augmenter la part des feuillus.

Les zones humides

Description fonctionnelle

La méthode utilisée s'est fortement inspirée du protocole national « Tronc commun » mis en place par l'IFEN. La trame a été adaptée au contexte forestier. Il s'agit d'une approche factuelle, basée sur une description fonctionnelle. Cette méthode répond à 4 questions clés pour le gestionnaire :

1. Où sont localisés les biotopes humides en forêt ?

J. Prinet, ONF

Ruisseau et piste dans le Jura alsacien

Les Vosges alsaciennes, un véritable château d'eau

Dans la zone d'étude, le réseau hydrographique est très dense, il s'étend sur 3 170 km dont plus de 40 % situés en forêt publique. Plus de 54 % de ce linéaire est constitué d'un chevelu fin (ruisseau sans affluents). Sur cette zone, près de 2 900 ha ont déjà été inventoriés entre 1995 et 2000 par les conseils généraux alsaciens au titre des « zones humides remarquables », allégeant d'autant notre étude. Cependant ces inventaires n'intégraient pas les zones humides « ordinaires » de faible dimension ou moindre richesse biologique.
Malgré des contextes hydrographiques très variés (6 régions naturelles couvertes par cette étude), les perturbations liées à la gestion forestière s'observent de façon identique quel que soit le contexte géologique. Par contre, le degré de résilience de chaque hydrosystème dépend de sa propre dynamique et donc du contexte géomorphologique dans lequel il se situe.

J. Prinet, ONF

ouvrage adapté à la continuité écologique FD Haslach

2. Quels types et quelles structures de zones humides ?
3. Quels modes de fonctionnement (alimentation en eau, contact avec le réseau hydrographique…) ?
4. Quelles sont les perturbations identifiables ? Quels liens avec la gestion forestière ?

Ce travail se différencie d'un inventaire d'habitats biologiques. La détermination du type de zone humide s'appuie sur une typologie simplifiée regroupant 16 types de biotopes humides compilés sur la base d'un recensement de 50 formations végétales humides potentiellement présentes sur la zone d'étude.

Les milieux humides occupent 2 % du territoire forestier

Bien que non exhaustif, cet inventaire a permis d'ajouter plus de 700 ha de zones humides forestières aux 2 900 ha déjà recensés comme zones humides remarquables (voir encadré « Vosges alsaciennes… ») et qui bénéficient de statuts de protection (et d'une gestion) spécifiques. Ainsi, sur les 166 000 ha de forêt prospectée, environ 3 600 ha sont occupés par des zones humides. Ce travail doit permettre d'intégrer progressivement les quelque 20 % de biotopes « ordinaires » dans un cadre de gestion différencié à travers une meilleure prise en compte dans les aménagements.

Les aulnaies et aulnaies frênaies sont les zones humides les plus représentées. Elles occupent les espaces rivulaires (fonds de vallons et dépressions humides en contact avec les cours d'eau), les versants et bas de versant alimentés par des suintements latéraux. Un nombre important de formations humides fontinales (« sources et suintements ») a été relevé. Ces données ont permis d'identifier les interactions fonctionnelles entre le réseau hydrographique de surface et les zones humides. Le réseau de zones humides est dans ce cas étroitement lié à l'architecture et à la dynamique du réseau hydrographique.

Les sources de perturbations observées

Les futaies résineuses (épicéas, douglas…) qui ont été installées dans la zone humide ou en bordure sont les « perturbations » les plus préjudiciables, comparées par exemple aux dégâts d'exploitation ou dépôt de rémanents. Elles sont relevées dans moins de 10 % des cas, le plus souvent sur des zones humides de fond de vallon (d'anciennes prairies humides ou des aulnaies). Ces plantations ont généralement été complétées par un réseau de drainage. L'ensemble a pour conséquence de modifier en profondeur le fonctionnement de la zone humide et le cortège végétal associé.

Dans ces contextes de forte dégradation, les interventions correctives, selon l'enjeu, visent à restaurer la fonctionnalité des milieux, en réduisant la pression de l'enrésinement via des mesures sylvicoles adaptées et/ou des travaux de génie écologique. À titre d'exemple, nous avons réalisé en forêt domaniale du Hohwald l'exploitation totale, avec enlèvement des rémanents, d'épicéas de Sitka plantés 30 à 40 ans plus tôt sur une prairie humide de fond de vallon de 0,45 ha (dépense = 10 735 €, recette = 16 630 €) ; 12 seuils rustiques ont en outre été façonnés avec les produits de la coupe (temps de travail : 16 heures d'ouvriers forestiers) pour fermer des fossés de drainage afin de restaurer le caractère hydromorphe du site.

D'autres perturbations plus diffuses ont été répertoriées. En particulier la présence de postes d'agrainage pour le sanglier dans la zone humide même (23 % des milieux répertoriés présentent une trace liée à l'activité cynégétique). Ces pratiques dégradent fortement le milieu.

En bref, et pour la suite…

Les principales difficultés rencontrées pour cet inventaire :
- mobilisation d'un nombre important d'opérateurs ;
- hétérogénéité des opérateurs qui impose un protocole « verrouillé » et des tests de terrain pour éviter les variations d'interprétations ;
- saisie des données très consommatrice en temps.

Le recueil des données n'a pu se faire qu'avec la contribution active des agents patrimoniaux et grâce à leur esprit d'initiative, en particulier pour la recherche et la description des zones humides.

Pour la suite, un travail important reste à faire pour rendre les données consultables et utilisables. Cette étape confirmera ou non la pertinence d'un travail à cette échelle. Il conviendra également de définir les modalités pratiques d'actualisation des données, de compléments d'inventaire (en particulier pour les zones humides ordinaires), et d'assurer une bonne compatibilité avec les autres bases de données environnementales utilisées à l'échelle territoriale ou nationale. Malgré la complexité de montage et de pilotage de ce type de projet, il s'agit d'une réelle opportunité pour un gestionnaire de se doter d'outils et d'expériences sérieuses en matière de gestion des milieux aquatiques forestiers. Elle a notamment permis de sensibiliser les gestionnaires à la loi sur l'eau et sur les milieux aquatiques et répond ainsi aux engagements de la politique environnementale de l'ONF.

Julien PRINET
Chef de projets et expert eau
ONF, DT Alsace

Bibliographie

Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 1996. Outil d'évaluation de la qualité du milieu physique des cours d'eau - Synthèse. 57 p + annexes et cartes.

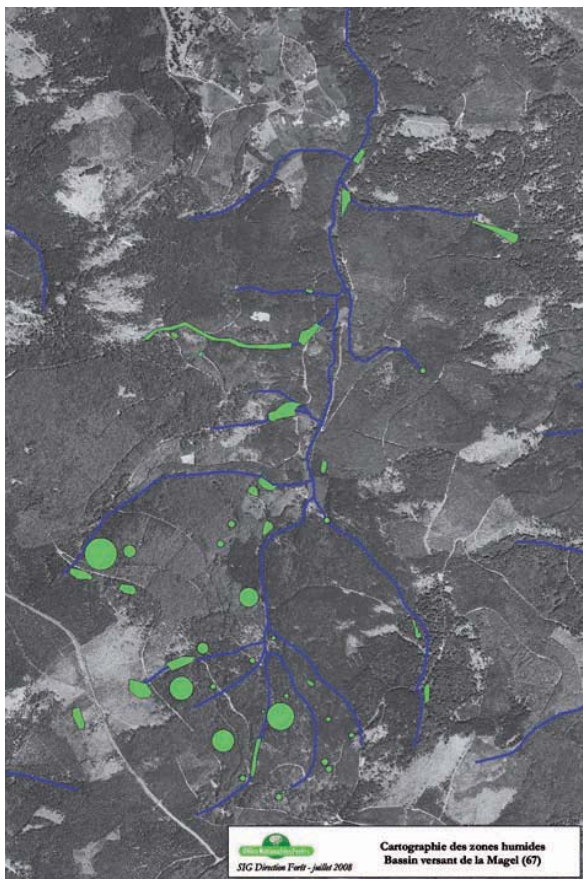
Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2008. SDAGE « Rhin » et « Meuse et Sambre ». Chapitre 3 : Orientations fondamentales et dispositions. Projet soumis à la consultation du public, avril 2008. (http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/directive/sdage_nx.php)

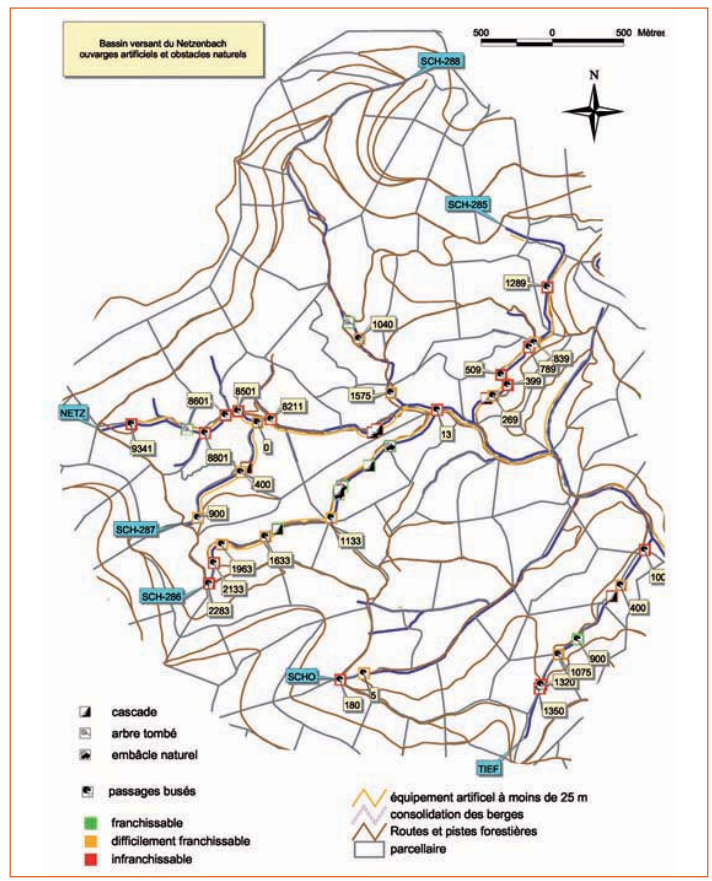
DION J. 2005. Comparaison de méthodes d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau en forêt. Nancy : Formation des Ingénieurs Forestiers. Mémoire de fin d'étude, 105 p + cartes et annexes.

Voir aussi le « Manuel Forêt & Eau » produit dans le cadre de ce projet Interreg IIIA et consultable en ligne sur : http://www.waldwissen.net/index_FR

F. Guérold, Université Metz

zone humide tourbeuse en FC Still





Résultats de l'inventaire, exemples de cartographie

Le reméandrement des ruisseaux forestiers : un outil pour atténuer les excès du drainage en forêt de Chaux

Voici enfin une illustration des relations entre gestion forestière et fonctionnement des écosystèmes aquatiques forestiers. En forêt de Chaux, l'alerte sur la régression de l'écrevisse à pieds blancs a révélé certains inconvénients du drainage des sols forestiers pour les ruisseaux et la vie aquatique, mais aussi pour les arbres. D'où les actions correctives du programme Life « Ruisseaux… » : diagnostic, principes de restauration et premiers résultats.

Préambule

Lorsque, après guerre, Georges Plaisance prit en charge la gestion du massif de Chaux (Jura), il trouva une forêt ruinée par une surexploitation de plus d'un siècle qui trouve son origine dans l'explosion des besoins énergétiques d'une ère industrielle naissante. Il s'intéressa alors rapidement aux caractéristiques pédologiques particulièrement ingrates de ce massif. Et en bon ingénieur agronome, il en conclut très justement que la valorisation de ces zones improductives ne pourrait se concevoir qu'une fois ces sols dûment assainis. Les travaux de drainage furent donc entrepris à grande échelle ; et de fait, cinquante ans plus tard, le résultat est plutôt probant.

Toutefois, cette accélération de la dynamique des écoulements n'est pas sans inconvénients :
- en l'absence de nappe profonde, la seule réserve utile pour les arbres se situe dans le sol, au-dessus d'un horizon de compactage plus ou moins profond. Or, si une saturation en eau pénalise l'installation de la régénération, une trop faible réserve hydrique en périodes sèches cause, depuis peu, d'inquiétants dépérissements parmi les essences les plus exigeantes en eau (chêne pédonculé, hêtre…) ; tendance qui ne peut que s'amplifier si la dérive climatique annoncée se confirme ;
- l'accélération du cycle de l'eau (accentuée par le développement récent du réseau de desserte), sur ce vaste bassin versant (22 000 ha), aggrave les phénomènes de crues à l'aval ;
- les écrevisses à pieds blancs, espèce emblématique des petits cours d'eau de tête de bassin versant, sont en très forte régression ; signe d'une dégradation de la qualité écologique du milieu.

La technique du reméandrement, exposée ci-après, donne des résultats rapides et convaincants, visant à atténuer ces inconvénients. D'ores et déjà, l'Agence de l'eau s'est montrée très intéressée et nous a fait savoir qu'elle était prête à financer ce type de travaux, si l'ONF le souhaite.

Mais comme bien souvent en matière forestière, **il ne faudrait pas passer d'un excès à l'autre…** Le recours à cette technique doit donc être réfléchi, et en aucun cas généralisé. Il doit avant tout concerner les vallons forestiers, à haute valeur patrimoniale (soit environ 10% du massif), sans remettre en cause l'excellent travail d'assainissement qui a été entrepris sur les zones de platières.

Christian DEMOLIS
Directeur d l'agence ONF du Jura

La forêt de Chaux (39) est le deuxième plus grand massif feuillu de France métropolitaine (22 000 ha), La richesse écologique de ses cours d'eau forestiers a justifié la création du site Natura 2000 « vallons forestiers, rivières, ruisseaux, milieux humides et temporaires de la forêt de Chaux » sur environ 1 900 ha. Pour autant, elle n'est pas épargnée par l'altération du régime hydrique des ruisseaux avec, entre autres conséquences, la forte régression de l'emblématique écrevisse à pieds blancs (*Austropotamobius pallipes*) : il n'en reste plus qu'une seule population, cantonnée sur quelques centaines de mètres de linéaire malgré les précipitations abondantes et l'absence de flux polluants visibles.

Plusieurs études récentes ont montré que cette forte régression est générale en Bourgogne et en Franche-Comté. Si les régions de l'Est de la France abritent encore de nombreuses populations d'écrevisses à pieds blancs, celles-ci sont désormais limitées à des tronçons peu étendus de petits cours d'eau forestiers et elles continuent à diminuer (TELEOS 2004). Cette tendance préoccupante semble liée à l'érosion de la qualité mais aussi de la

E. Lucot, Université Franche-Comté

Fig. 1 : racines mises à nu par l'érosion régressive dans un secteur amont d'un ruisseau temporaire

quantité des eaux qui s'écoulent dans les têtes de bassin.

Or l'analyse de l'évolution historique de la qualité du réseau hydrographique de la forêt de Chaux a montré que les linéaires pérennes des 2 cours d'eau principaux, la Clauge et les Doulonnes, ont diminué de plusieurs kilomètres en 30 ans (TELEOS 2004). Et l'ONF a cartographié sur le massif 460 km de ruisseaux, dont 1/10e seulement est alimenté de manière permanente contre 1/5e à la fin des années 60 (Augé 2007). De plus, l'allure des tracés et les mesures de terrains montrent que la quasi-totalité des cours d'eau temporaires a été rectifiée et curée.

Parallèlement, les études effectuées par l'UMR Chrono-Environnement ont permis de rapprocher l'intensité du stress hydrique subi par les arbres avec l'importance du drainage des sols forestiers (Shahriari 2003). Les forestiers de ce secteur observent, pour les chênes pédonculés en particulier, une accentuation des phénomènes de dépérissement.
Dans ce contexte, un projet de reconstitution des réserves hydriques a été élaboré dans le cadre du programme Life Nature « Ruisseaux de tête de bassin et faune patrimoniale associée » (www.liferuisseaux.org). Cette démarche repose sur une collaboration étroite entre l'ONF et l'Université de Franche-Comté. Son objectif est la restauration de la dynamique des écoulements de 4 affluents temporaires de la Clauge amont. Cette restauration aura aussi pour effet de bloquer l'érosion régressive (figure 1).

Les principes du programme de restauration

Pour garantir la pertinence des aménagements et pouvoir ensuite vérifier leur efficacité, un état initial a été dressé. Les caractéristiques du fonctionnement hydrologique ont ainsi été analysées entre 2005 et 2006. Dans le même temps, les potentiels biologiques du réseau hydrographique ont été mesurés à l'aide d'un inventaire des insectes à larves aquatiques, indicateurs sensibles du taux d'humidité.

À partir des données récoltées et de la compréhension du fonctionnement des écosystèmes aquatiques dans leur état rectifié, des solutions techniques adaptées aux différentes configurations rencontrées sur le terrain ont été proposées. Le principe d'action adopté consiste à reconstituer les écoulements de surface en oblitérant les fossés rectilignes et en réactivant les lits méandriforme des ruisseaux temporaires. Les modalités de cette restauration ont été précisées en fonction du contexte local (topographie, profondeur du lit, nature des sols…).

Les travaux de reméandrement ont été réalisés en automne 2007 et en été 2008. La poursuite des mesures hydrologiques et biologiques en 2007 et 2008, permet une première évaluation des effets des travaux de 2007.

Le contexte géographique

Les études ont été menées en forêt domaniale de Chaux. Le climat est de type océanique à tendance continentale avec un cumul de précipitations annuel moyen voisin de 1 000 mm. Le substrat géologique est imperméable. Ceci est à l'origine d'un chevelu dense de ruisseaux temporaires. Excepté en bordure du massif, il n'existe pas de nappe profonde pérenne reliée aux cours d'eau. Les cours d'eau sont alimentés par les nappes d'eau qui s'installent dans les sols.

La topographie est peu marquée et présente une succession de plateaux entaillés de vallons peu profonds. Sur les plateaux, les sols sont très profonds (> 1,5 m), très hydromorphes et humifères, limoneux en surface et de plus en plus argileux en profondeur. Sur les pentes qui bordent les vallons, les sols sont profonds (1 à 1,5 m) et hydromorphes. Ils présentent le même gradient d'argile que celui des sols de plateau, mais se distinguent par l'apparition du substrat (cailloutis imperméable) entre 1 et 1,5 m de profondeur. Les caractéristiques des sols de fond de vallon varient entre l'amont et l'aval. Ils possèdent des caractéristiques proches des sols de plateau en amont et deviennent de moins en moins profonds (0,5 m) vers l'aval des ruisseaux. Leur texture devient de plus en plus équilibrée vers l'aval et les cailloux sont de plus en plus abondants.

Au niveau des bassins versants concernés par les travaux de restauration, les peuplements sont gérés en taillis sous futaie. Ils sont principalement constitués de chênes, charme, hêtre et tremble. Des peuplements avec un recouvrement dense de molinie (peuplements «dégradés») occupent certaines zones de plateau.

Les ruisseaux

Quatre affluents de la Clauge dont les bassins versants sont contigus ont été sélectionnés. Leurs bassins versants totalisent une surface de 250 ha. La longueur des 3 principaux ruisseaux avant reméandrement est comprise entre 1,3 et 1,5 km ; le quatrième a une lon-

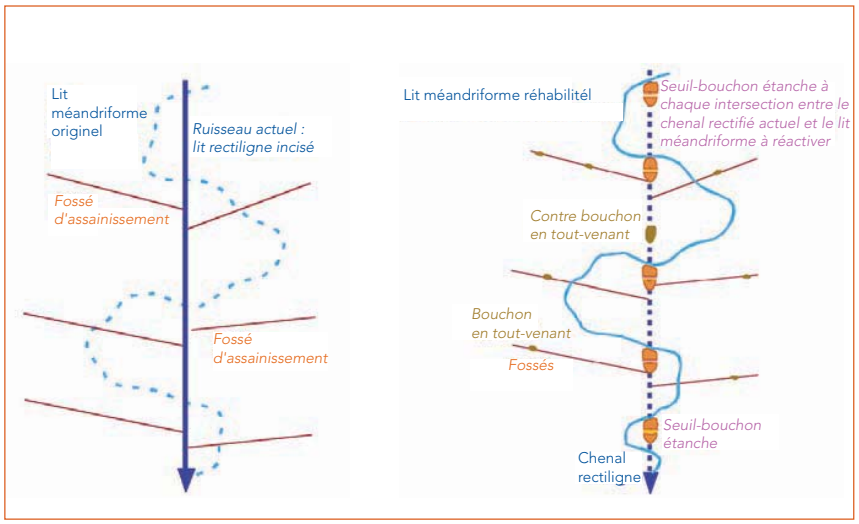


Fig. 2 : plan schématique de la situation avant travaux (à gauche) et stratégie de restauration des écoulements par implantation de bouchons

gueur de 0,4 km. Les 4 bassins versants sont densément parcourus de fossés connectés aux ruisseaux. Ces 4 affluents ont été chenalisés dans les années 1950 sur toute leur longueur (figure 2 page suivante), d'où un fonctionnement de type « oued ». L'évacuation rapide des hautes eaux y engendre de fortes érosions et ils restent la plupart du temps à sec. L'érosion régressive s'est développée graduellement vers l'amont des ruisseaux, en rendant le drainage de plus en plus efficace. Cette lente évolution morphologique explique que les effets des curages et des rectifications des affluents sur le régime de la Clauge, n'aient été visibles qu'à partir des années quatre-vingt.

Plan de restauration des écoulements de surface

Pour restaurer complètement le fonctionnement hydrologique des 4 ruisseaux et reconstituer leurs capacités biologiques originelles, l'idéal serait de combler complètement les cours rectilignes ainsi que la totalité des fossés. Cependant, l'ampleur des travaux nécessaires à la mise en œuvre de cette approche « exhaustive » induirait un bouleversement profond du couvert forestier, tout en risquant de dégrader les sols. Son coût s'avérerait également prohibitif, en particulier en raison de la quantité de matériaux à transporter.

Par conséquent, nous avons proposé d'enrayer les mécanismes de banalisation et d'assèchement des 4 bassins versants à l'aide d'une stratégie plus douce associée à un meilleur rapport coût/bénéfice. Il s'agit de réhabiliter le lit méandriforme originel en oblitérant le fonctionnement du lit rectiligne à l'aide d'une série de « bouchons » étanches (figures 2 et 3). Parallèlement, l'effet drainant des principaux fossés d'assainissement latéraux sera ralenti à l'aide de quelques bouchons de tout venant.

Pour réactiver le tracé méandriforme, un bouchon étanche est implanté à chaque intersection entre le chenal rectiligne et l'ancien tracé du ruisseau. Afin d'éviter les affouillements en hautes eaux et de limiter en étiage l'effet drainant résiduel du chenal rectiligne relictuel, un contre bouchon intermédiaire est implanté chaque fois que l'altitude du pied du bouchon amont est supérieure au sommet du bouchon aval. Ces ouvrages sont constitués d'un géotextile de rétention des fines, tendu sur un bardage de bois et placé au cœur d'un remplissage en tout-venant. Ce matériau est prélevé à quelques dizaines de mètres de distance, après décapage des 50 premiers centimètres du sol. Après cette extraction ménagée, la cavité est rebouchée partiellement à l'aide du matériau de décapage et aménagée en pente douce.

Simultanément, un sillon étroit, peu profond et sinueux est creusé pour amorcer le tracé méandriforme mais uniquement lorsque le tracé originel, ou sa connexion avec le méandre aval ne sont plus visibles. Cette « rainure » ne servira que de guide pour éloigner l'écoulement du tracé rectiligne : elle est donc impérativement sous dimensionnée par rapport au gabarit supposé du lit méandriforme.

Pour contrôler les processus d'ajustement morphologique, des rampes de fond empierrées ont été installées dans le lit de la Clauge pour limiter l'érosion régressive, le lit de cette rivière étant lui-même surcreusé.

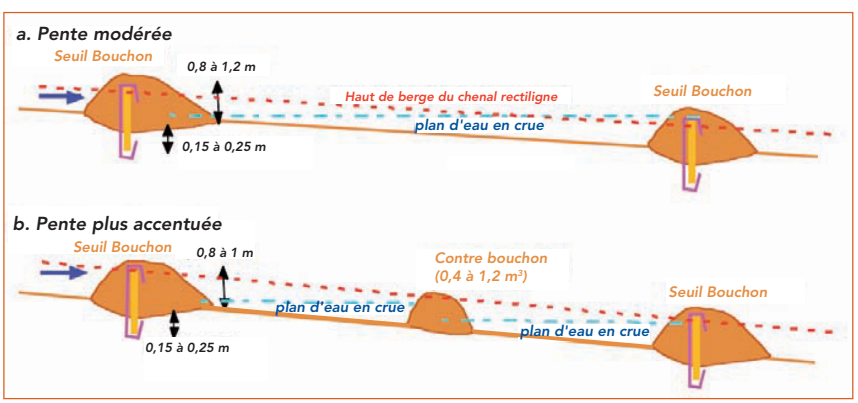


Fig. 3 : schéma d'implantation des bouchons en fonction de la pente du ruisseau

E. Lucot, Université Franche-Comté

Fig. 4 : ruisseau reméandré
Le fossé rectiligne en eau est visible au deuxième plan à gauche de la photographie.

À moyen terme, les segments de lit rectilignes et les fossés relictuels devraient être partiellement oblitérés par l'accumulation de la matière organique (débris ligneux, feuilles). Pour favoriser ce processus naturel, l'enlèvement des débris, encombres et embâcles dans le lit des ruisseaux et même toute intervention sur leur ripisylve ont été proscrits.

Premiers effets des travaux de restauration sur le fonctionnement hydrique

Après travaux, les premières données limnimétriques (mesure du niveau des eaux de surface) montrent qu'en période de hautes eaux, le niveau est fortement rehaussé. Parallèlement un écoulement méandriforme plus lent et plus favorable à la faune aquatique est immédiatement restauré, même si des pertes de charges phréatiques subsistent en raison des tronçons de chenaux rectilignes et de drains non comblés (figure 4). Cet effet devrait toutefois s'atténuer au bout de quelques années grâce à l'accumulation de matières organiques.

Corrélativement, la comparaison des mesures piézométriques effectuées avant et après intervention montre que le fonctionnement hydrique des sols a changé. Les enregistrements de profondeur d'apparition de la nappe ont été réalisés par des mesures manuelles tous les 10 jours et par des mesures automatiques toutes les 12 heures (sonde Schlumberger WS). Au total, 38 piézomètres ont été installés, répartis sur 3 ruisseaux, dont un a été reméandré en 2007 et les 2 autres, qui ont temporairement valeur de « témoin », ne l'ont été que fin août 2008.

Ce dispositif indique que les battements de nappe sont fortement modifiés par le reméandrement (figure 5). La nappe est plus superficielle (- 20 cm) et l'amplitude des battements est atténuée. La durée de présence de la nappe à moins de 45 cm de profondeur, qui permet la circulation de l'eau dans les fossés et ruisseaux, est augmentée d'environ 8 jours au moment de l'abaissement de la nappe en mai 2008. En juin 2008, la nappe s'est réinstallée entre 12 et 20 cm de profondeur durant près de 15 jours au niveau du ruisseau reméandré. Pour les deux autres ruisseaux, elle n'est réapparue que de manière sporadique aux environs de 40 cm de profondeur.

De façon plus ponctuelle, un rehaussement brutal de la nappe a été observé en août, suite à un orage, au niveau de la station FAM (figure 5) située sur un ruisseau non restauré à proximité d'une route départementale. Ce phénomène montre l'importance de l'impact drainant des fossés creusés le long des routes et des sommières ainsi que son renforcement par l'imperméabilisation des chaussées. Les effets de tels épisodes étaient fortement amplifiés par la rectification des chenaux d'écoulement.

En revanche, dès la mise en place des bouchons le ruisseau reprend les anciens méandres dans un lit de 5 à 15 cm de profondeur et une largeur de 0,5 à 1 m. Le débit de l'écoulement est ainsi fortement réduit.

De façon plus générale, au cours de la première année après les travaux de restauration, le matériau qui constitue les bouchons se tasse et devient de plus en plus étanche, ce qui augmente la capacité de rétention de l'eau. Dans l'ancien fossé rectiligne, des poches d'eau restent présentes au niveau de certains bouchons sur une durée qui a dépassé de plus de 3 semaines la durée de présence de la nappe dans les piézomètres et l'écoulement du ruisseau.

Conclusions

Les travaux de reméandrement menés sur les ruisseaux temporaires permettent donc de tamponner le régime hydrique des ruisseaux et des sols riverains. Les premiers résultats montrent un gain d'une semaine sur les écoulements et de trois semaines sur la durée de présence de poches d'eau. L'augmentation de l'humidité des sols est proportionnelle à ce gain. Il est probable que ces effets vont s'intensifier grâce à l'imperméabili-

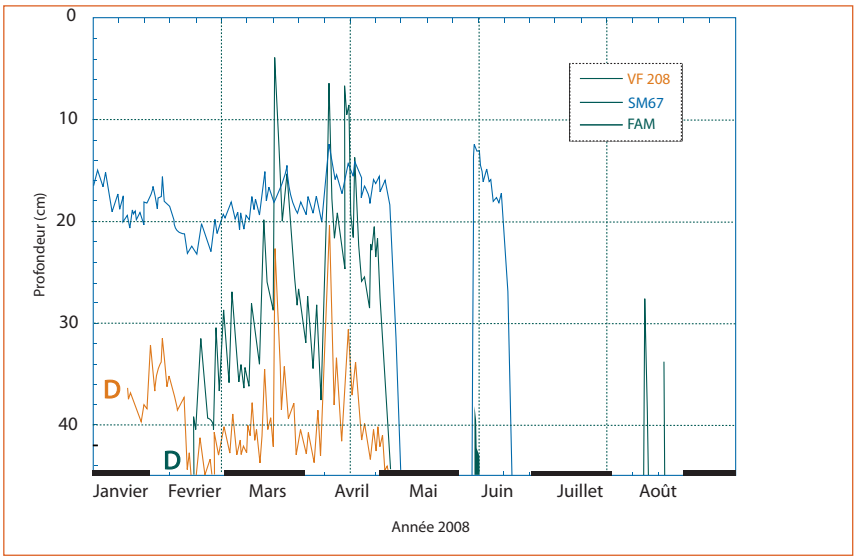


Fig. 5 : comparaison du fonctionnement piézométrique (une mesure toutes les 12 h) de trois ruisseaux temporaires dans des stations ayant des positions identiques (¾ amont)

La station SM67 correspond au ruisseau reméandré en 2007. D : début des mesures.

sation des bouchons par tassement du matériau et au comblement progressif des segments rectilignes relictuels. Malgré les bouchons, la remontée des nappes et les débits plus faibles, les nappes restent circulantes. Le manque d'oxygène est donc limité.

Dans ce contexte, la restauration des écoulements devrait favoriser le peuplement forestier. En effet, en présence d'espèces (voire de provenances ou écotypes) adaptées à l'ennoyage, la contrainte principale à laquelle les arbres doivent faire face est le manque d'eau (Levy et Lefèvre 2001, Shahriari 2003). Ces données remettent en question les conclusions tirées par les forestiers dans les années 50-60 et inspirées par les agronomes, sur le caractère nuisible des nappes dans les sols pour les arbres (Plaisance 1965).

Cette nouvelle approche sera aussi très bénéfique pour les écosystèmes aquatiques forestiers. En effet, ces réseaux hydrographiques constituent des ressources en eau précieuses tant en quantité qu'en qualité. Ils abritent une faune patrimoniale unique, y compris sur les linéaires naturellement temporaires. Cependant, en forêt, une grande partie de ces chevelus a subi des rectifications drastiques ou/et a souffert de la répétition des curages « vieux fond/vieux bord ». Ces aménagements ont provoqué l'enfoncement et le drainage des nappes, le réchauffement et la réduction des écoulements estivaux et pour finir la banalisation des mosaïques d'habitats aquatiques. À l'échelle des grands bassins, ce syndrome participe à l'amplification des crues et à l'érosion des débits d'étiage.

La restauration des capacités de stockage de l'eau gravitaire en forêt revêt, pour les arbres comme pour les cours d'eau, une importance d'autant plus cruciale que les périodes de sécheresse sont annoncées plus fréquentes et plus intenses. Dans la perspective de ce changement climatique annoncé, c'est ce type de restauration qui serait à mettre en place en sol hydromorphe, éventuellement en combinaison avec une adaptation du type de sylviculture, avant d'envisager des introductions d'espèces « exotiques ». Le maintien ou le retour d'espèces aquatiques patrimoniales sensibles et parfois succulentes comme l'écrevisse pied blanc constitueront une prime à cette approche de restauration intégrée.

Éric LUCOT
François DEGIORGI
Pierre-Marie ADOT
UMR Chrono-Environnement
CNRS - Université
de Franche-Comté
eric.lucot@univ-fcomte.fr

Vincent PEREIRA
Vincent AUGÉ
ONF, DT Franche-Comté

Pierre DURLET
Chargé de mission LIFE
PNR Morvan

Bibliographie

AUGÉ V., 2007. Comment réduire l'impact de l'exploitation forestière et des travaux mécanisés sur le réseau hydrographique ? Le schéma de desserte et d'exploitailité « orienté eau ». Besançon : ONF. Rapport LIFE « ruisseaux », 81 p.

LEVY G., LEFÈVRE Y., 2001. La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. Nancy : ENGREF, 223 p.

PLAISANCE G., 1965. Les sols à marbrure de la forêt de Chaux (Jura). Ann. Sci. For. Vol. 22, n° 4, pp. 449-676

SHARIARI AR., 2003. Étude des relations sol-racine et des réponses de croissance et de développement du chêne pédonculé et du chêne sessile aux situations de stress hypoxique ou anoxique liées à l'ennoyage temporaire. Besançon : Université de Franche-Comté. Thèse de doctorat 184 p.

TELEOS, Fédération de Pêche 39, 2004. Contribution à la recherche des causes de régression de l'écrevisse «Pieds Blancs» (*Austropotamobius pallipes*). Paris : CSP (ONEMA). Rapport d'étude, 97 p.

Alisier torminal, alisier blanc, hybrides… comment s'y retrouver ?

L'hybridation entre l'alisier torminal et l'alisier blanc est complexe. Elle est à l'origine de multiples formes d'alisiers hybrides. Comprendre les mécanismes qui sous tendent l'apparition de ces différents hybrides et savoir les distinguer est un enjeu important pour une bonne gestion des ressources génétiques de ces espèces.

Alors que le souci de la préservation de la diversité biologique en forêt oriente de plus en plus les choix et itinéraires techniques du forestier, le cas des espèces interfertiles et de leurs nombreuses formes hybrides conduit à s'interroger sur la stratégie de conservation à adopter. Faut-il favoriser le nombre et la diversité d'hybrides par des mesures de protection *ad hoc*, ou bien favoriser la diversité au sein de chaque espèce parente et contribuer ainsi au maintien du processus d'hybridation et donc à une production continue d'individus hybrides ?

Répondre à ce type de question suppose, après avoir été capable d'identifier les espèces et les formes hybrides, de connaître les mécanismes biologiques conduisant à la production d'hybrides à partir d'espèces distinctes (sens de croisements préférentiels, viabilité et fertilité des hybrides).

Nous illustrerons ce genre de situation à partir du cas de l'hybridation entre l'alisier torminal et l'alisier blanc, grâce aux travaux menés ces dernières années sur ce complexe d'espèces par le conservatoire génétique des arbres forestiers (CGAF) de l'ONF, en collaboration avec d'autres équipes (INRA, CNRS, université Paris XI).

Alisier blanc, alisier torminal : présentation

Sorbus aria (L.) Crantz (alisier blanc)

Arbre atteignant 20 m de hauteur pour 50 cm de diamètre, originaire d'Europe de l'Ouest jusqu'aux rives de la Mer Caspienne. En France on le rencontre dans tous les massifs montagneux jusqu'à environ 1 700 m d'altitude et plus généralement dans une grande moitié est. Indifférent au pH du sol, il exige néanmoins des terres filtrantes.

Espèce hermaphrodite, entomophile et dont la dispersion des graines est assurée par les animaux (oiseaux, mammifères). L'écorce est grisâtre et reste longtemps lisse. Le houppier est plutôt ovoïde ou globuleux. Les rameaux sont brunâtres ou rougeâtres, glabres avec de nombreuses lenticelles. Les bourgeons sont alternes et brun verdâtre ou rougeâtres avec des poils blancs. Les feuilles sont caduques, simples et entières avec une denture irrégulière sur l'ensemble du pourtour du limbe. Elles sont comprises entre 8 et 10 cm de long. Le dessus est vert et le revers est doté d'un dense tomentum blanc. Elles deviennent jaunes en automne. Le pétiole est assez court. Les fleurs sont blanchâtres et disposées en corymbes. Les fruits sont ovoïdes, d'environ 2 cm de diamètre et de couleur rouge orangée.

Sorbus torminalis (L.) Crantz (alisier torminal)

Arbre atteignant 20 m de hauteur pour 70 cm de diamètre voire davantage, dont l'aire s'étend de l'Europe de l'Ouest à l'Asie mineure et jusqu'en Afrique du Nord. En France on le rencontre jusqu'à 1 000 m d'altitude et plus généralement dans une grande moitié est. Il est indifférent à la valeur du pH du sol et pousse indifféremment sur sols drainés à légèrement humides.

Espèce hermaphrodite, entomophile et dont la dispersion des graines est assurée par les animaux (oiseaux, mammifères). L'écorce est grisâtre à roussâtre et se fissure horizontalement. Le houppier est ovoïde puis étalé. Les rameaux sont brunâtres avec de nombreuses lenticelles. Les bourgeons sont alternes et verts avec des liserés bruns. Les feuilles sont longuement pétiolées, caduques, simples et dotées de 5 à 9 lobes finement dentés et d'autant plus larges qu'on se situe à la base du limbe. Elles sont glabres sur les deux faces avec une face supérieure vert foncé et un revers plus clair, comprises entre 5 et 10 cm de long. Elles virent au rouge en automne. Les fleurs sont blanchâtres et disposées en corymbes. Les fruits sont ovoïdes, d'environ 1,5 cm de long, brunâtres et quelque peu verruqueux.

Statut des hybrides

D'un point de vue réglementaire, seul l'hybride *Sorbus latifolia* (Lam.), l'alisier de Fontainebleau, bénéficie en France d'un statut particulier. Reconnu comme taxon à part entière, il figure dans le Livre Rouge de la Flore Menacée de France (Tome 2) et sur la liste des espèces menacées de l'IUCN. Les prospections réalisées par le CGAF dans 42 forêts du Bassin Parisien et du Nord-Est de la France ont permis d'identifier – sur la base de critères de morphologie foliaire et de cytométrie — *Sorbus latifolia* (Lam.) dans 12 d'entre elles ; une seule (Veaugues 18) est excentrée par rapport aux autres qui sont concentrées dans la région de Fontainebleau (Vallance, comm. pers.). Cette étude a permis de mieux définir l'aire de répartition de l'alisier de Fontainebleau et de montrer que cet hybride n'était pas aussi rare qu'on le croit.

Quelques rappels sur les hybrides forestiers

La définition généralement admise d'un hybride est un individu viable, issu du croisement entre deux espèces différentes appartenant à la même famille sur le plan taxonomique. Cet individu présente des caractéristiques des deux espèces parentes. En agronomie, les hybrides sont souvent considérés comme ayant des performances supérieures aux espèces parentes, on parle alors de vigueur hybride. Certains hybrides stables peuvent se reproduire par reproduction sexuée mais la plupart sont stériles.

Les phénomènes d'hybridation existent naturellement dans les populations forestières de fagacées, d'ulmacées, de rosacées et de salicacées mais aussi chez les gymnospermes, par exemple entre pin sylvestre et pin à crochets, entre pins noirs ou entre sapins méditerranéens (Fady et Lefèvre, 2004). Si les espèces parentes sont souvent aisément différenciables à partir de critères morphologiques, il existe bien souvent entre ces deux pôles un continuum de formes hybrides qui rend l'identification beaucoup plus hasardeuse. La diversité des formes observées se traduit alors fréquemment par une inflation de descriptions taxonomiques et de noms attribués aux hybrides.

Alisiers hybrides et espèces parentes, comment les reconnaître ?

Nous ne détaillerons pas ici l'abondante littérature et les non moins abondantes listes taxonomiques portant sur les hybrides entre espèces du genre *Sorbus*, et en particulier entre *Sorbus aria* (L.) Crantz et *S. torminalis* (L.) Crantz (voir Drapier 1991 ou Prat et Daniel 1993). Plus de 20 formes présumées intermédiaires entre ces deux taxons ont été décrites par exemple en Hongrie ! En France, on distingue l'alisier de Fontainebleau (*Sorbus latifolia* (Lam.)) des autres alisiers hybrides (*Sorbus confusa* Grembli). L'alisier de Fontainebleau a été décrit dès le 19e siècle dans le massif de Fontainebleau comme un hybride stable entre l'alisier torminal et l'alisier blanc et il figure sur la liste française de l'UICN des espèces protégées en raison de son aire de répartition très restreinte.

Différentes méthodes existent pour distinguer les espèces parentes et leurs hybrides. Elles reposent soit sur la description de caractères observables (par exemple la morphologie foliaire) soit sur des approches au niveau cellulaire (comptage du nombre de chromosomes) ou moléculaire (marqueurs génétiques). Nous allons passer en revue ici les résultats obtenus avec trois méthodes différentes, afin de

Feuilles d'alisier blanc

Feuilles d'alisier de Fontainebleau

Feuilles d'alisier torminal

proposer des critères simples pour distinguer les hybrides des espèces pures, en particulier pour l'alisier blanc, voire établir des distinctions fiables parmi les différentes formes d'hybrides.

À partir de la forme des feuilles

Une série de paramètres foliaires (plus d'une dizaine au total : nombre de nervures, angle de nervures, pilosité du pétiole, gaufrage de la feuille…) a été mesurée sur 455 individus appartenant aux espèces pures et à un ensemble de forme hybrides (à raison de 10 feuilles/arbre et 30 arbres par forêt en moyenne) échantillonnés sur plus d'une quarantaine de forêts en France, principalement dans le quart nord-est, où coexistent des hybrides et les deux espèces parentes (figure 1). Ces échantillons ont été ensuite analysés à l'aide du logiciel ALISE développé par J.L. Dupouey.

Cette analyse basée sur la morphologie foliaire permet de séparer clairement les espèces pures entre elles (alisier torminal, groupe distinct de l'alisier blanc) ; en revanche, elle parvient difficilement à séparer les groupes hybrides de l'alisier blanc qui avec qui ils forment un continuum. Des groupes d'hybrides qui avaient été distingués *a priori* par examen visuel n'ont pu l'être par les analyses de formes (figure 2 page 64). On peut noter toutefois que toutes les feuilles appartenant à l'alisier de Fontainebleau et à l'hybride torminaloïdes se distinguent des autres hybrides et se trouvent regroupées au sein du nuage de points. Et, parmi tous les paramètres mesurés sur ces échantillons, le gaufrage de la feuille et l'angle de la première paire de nervure semblent être caractéristiques de l'alisier de Fontainebleau ; aucune autre particularité ne se retrouve aussi marquée au sein des autres hybrides. Cette analyse révèle également une structuration par forêt : les hybrides se ressemblent plus au sein d'une même forêt qu'entre forêts voisines et certaines formes hybrides ne sont présentes que dans quelques forêts.

À partir du contenu des cellules en ADN

Nous avons essayé de distinguer les hybrides par leurs chromosomes, en recourant à la cytométrie de flux. Cette méthode permet de mesurer le niveau de ploïdie d'une espèce, c'est-à-dire le nombre d'exemplaires de chaque lot de chromosomes présents dans les noyaux cellulaires. La plupart des espèces végétales possèdent deux exemplaires homologues de chaque chromosome : elles sont dites diploïdes (2N, N étant le nombre de chromosomes différents). Dans le cas des *Sorbus* étudiés les espèces pures s'avèrent effectivement diploïdes (2N chromosomes = 34)

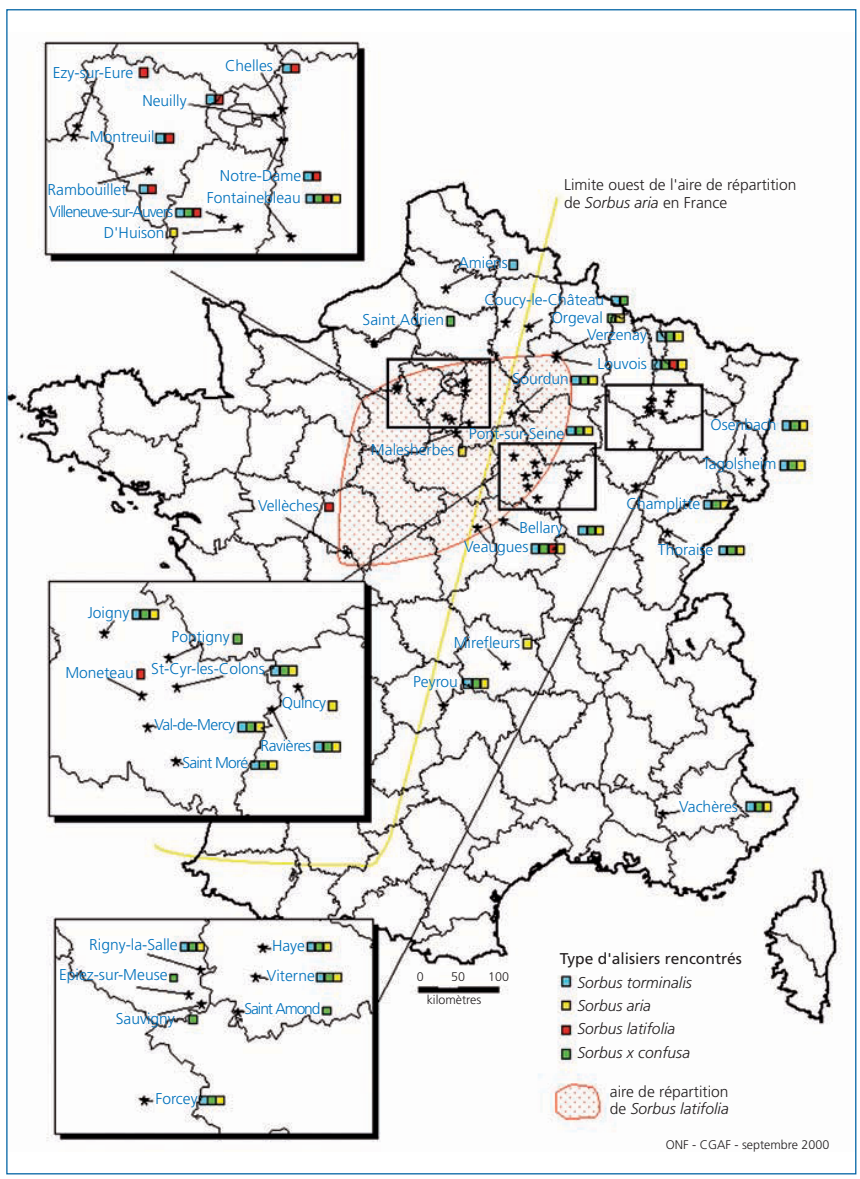


Fig. 1 : répartition géographique des forêts échantillonnées pour l'étude de la morphologie foliaire

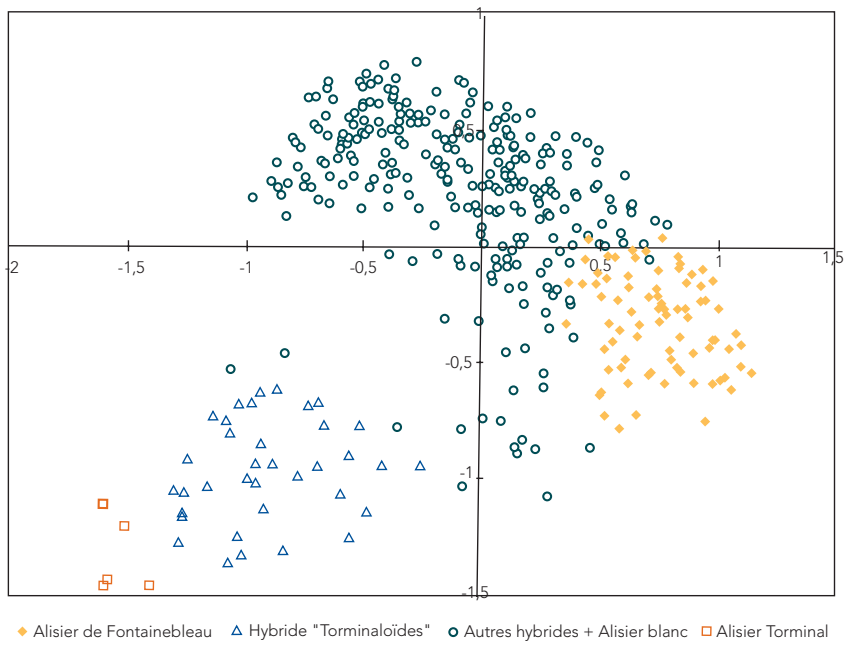


Fig. 2 : analyse factorielle de correspondance entre les différents types morphologiques d'alisiers hybrides et les espèces parentes

même si dans la littérature il a été reporté des cas d'alisier blanc avec un niveau de ploïdie supérieur (Nelson-Jones *et al.* 2002). Par contre, les individus hybrides de notre étude présentent des niveaux de ploïdie variables avec 3 (3N, triploïdie), 4 (4N, tétraploïdie) voire exceptionnellement 5 (5N, pentaploïdie) exemplaires homologues de chaque chromosome. Dans notre échantillon, nous n'avons pas mis en évidence d'hybride de type 2N. La plupart des hybrides sont triploïdes y compris les hybrides torminaloïdes, mais l'alisier de Fontainebleau est indiscutablement tétraploïde. Les mesures de cytométrie de flux ont été complétées par des comptages de chromosomes qui confirment les résultats précédents. Ces mesures corroborent les résultats obtenus avec les études de morphologie foliaires mais ne permettent pas de subdiviser la nébuleuse des hybrides sauf la place à part de l'alisier de Fontainebleau.

À partir de la forme du grain de pollen

Des mesures effectuées sur des grains de pollen différencient également le groupe des hybrides des espèces parentes. Les hybrides ont des grains de pollen de taille supérieure à celle du pollen de l'alisier blanc et de l'alisier torminal, et ils possèdent 4 apertures (zones plus fragiles qui facilitent le passage du tube pollinique) contre 3 pour les espèces parentes. Mais dans ce cas, nous n'avons pas pu distinguer l'alisier de Fontainebleau des autres hybrides.

En résumé, nous pouvons dire que caractères morphologiques et chromosomiques permettent de reconnaître les espèces parentes (alisier torminal et blanc) des formes hybrides. Mais au sein des hybrides, il existe un continuum de morphotypes foliaires et un niveau de ploïdie supérieur à celui des parents, dont l'alisier de Fontainebleau se détache (tétraploïdes avec gaufrage et angle de la première paire de nervures caractéristiques).

Comment se forment les hybrides et comment se maintiennent-ils ?

Le croisement entre alisier blanc et alisier torminal donne divers types d'hybrides

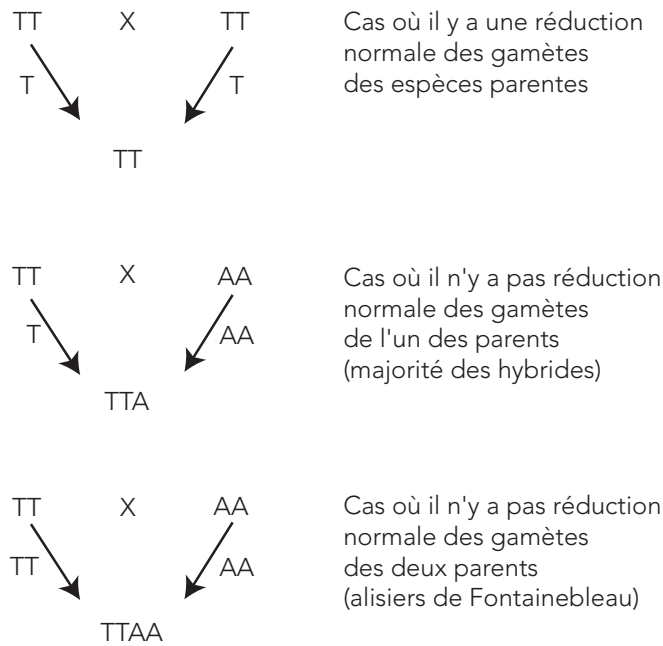
Des croisements contrôlés menés par le CGAF ont permis de réaliser l'hybridation entre alisier torminal et alisier blanc dans les deux sens et entre l'alisier de Fontainebleau et les espèces pures avec obtention de semis viables.

Le niveau de ploïdie des alisiers hybrides s'explique, pour les formes 3N et 4N, par une non-réduction du nombre de chromosomes dans les gamètes des parents, qui restent 2N au lieu de devenir 1N (figure 3). Les formes triploïdes (la plupart des hybrides) sont obtenues par croisement d'un gamète réduit avec un gamète non réduit, alors que les formes tétraploïdes (alisier de Fontainebleau) sont obtenues à partir du croisement de deux gamètes non réduits. La non-réduction des gamètes est plus fréquente chez l'alisier blanc (Nelson-Jones *et al.* 2002) que chez l'alisier torminal.

La plupart des hybrides ne se reproduisent pas ou peu par voie sexuée classique

Outre la reproduction végétative (drageonnage), il est dit depuis longtemps dans la littérature botaniste (Lliljefors 1955) que les alisiers hybrides sont capables de pratiquer un mode de reproduction uni parental, au cours duquel seul le matériel nucléaire femelle participe au génotype (phénomène d'apomixie maternelle). Le pollen n'intervient dans la reproduction que pour initier la multiplication cellulaire de l'ovule. L'arbre produit alors des graines qui sont viables mais qui sont la copie du génome maternel. Nous avons conduit diverses observations et expériences pour évaluer l'importance de la reproduction sexuée et de la reproduction par apomixie chez différents types d'hybrides.

A - Mécanisme de création des espèces diploïdes, des hybrides triploïdes et tétraploïdes



B - Exemple de mécanisme de reproduction des individus tétraploïdes

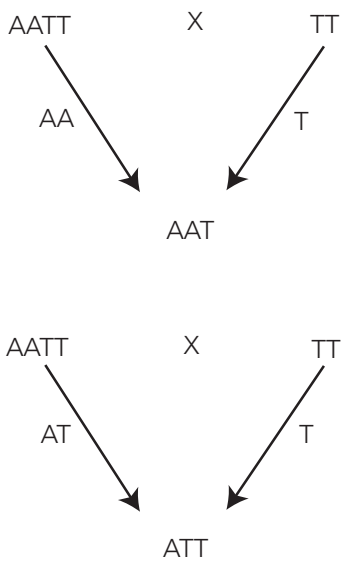


Fig. 3 : mécanisme de formation des hybrides

TT = génome alisier torminal, AA = génome alisier blanc, TAA : génome d'alisier hybride triploïde de type confusa, TTAA : génome d'alisier hybride tétraploïde de type Fontainebleau

Nos expériences ont montré qu'il y avait très peu de pollen viable et capable de « germer » issu d'hybrides 3N ce qui est aussi corroboré par les études de Chester *et al.* (2007). Les alises récoltées en forêt sur des individus hybrides 3N génétiquement différents ont été semées et étudiées. L'analyse en cytométrie de flux a montré que les descendances étaient triploïdes et les marqueurs génétiques (microsatelittes) que les descendants d'une même mère avaient son génotype. Il semble donc que les individus d'alisier hybride 3N se reproduisent par apomixie, sans fécondation. En revanche, les hybrides tétraploïdes (alisier de Fontainebleau) peuvent produire du pollen viable et des fruits contenant des graines viables. Nos analyses montrent que ces graines résultent souvent d'apomixie, mais qu'une reproduction sexuée est possible, même si elle est rare, et peut aboutir à former aussi de nouveaux hybrides (figure 3B). Les croisements contrôlés que nous avons faits montrent que l'on peut obtenir des descendances aussi bien avec l'alisier blanc que l'alisier torminal avec du pollen d'alisier de Fontainebleau. La morphologie foliaire de ces descendances est très variable (du morphotype alisier blanc à celui d'alisier torminal).

En résumé, sur la base de nos observations et de la littérature, nous pouvons distinguer deux cas :

- *les alisiers hybrides triploïdes apparaissent comme un cul-de-sac évolutif ; ils sont formés par un événement de reproduction initial entre alisier blanc et alisier torminal, et peuvent éventuellement se maintenir par drageonnage, et par apomixie ;*
- *les alisiers de Fontainebleau (tétraploïdes) peuvent produire des graines viables par reproduction sexuée et apomixie. Ces graines sont alors nécessairement des hybrides de différents types issus de croisements entre hybrides tétraploïdes ou avec les espèces pures.*

L'hybridation peut-elle affecter le patrimoine génétique des espèces parentes ?

L'étude de ces hybrides ainsi que des espèces parentes issues des mêmes forêts montre que l'on a très peu de type morphologique d'alisier torminal avec un haplotype (génotype chloroplastique d'un organisme hapoïde) d'alisier blanc. Ce qui prouve que l'hybridation entre les deux espèces parentes ne va pas jusqu'à l'introgression d'une espèce par l'autre contrairement à ce qui a été montré chez les chênes blancs. Il n'y a pas ou très peu d'échange de gènes entre les alisiers hybrides et les alisiers torminals à cause de la prédominance des formes triploïdes. Par contre, on peut avoir des graines hybrides en faible quantité sur les espèces pures lorsqu'elles coexistent au sein d'un même massif ou avec l'alisier de Fontainebleau.

Est-ce qu'il existe une supériorité des formes hybrides ?

Chez beaucoup de plantes (en particulier les plantes de grande culture), on observe une augmentation des capacités (rendement) et/ou de la vigueur chez les hybrides par rapport aux parents.

Les mesures de croissance annuelle en hauteur (sur 3 années) réalisées sur 3 213 plants d'alisiers hybrides issus de graines récoltées à l'automne 1997 dans 14 forêts du Bassin Parisien et des départements limitrophes montrent (figure 4) que les hybrides – alisier de Fontainebleau inclus — ne se distinguent pas des espèces pures par une vigueur particulière (pas d'effet hybride). En revanche, même si au sein des hybrides les forêts de l'Yonne présentent une croissance inférieure aux autres provenances, aucune relation entre proximité géographique au lieu d'expérimentation et la vigueur n'a pu être mise en évidence.

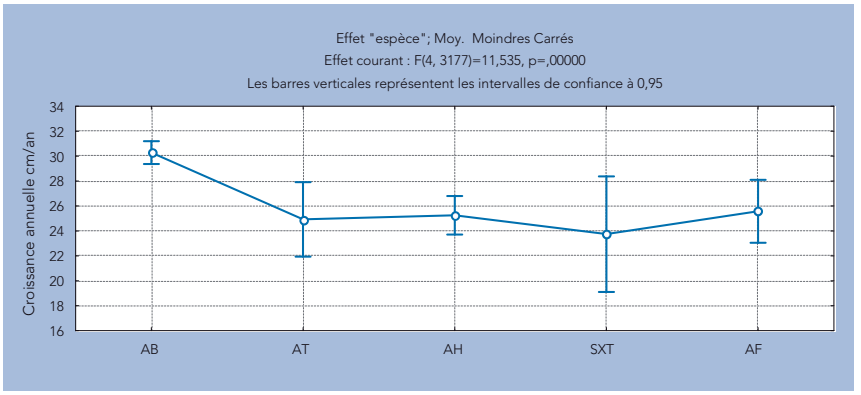


Fig. 4 : croissance annuelle moyenne en hauteur (3 années de mesure) de plants d'espèces pures et d'hybrides (Données CGAF L. Lévèque, non publiées)

AB : alisier blanc, AF : alisier de Fontainebleau, AH : alisier hybride, AT : alisier torminal, SXT : alisier torminaloïdes.

Où peut-on retrouver les différents types d'hybrides ?

En pratique, la quasi-totalité des alisiers hybrides trouvés dans les forêts de l'Est et du sud du Bassin Parisien est de type triploïde. Il y aura des phénomènes d'hybridation régulièrement, en faible quantité, dans ces forêts tant qu'il y aura présence des deux espèces parentes. Leur reproduction étant de type clonal, ces hybrides ne peuvent évoluer et s'adapter aux changements climatiques. Ils peuvent être considérés comme des culs de sac évolutifs. Le gestionnaire peut toutefois en maintenir en forêt à titre d'enrichissement sachant qu'ils ne participeront que peu à la régénération naturelle (voir article sur la sylviculture de l'alisier torminal dans le prochain numéro de RDVT).

Par contre dans un certain nombre de forêts du Bassin Parisien et du Centre, on rencontre des alisiers de Fontainebleau parfois en mélange avec d'autres hybrides. L'alisier de Fontainebleau étant capable de reproduction sexuée, on peut penser qu'il y apparaît régulièrement de nouveaux hybrides de différentes formes. Le gestionnaire peut agir en faveur des alisiers de Fontainebleau de la même manière que pour les espèces pures afin de maintenir leur présence au sein des massifs qui les hébergent.

Conclusion

Dans le genre *Sorbus*, la formation continue d'hybrides par croisements entre espèces parentes ne se traduit pas par la création de véritables espèces nouvelles (spéciation) et les hybrides qui apparaissent ne présentent aucun avantage évident qui leur permettrait de supplanter leurs parents. Le maintien d'une diversité élevée au sein du complexe d'espèces repose donc sur le maintien de la diversité existant au sein de chacune des espèces parentes. Mieux connaître cette diversité constitue un prérequis indispensable permettant de raisonner les actions de gestion assurant sa préservation sur le long terme.

On peut considérer au vu de nos résultats que l'alisier de Fontainebleau est bien un hybride particulier aussi bien du

point de vue de la morphologie foliaire (gaufrage des feuilles et l'angle entre la première paire de nervure) que du point de vue du nombre des chromosomes (4N). Toutefois, on ne peut pas considérer que l'alisier de Fontainebleau constitue une espèce au même titre que les alisiers blanc et torminal si on se réfère à son mode de reproduction, essentiellement par apomixie, et au fait que sa descendance ne soit pas exclusivement de l'alisier de Fontainebleau. Cette étude a aussi permis de mettre en évidence de nouvelles localisations d'alisier de Fontainebleau hors du massif forestier de Fontainebleau et d'affiner la carte de répartition des hybrides. Celle-ci sera utile afin d'éviter de récolter sur des alisiers torminals des semences hybrides et de commercialiser cette graine hybride sous l'appellation alisier torminal.

Brigitte MUSCH
ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers
Orléans
brigitte.musch@onf.fr

Sylvie ODDOU-MURATORIO
INRA, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes
Avignon
sylvie.oddou@avignon.inra.fr

Laurent LÉVÈQUE
ONF, DT Ile-de-France - Nord-Ouest
Agence haute Normandie
laurent.leveque@onf.fr

Michel VALLANCE
Conseil général de l'Essonne
Direction de l'Environnement
mvallance@cg91.fr

Bénédicte LE GUERROUE
ONF, Conservatoire génétique des arbres forestiers
Orléans
benedicte.leguerroue@onf.fr

Remerciements

Les auteurs remercient vivement l'ensemble des personnels techniques qui a participé à la récolte d'échantillon et à la sécherie de la Joux qui a digitalisé l'ensemble des feuilles.

Bibliographie

CHESTER M., COWAN R.S., FAY M. F., RICH T. C.G., 2007. Parentage of endemic *Sorbus* L. (Rosaceae) species in British Isles : evidence from plastid DNA. Botanical Journal of the Linnean Society, vol. 154, pp. 291-304

DRAPIER N., 1991. A propos de la protection de l'alisier de Fontainebleau et des essences forestières en général. Revue Forestière Française, vol. 43, n° 6, pp. 501-506

FADY B., LEFEVRE F., 2004. Exotique et hybridation : les risques liés à la pollution génétique. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n°1 « diversité génétique des arbres forestiers », pp. 24-33

LILJEFORS A., 1955. Cytological studies in *Sorbus*. Acta Horti Bergiani, vol. 17, pp. 47-113

NELSON-JONES E.B., BRIGGS D., SMITH A.G., 2002. The origin of intermediate species of the genus *Sorbus*. Theorical Applied Genetics, vol. 105, pp. 953-963

MURATORIO S., 2002. Impact des processus démographiques et spatiaux sur la diversité génétique des arbres forestiers. Le cas d'une espèce disséminée, l'alisier torminal (*Sorbus torminalis* L. Crantz). Thèse de l'ENGREF. 97 p.

PRAT D., DANIEL C., 1993. Variabilité génétique de l'alisier terminal et du genre *Sorbus*. Revue Forestière Française, vol. 45, n° 3, pp. 216-229

La sylvi-trufficulture et la truffe de Bourgogne : un nouveau pari qui concerne les forestiers

Longtemps délaissée, la truffe de Bourgogne connaît un regain d'intérêt grâce à la mise au point par l'INRA de techniques culturales adaptées à son tempérament continental et à sa prédilection pour les milieux ombragés. Elle offre aujourd'hui, en particulier sur les plateaux calcaires du quart Nord-Est, des opportunités de développement dont l'agence ONF de Vesoul porte témoignage (voir article suivant) par l'exemple de la truffière communale de Champlitte. Mais voyons d'abord, avec Léon Wehrlen (INRA), la présentation de la truffe de Bourgogne et des principes de la « sylvi-trufficulture ».

Le niveau actuel des connaissances et les progrès techniques récents, permettent d'envisager une nouvelle approche de la trufficulture en France, particulièrement avec la truffe de Bourgogne (*Tuber uncinatum* Chatin) : la sylvi-trufficulture. Cette culture est plus accessible aux compétences des forestiers qu'on ne le pense…

Elle contribuerait à une valorisation des zones calcaires par le redéveloppement d'un patrimoine ancien. La lutte contre l'enfrichement, le développement d'une filière économique nouvelle et durable vont ici de pair avec l'enrichissement de la biodiversité et l'adaptation à l'évolution climatique et font appel à l'ensemble des connaissances du gestionnaire forestier.

M. Pitsch, INRA

La truffe de Bourgogne

La truffe de Bourgogne et les espèces ligneuses associées

La truffe de Bourgogne est un champignon à fructification souterraine, associé à un arbre hôte. Elle se développe sur les sols calcaires, drainant, de PH 7 minimum. Elle aime les milieux clairiérés ou ombragés, contrairement à sa cousine méridionale, la truffe noire (*Tuber melanosporum* Vitt.) qui préfère les climats plus ensoleillés, plus chauds et plus secs. L'aire de répartition de cette truffe « de Bourgogne » est européenne. En France on la trouve sur les dépôts

calcaires plus ou moins riches en calcium ; les sédiments du Primaire, du Secondaire (Muschelkalk, Jurassique, Crétacé), du Tertiaire et les alluvions récentes calcaires du Quaternaire, lui sont favorables. Elle aime les saisons marquées du climat semi-continental ou continental à étés chauds, arrosés par des orages, à automnes frais et hivers froids. La truffe de Bourgogne se développe dans des situations topographiques très variées : du plateau à la pente, des fonds de vallons à la plaine, elle a toutefois une préférence pour les sols colluviaux profonds à bonne capacité de rétention d'eau. Elle n'aime pas les sols asphyxiants et non drainés. L'exposition des parcelles peut être variable selon les sites ; en général, elle préfère le sud-est ou le sud-ouest, parfois le nord. Il ne faut jamais oublier qu'elle supporte très mal les fortes sécheresses estivales prolongées. La maturation de cette truffe d'automne se fait, entre septembre et janvier. Elle se récolte avant les grands froids. Un gel précoce et durable peut endommager ou détruire les carpophores trop en surface du sol.

Tuber uncinatum est liée à certaines espèces d'arbres, par association ectomycohizienne. De nombreuses espèces forestières peuvent produire de la truffe de Bourgogne : les chênes, les pins, les noisetiers commun et de Byzance, les hêtres, les charmes commun et houblon, les tilleuls, les bouleaux, les cèdres, les châtaigniers, les épicéas et certains sapins (*Abies cephalonica* Loud.).

L'INRA invente la trufficulture moderne

Les recherches ont commencé dans les années 1960. En 1970 le plant mycorhizé est né à l'INRA de Clermont Ferrand après une collaboration fructueuse avec les collègues italiens de Turin. En 1973, les premiers plants ont été commercialisés par le premier pépiniériste producteur de plants inoculés artificiellement selon la méthode INRA (la société Agritruffe). D'autres pépiniéristes ont suivi ce mouvement. La technique de production et la qualité des plants vendus n'ont cessé de s'améliorer. Il se plante actuellement près de 1 000 ha de plants mycorhizés par an, principalement avec *Tuber melanosporum* mais aussi, plus récemment, avec *Tuber uncinatum*.

L. Werhrlen, INRA

Une des plus grandes serres de plants mycorhizés, sous licence INRA, par Agritruffe

Les techniques de culture s'affinent

Avoir un bon plant mycorhizé, c'est bien. Être capable de le faire grandir pour produire des truffes, c'est mieux ! Les trufficulteurs, individuellement ou regroupés en associations, les techniciens, les chercheurs, ont tous travaillé dans cette direction. Le savoir-faire traditionnel a été exploité et utilisé, mais parfois négligé ou totalement oublié, selon les compétences de chacun, sa perception du milieu naturel ou de l'agronomie. Parfois on a voulu généraliser trop rapidement des résultats locaux ou adaptés spécifiquement à certaines espèces : appliquer les itinéraires techniques de *T. melanosporum* à *T. uncinatum,* s'est révélé être une erreur.

Les techniques culturales propres à la truffe de Bourgogne ont été définies par une expérimentation spécifique menée par l'INRA et l'AMPPTL[1] sur la truffière de Commercy (55), créée en 1985. Les résultats ont rapidement mis en évidence les différences fondamentales entre la truffe noire et la truffe de Bourgogne : la première montre une prédilection pour les milieux ensoleillés et chauds (densité de plantation conseillée faible : de 150 à 300 voire jusqu'à 500 arbres/ha), alors que la seconde préfère les milieux plus ombragés et fermés (densité de plantation conseillée plus forte : de 700 à 1 250 arbres/ha). La truffe de Bourgogne a des besoins microclimatiques plus proches du milieu

1 Association Meusienne des Planteurs et Promoteurs de la Truffe en Lorraine

forestier, ce qui permet d'envisager des conduites culturales de plantations nouvelles et variées, voisines des techniques sylvicoles et de la gestion de la lumière.

La plantation classique, en verger : des avantages… et des risques

Les plantations réalisées depuis les années 1970, avec des arbres inoculés avec la truffe de Bourgogne, ont quasiment toutes été conçues sur le modèle classique de type verger. Ces parcelles conduites selon les préconisations culturales actuelles (sol et exposition favorables, antécédent agricole, densité et espèce d'arbre adaptées) entrent en production en général vers 8 à 12 ans. Ces truffières produisent ensuite une moyenne de 20 kg/ha, de truffes par an, selon les conditions météorologiques. On a observé une production exceptionnelle de 300 kg/ha, sur une plantation de cèdres âgée de 15 ans.

Cependant des études récentes ont montré que, dans les plantations mono spécifiques de noisetiers, à densité forte, la production de truffe croît régulièrement jusqu'à un seuil de 18 à 20 ans, puis décroît, voire disparaît quasi totalement. Cette observation semble liée au phénomène de blocage de croissance du système racinaire (anastomose des racines). Pour se former, une truffe a besoin de mycorhizes jeunes sur des racines jeunes. Un système racinaire en extension permanente n'aura pas les mêmes soucis qu'un système bloqué par la présence d'un arbre de même espèce trop proche. En cas de plantation dense, le fait de travailler régulièrement le sol en entretien superficiel (de 10 à 20 cm) facilite la régénération des racines de surface partiellement coupées par ce travail. La mycorhize dispose alors de racines jeunes pour développer harmonieusement sa symbiose… et produire des truffes.

Une plantation en verger demande des soins réguliers et un travail du sol raisonné, en fonction des essences plantées. C'est une culture intensive, d'âge et d'espèce ligneuse souvent homogènes (exemple des noisetiers). Dans ce dernier cas, cette homogénéité de « peuplement » entraîne un risque de vieillissement rapide de la truffière dans la mesure où l'espace aérien est occupé rapidement de façon complète mais également l'espace souterrain (décrit plus haut) qui se trouve confronté à une occupation d'une seule strate liée à l'architecture racinaire quasi homogène d'une même espèce qui explorera le même horizon de sol.

Une approche nouvelle : la sylvi-trufficulture

Ce nouveau concept est différent (et complémentaire) de la *sylviculture truffière* qui consiste à rénover les garrigues du Sud de la France, issues de truffières anciennes qui se sont enfrichées et que l'on réhabilite selon des méthodes sylvicoles définies par Alban Lauriac (alban.lauriac@crpf.fr).

L'idée de la **sylvi-trufficulture** est née de plusieurs observations :

- l'association des espèces ligneuses, semi-ligneuses et herbacées observées dans les truffières naturelles ;
- en milieu forestier, le fait que le mélange des espèces ligneuses améliore le fonctionnement de l'écosystème global : la résistance à la sécheresse et aux attaques parasitaires est meilleure, l'utilisation du potentiel du sol est optimisée du fait de la distribution spatiale des racines liée à la diversité architecturale des différentes espèces, la gestion de l'eau est optimisée, la vie du sol est plus riche et plus active ;
- l'association compatible des endo et des ectomycorhizes : ces 2 grands types de mycorhizes ont un mode de fonctionnement différent, elles n'entrent pas en compétition entre elles et peuvent donc cohabiter sans heurts, dans le même milieu ;
- les nouvelles techniques de préparation du sol avant plantation (technique 3 B) et de travail du sol des truffières en production (technique P H) (voir encadré).

L. Werhrlen, INRA

Préparation du sol avant plantation de la truffière expérimentale de Nancy-Brabois

Des concepts innovants de travail du sol, nés récemment à l'INRA de Nancy

(en collaboration avec l'entreprise Claude Becker, de Toul)

La **technique 3 B** (Billon Bombé Becker) :
ce travail du sol améliore de façon spectaculaire la qualité de la plantation, la reprise et la croissance initiale des plants. Il consiste en un décompactage en profondeur localisé et permet également une gestion de la végétation herbacée concurrente pendant l'année qui suit la plantation.

La **technique P H** (Pioche à Herser) :
ce concept est destiné à reproduire fidèlement le geste ancien du piochage manuel des truffières en production. Il permet de régénérer, de façon mécanisée, les systèmes racinaires des arbres mycorhizés pour aérer et redynamiser la vie du sol.

La **sylvi-trufficulture** est une approche nouvelle qui associe le fonctionnement et la gestion du milieu forestier avec les besoins écologiques d'une truffière. L'objectif est de créer une plantation dans un milieu sans antécédent à risque de contamination ectomycorhizienne (milieu agricole, friche à fruticée, pelouse calcaire…) pour provoquer une synergie réciproque de production avec une double conséquence économique :

- produire, à échéance de 10 ans, des truffes de Bourgogne qui assureront un retour sur investissement rapide ;
- produire à plus long terme du bois d'œuvre de qualité avec une diversité d'espèces capable d'adapter la commercialisation des essences, aux fluctuations des cours.

Comment planter ?

L'objectif à atteindre est clair : il faut créer, le plus rapidement possible, une dynamique favorable entre espèces. La truffe de Bourgogne se développe plus précocement dans un milieu légèrement ombragé. L'investissement initial en coût de plants truffiers est réduit par 2, 4 ou plus, par rapport à une plantation classique de type verger. Le rapport de la production sera, bien sûr, en conséquence. Il y a deux façons de procéder :

- on réalise, en premier, une plantation sylvicole à large espacement (uniquement des espèces d'arbres à endomycorhizes connues : alisiers, cormiers, merisiers, etc.) puis on plante 5 à 10 ans plus tard les arbres truffiers (ectomycorhizes) à l'abri du tout jeune peuplement ;
- la deuxième solution consiste à planter les feuillus précieux d'intérêt sylvicole et les plants truffiers la même année ; pour la répartition du mélange des espèces, il faut prendre en compte la croissance juvénile de chaque espèce (truffière expérimentale de Nancy-Brabois).

Obtenir ce résultat favorable demande une bonne connaissance des données autécologiques de chaque espèce, particulièrement leur gradient trophique et hydrique. Il ne faut surtout pas créer une situation de compétition pour la lumière ou l'eau. Dans le choix des espèces sylvicoles, non truffières, on éliminera par prudence celles qui consommeront trop d'eau, feront trop d'ombrage ou risqueront d'ensemencer trop rapidement le site (grands érables…). La plantation par bande ou par bouquet d'espèces est à privilégier, plutôt que le mélange pied à pied.

Quelles essences forestières utiliser ?

On conseillera des essences adaptées aux milieux neutres ou calcaires, xérophiles, mésoxérophiles ou mésophiles. Les espèces à privilégier seront, de préférence, frugales en eau et plutôt héliophiles : *Sorbus aria* L., *Sorbus domestica* L., *Sorbus torminalis* L., *Prunus avium* L., *Malus sylvestris* Mill., *Pyrus pyraster* Burgsd… On pourra y associer, dans un but d'engainage favorable à la croissance juvénile et d'aide au développement de la truffière, des arbres, arbustes ou arbrisseaux que l'on rencontre sur les truffières naturelles : *Prunus mahaleb* L., *Prunus spinosa* L., *Laburnum anagyroides* Med., *Cornus mas* L., *Juniperus communis* L., *Euonymus europaeus* L., *Sambucus nigra* L., *Viburnum lantana* L., *Viburnum opulus* L., *Amelanchier ovalis* Med., *Buxus sempervirens* L., *Crataegus monogyna* Jacq., *Frangula alnus* Mill…

Si toutes les conditions sont réunies (préparation du sol 3 B, bon choix des essences forestières et truffières, respect des règles liées à la compétition herbacée, conditions météos favorables, etc.), la structure biologique de la truffière devrait fonctionner rapidement et produire les premiers carpophores après 5 à 10 ans. La croissance initiale des arbres sera améliorée par le travail du sol préalable et le nombre de dégagements sera réduit. La gestion de la parcelle devra tenir compte des besoins de la truffe et de ses exigences.

Perspectives

La sylvi-trufficulture peut apporter une réponse solide aux problèmes de mise en valeur de certaines zones calcaires des forêts domaniales ou communales, de revalorisation des friches ou déprises agricoles, de réhabilitation de carrières, d'aménagements paysagers, etc.

Le périmètre géographique concerné rassemble l'ensemble du territoire métropolitain calcaire mais de façon plus importante, le grand quart Nord Est de la France. Cette alternative sylvicole permet de conjuguer efficacement les aspects socio-économiques, écologiques et de développement d'un patrimoine rural. En effet, la relance de la production truffière peut être un moteur économique local et régional, générateur d'emplois directs ou indirects, dans le cadre d'une filière nouvelle (non délocalisable) qui participe au développement d'un agrotourisme de haut niveau, des manifestations culturelles ou de créations de marchés aux truffes locaux (exemple des

L. Werhrlen, INRA

Jeune plantation truffière mélangée chêne pubescent et noisetier, accompagnée de genévrier

marchés de Pulnoy (54) mi-novembre et d'Is sur Tille (21) début décembre).

Les évolutions climatiques obligent le forestier à réfléchir, plus que d'autres, au choix des essences que l'on plante pour dans un siècle. Cette démarche est primordiale pour la sylvi-trufficulture dans la mesure où il faut anticiper les besoins en eau, peut-être réduits dans un futur proche, pour produire les carpophores. Le choix des espèces d'arbres truffiers doit aller dans ce sens. Plus l'espèce sera capable de s'adapter à des déficits hydriques et des étés chauds, plus elle laissera de l'eau disponible pour la production des truffes. Il existe de nombreux exemples de production de truffes sur ces espèces « glissées » plus au nord de leur aire naturelle (chêne pubescent, cèdre, chêne vert), malgré un déficit hydrique d'été néfaste pour les espèces productrices classiques (noisetier).

Les forestiers peuvent être moteurs de cette démarche qui commence à se mettre en route dans l'esprit de nombreux propriétaires ou de collectivités territoriales (truffières communales). Leur formation de base et leur approche du milieu naturel en font des interlocuteurs privilégiés pour comprendre qu'un milieu truffier n'est pas figé mais qu'il faut l'accompagner, comme un peuplement forestier, pour l'aider à produire longtemps et le régénérer quand il en est temps ; il leur suffit d'acquérir des formations complémentaires dans le domaine de la trufficulture pour devenir partenaire opérationnel.

Léon WEHRLEN
INRA Nancy — LERFoB
Mission Gestion de Végétation en Forêt
wehrlen@nancy.inra.fr

Bibliographie

BESANÇON G., PERIER H., 2007. La culture truffière : un atout pour le territoire haut-saônois… Document ONF, agence de Vesoul. 2 p.

BRUCIAMACCIE M., HANEWINKEL M., PEYRON J.L., 2007. Aspects économiques de la gestion des peuplements forestiers mélangés. Journées REGEFOR INRA Champenoux. juin 2007. 1 p.

CHEVALIER G., FROCHOT H., 2002. La truffe de Bourgogne. Levallois Perret : Ed. Pétrarque, 257 p.

CHEVALIER G., WEHRLEN L., BESANCON G., FROCHOT H. 2007. Trufficulture-Sylviculture : une nouvelle stratégie pour produire de la truffe de Bourgogne. 5th International Workshop, Chuxiong City, Yunnan, Chine. Poster, 1 p.

DESSOLAS H., CHEVALIER G., PARGNEY J.C., 2007. Nouveau manuel de trufficulture du Dr. PRADEL. Périgueux : Ed. Miseenpages, 309 p.

DUHEN L.M., 2007. Bonnes pioches pour la forêt et la truffe. Le Bois International 1er et 8 décembre 2007, pp. 15-16

FROCHOT H., ARMAND G., GAMA A., NOUVEAU M., WEHRLEN L. 2002. La gestion de la végétation accompagnatrice : état et perspectives. RFF vol. 54, n° 6, pp.505-520

FROCHOT H., WEHRLEN L., 2007.«Plantez en Lorraine « Le développement de la trufficulture. INRA Nancy. Document 4 p.

LAURIAC A., 2001. La sylviculture truffière. Forêt de France n° 441, pp 33-36

POUSSE J.S., FROCHOT H., ROBIN C., WEHRLEN L., 2007. Facteurs de production de la truffe de Bourgogne : Cas particulier de l'eau dans les vergers truffiers. Région Lorraine, INRA Nancy, Nancy Université. Rapport final + annexes. 88 p.

WEHRLEN L. 1998. Le culti sous-solage, une révolution dans les plantations. Forêt Entreprise n° 122, pp. 59-62.

WEHRLEN L., 2007. Plantation, rénovation : La technique 3 B (Billon Bombé Becker). Des résultats spectaculaires pour un travail du sol innovant. Le Trufficulteur français, n° 59, p. 14

La truffe de Bourgogne, une opportunité des plateaux calcaires haut-saônois

En 1993, la commune de Champlitte (70) a chargé l'ONF d'installer une truffière en forêt communale. L'opération, conduite en étroite relation avec l'INRA et suivie avec rigueur par le service local, illustre de façon très pratique le propos de l'article précédent. Elle a désormais valeur de référence pour d'autres projets du même type, en Haute-Saône et au-delà.

Dans le département de la Haute-Saône, les plateaux calcaires s'étendent sur 161 000 ha et couvrent ainsi près du tiers du territoire. Ils forment aussi des surfaces importantes dans le Doubs et le Jura.

La truffe de Bourgogne (*Tuber uncinatum*[1]), champignon souterrain de type ectomycorhizien, y était cultivée jusqu'au début du siècle dernier. Dans son livre «La truffe», publié en 1892, le mycologue A.D. Chatin fait état en 1889 d'une production de 78 tonnes dans le Nord-Est : 26 t en Bourgogne, 24 t en Champagne, 11 t en Franche-Comté (dont 4 t en Haute-Saône), 8 t en Lorraine et 8 t dans l'Ain.

Selon Gérard Chevalier et Henri Frochot, chercheurs à l'INRA, la culture de la truffe demande un sol calcaire, dont l'horizon supérieur est saturé en calcium, filtrant et à bonne réserve en eau, à forte capacité de minéralisation de la matière organique (C/N compris entre 9 et 12) et avec un taux de phosphore assimilable de 2 à 3 %. Le sol idéal est donc un colluvium de bas de pente, orienté au sud, et anciennement cultivé : les meilleures terres à vigne du Nord-Est avant l'arrivée du phylloxera !

La truffière communale de Champlitte est une bonne illustration d'un renouveau possible de la trufficulture en Haute-Saône et un exemple de projet alternatif au boisement de délaissés agricoles ou de friches calcicoles qui, selon l'inventaire IFN 1995, s'étendaient en Haute-Saône sur 1 700 ha (11 % de la surface des plateaux calcaires haut-saônois). Cette truffière est aussi devenue une référence locale grâce aux données recueillies, année par année, par Gérard Besançon, technicien forestier de l'ONF.

La truffière de Champlitte

La commune de Champlitte, 130 km² et 1 800 habitants, regroupe sept villages et se situe à 20 km au nord de Gray en limite de la Haute-Marne. Sa forêt communale (2 340 ha) est une chênaie-charmaie à hêtre typique des plateaux calcaires du Nord-Est. Elle est traitée en conversion (1 740 ha) sur les stations les plus fraîches et en taillis-sous-futaie (600 ha) sur les plus sèches où le chêne pubescent, en limite de son aire, apparaît çà et là.

C'est en 1993 que Champlitte, une des rares communes viticoles de Haute-Saône, décida d'installer en forêt communale une truffière financée par des crédits FEOGA – diversification 5B. La commune, maître d'ouvrage du projet de la truffière, en a confié le montage et la réalisation à l'Office national des forêts. Le choix d'implantation s'est rapidement porté sur les parcelles 89 et 92 de la forêt communale.

Ces parcelles, anciennes terres agricoles, ont été reboisées en pin noir et pin laricio de Corse entre 1978 et 1983. L'antécédent agricole de cette jeune plantation résineuse a été déterminant dans le choix car cet antécédent limite les risques de concurrence entre la truffe et les autres mycorhizes toujours présentes dans les sols forestiers.

Par ailleurs, avec une légère pente orientée au sud, la station développée sur des calcaires argoviens pauvres en éléments non carbonatés convenait au projet. Toutefois, les analyses de sol ayant révélé une teneur insuffisante en phosphore et en magnésie, il a été apporté un amendement sous forme de superphosphate et de dolomie.

La truffière de Champlitte a été installée selon deux modalités distinctes de 1 ha chacune, correspondant à deux situations différentes de la plantation résineuse d'accueil (réalisée à l'automne 1982 après sous-solage), ce qui s'est révélé très déterminant par la suite. Ainsi la truffière n° 1 a été installée dans une plantation de pin noir et pin laricio quasi complète de 550 plants par ha (6 m x 3 m), qui atteignait 2 à 3 m de haut. Pour la truffière n° 2, c'était une lande calcicole avec plantation très incomplète de pin noir. Le détail des travaux figure au tableau 1.

1 C'est en 1883 qu'A.D. Chatin découvrit que la truffe de Bourgogne constituait une espèce particulière. Il lui donna le nom d'uncinatum en raison des papilles crochues de ses spores

	Truffière n° 1 (Plle 89)	Truffière n° 2 (Plle 92)
Préparation	Automne 1992 : • Travail du sol : labour sur une bande de 3 m de large entre les lignes de la plantation forestière, avec charrue agricole à 3 socs • Amendement : 500 kg de superphosphate (200 unités de P205/ha) et 1 000 kg de magnésie (200 unités de MgO/ha) • Installation d'une clôture de 2 m pour protéger la truffière des sangliers	Printemps 1993 : • Broyage en plein de la végétation arbustive • Labour en plein à la charrue agricole • Amendement : idem parcelle 89 • Installation d'une clôture
Plantation truffière	Printemps 1993 : • Mise en place au coup de pioche de plants mycorhizés, en motte melfer, sur sol labouré à la densité de 550 plants par ha (6 m x 3 m) par placeaux de 5 lignes de 20 plants • Essences : tilleul (100 plants), chêne pédonculé (100 plants), noisetier (100 plants), charme commun et charme houblon2 (60 plants), chêne pubescent (100 plants) et pin noir (90 plants) • Mise en place au coup de pioche de plants mycorhizés, en motte melfer, à la densité de 625 plants par ha (4 m x 4 m)	Automne 1993 : • Essences : noisetier (300 plants) et de chêne pubescent (300 plants) sur deux placeaux
Entretien de la plantation truffière	• Broyage des pierres (1997) • Passage rotavator (1993) • Gyrobroyage et dégagement manuel léger • Tous les ans	• Mêmes travaux d'entretien qu'en parcelle 89
Plantations complémentaires		Automne 1999 : • Mise en place, en interligne de la plantation truffière, à 4 m x 4 m, de plants non mycorhizés dans le but d'introduire des essences forestières présentes dans les truffières naturelles • Essences introduites : cèdre de l'Atlas, noisetier, charme commun, érable champêtre, hêtre, poirier, cormier, pommier, alisier torminal, alisier blanc, bouleau, épine noire

Tab. 1 : travaux d'installation des deux modalités de la truffière de Champlitte

G. Besançon, ONF

Paysage de la truffière n° 2 en 2005

Les premières récoltes

C'est à l'automne 2004, douze ans après l'installation des plants mycorhizés, que débute la première récolte significative dans la truffière n° 1 (tableau 2). De septembre à décembre, les truffes sont récoltées avec l'aide d'un chien truffier. Cette récolte, appelée aussi cavage, est réalisée toutes les deux semaines, chaque truffe est attribuée à un arbre hôte (les plants truffiers ont été numérotés en 2000). La production truffière est ainsi suivie arbre par arbre.

En revanche, la truffière n° 2 ne produit toujours pas de récolte notable, seules quelques truffes sont trouvées dans les zones les plus ombrées.

Des résultats intéressants

Un enseignement confirmé : l'importance de l'ombrage

Il est communément admis que la truffe de Bourgogne se développe mieux en milieu ombragé et sur des stations plus fraîches que sa cousine du Périgord ou truffe noire (*Tuber melanosporum*). Les résultats décevants de la truffière n° 2 s'expliqueraient ainsi par le faible couvert d'une plantation à densité réduite en plein découvert. Dans la truffière n° 1, les premières truffes ont d'ailleurs été récoltées dans les endroits les plus ombragés.

Introduire les plants truffiers dans une plantation « sylvicole » à faible densité, autour de 500 plants/ha serait donc bénéfique au dévelop-

Année	Récolte en kg/ha	Pluviométrie estivale (juin à août)
2003	1,9	très faible
2004	25,8	300
2005	20,5	155
2006	28,8	235
2007	18,0	340

Tab. 2 : récoltes annuelles dans la truffière n° 1

La pluviométrie est évaluée à partir des isohyètes mensuelles publiées sur le bulletin météorologique départemental.

G. Besançon, ONF

Le chien Boubou cherche les truffes dans la truffière n° 1 en 2005

2 le charme houblon (Ostrya carpinifolia), espèce des basses montagnes de la Méditerranée, de la famille du bouleau, est bien connu des forestiers des Alpes Maritimes et de la Corse.

pement des plants truffiers et à celui de l'ectomycorhize (qui donne la truffe). Toutefois, en accompagnement des plants truffiers, il vaudrait mieux choisir des essences sylvicoles endomycorhiziennes, notamment des fruitiers, afin d'éviter la concurrence entre la truffe et les autres champignons ectomycorhiziens se développant sur les essences ectomycorhiziennes, telles que chêne, pin, hêtre…

Des récoltes irrégulières selon les essences truffières et les conditions climatiques estivales

Le suivi arbre par arbre permet d'avancer quelques conclusions sur la production truffière des essences introduites (voir figure 1).

Le noisetier est l'essence la plus productive, devant le pin noir, le chêne pubescent, le tilleul et le chêne pédonculé. Pour le noisetier, le pin noir et le tilleul, cette hiérarchie est respectée quelle que soit l'année et les variations interannuelles de production de ces essences sont similaires. Le déficit (2005) ou l'excédent (2007) de pluviométrie estivale ont eu un effet dépressif marqué sur la production truffière de ces trois essences. En revanche, l'été chaud et sec de 2005 fut très bénéfique à la production truffière du chêne pubescent qui se hissa au premier rang cette année-là. Quant au charme et à l'ostrya (charme houblon), ils sont actuellement peu productifs.

Ce constat souligne tout l'intérêt d'introduire des groupes d'essences truffières réagissant diversement selon les conditions climatiques estivales afin de réduire la fréquence de « mauvaises années ».

Une entrée progressive des plants et des essences en production

Autre constat, c'est l'entrée progressive des plants en production (figure 2) : 7 % en 2003, 22 % en 2004, 36 % en 2005, 52 % en 2006 et 56 % en 2007 des plants introduits ont produit au moins une truffe depuis 2003.

En 2007, trois essences ont dépassé 60 % des plants entrés en production : le noisetier (84 %), le pin noir (76 %) et le chêne pubescent (64 %) ; puis viennent le chêne pédonculé (48 %), le tilleul (35 %) et les « charmes » (23 %).

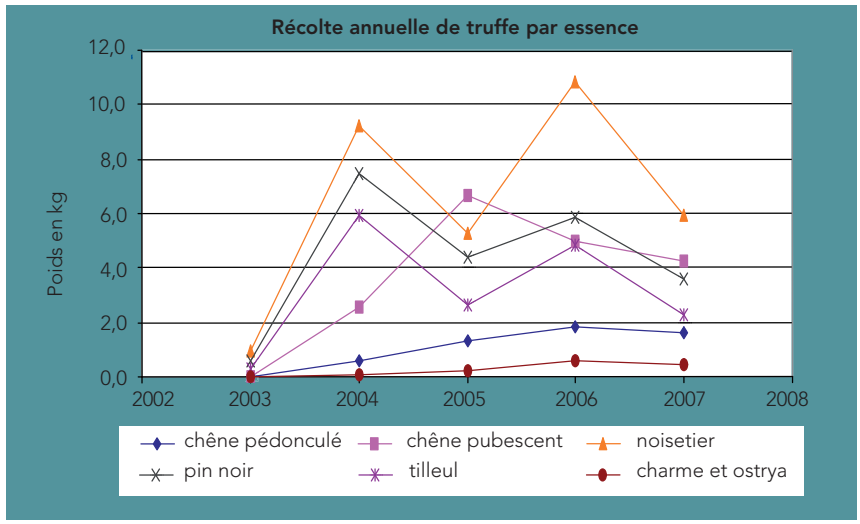


Fig. 1 : évolution de la récolte annuelle de truffes par essence sur la truffière n° 1

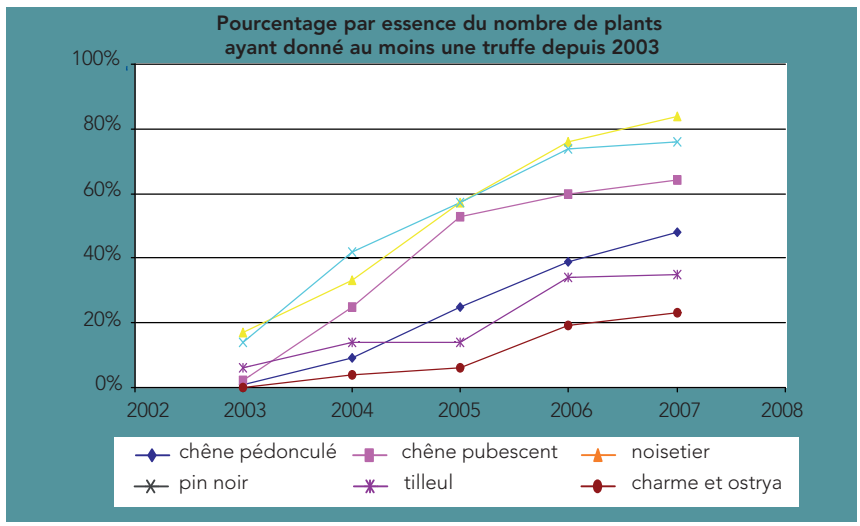


Fig. 2 : pourcentage par essence du nombre de plants ayant donné au moins une truffe depuis 2003

Un classement provisoire des essences truffières sur Champlitte

Le croisement entre le pourcentage de plants entrés en production depuis 2003 et la récolte moyenne annuelle 2003 – 2007 (figure 3) démontre l'intérêt du noisetier, du pin noir et du chêne pubescent comme essences truffières.

En revanche, deux essences doivent confirmer leur intérêt : le tilleul car son entrée en production est lente et le chêne pédonculé car sa production par plant est faible. Quant au charme et à l'ostrya, ces deux essences semblent présenter peu d'intérêt car leur entrée en production est lente et leur production faible.

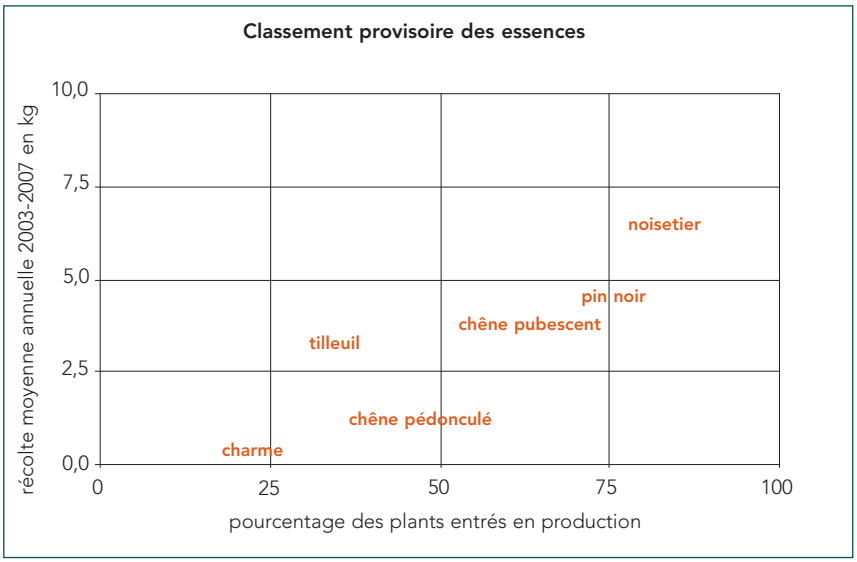


Fig 3 : classement provisoire des essences de la truffière de Champlitte

Quelques réflexions économiques

Jusqu'à présent, la commune de Champlitte n'a pas recherché une valorisation économique de sa truffière. En effet, elle a accordé par convention reconductible chaque année une autorisation de récolte des truffes à une association locale en contrepartie d'une redevance annuelle faible. Toutefois, les résultats techniques et quantitatifs de la truffière n° 1 de la commune de Champlitte permettent d'esquisser le bilan économique prévisionnel d'une truffière installée selon un itinéraire technique similaire (tableau 3).

Outre les travaux d'installation déjà évoqués, la truffière en production nécessite un entretien qui consiste en :

- fauchage annuel avant récolte, essentiellement pour faciliter la circulation dans la truffière et accessoirement pour contenir la végétation concurrente ligneuse et semi-ligneuse,
- un élagage régulier des pins, également pour faciliter la circulation et accessoirement pour gérer la concurrence entre la plantation sylvicole d'accompagnement et les essences truffières.

Cet entretien n'intègre pas les éventuels travaux de rénovation ou rajeunissement par binage (à voir d'ici 10 à 15 ans ?), ni la ou les éclaircies du peuplement sylvicole d'accompagnement qui pourraient être des opérations blanches.

Avec une récolte (minimale ?) de truffes de 20 kg/an, dont 60 % commercialisables, au prix de 300 € HT/kg, un calcul simple montre un retour sur investissement et dépenses annuelles d'entretien cumulées, autour de la 20e année suivant l'installation de la truffière.

Sur 50 ans, à l'âge d'exploitabilité du peuplement d'accueil, le propriétaire peut ainsi espérer un revenu net, frais d'administration non déduits, d'environ 1 300 € HT/ha.

Échéancier	Travaux	Coût € HT/ha
	Investissement initial	**18 000**
	dont :	
N à N + 6	• installation d'un peuplement d'accueil de pin noir à 550 tiges/ha	2 400
N + 6 à N + 7	• installation de la truffière avec 550 plants mycorhizés/ha	11 900
N + 8 à N + 18	• regarnis et entretien annuel	3 700
	Entretien et frais annuels	**1 200/an**
N + 19 à N + 50	de récolte des truffes pendant la période de production	

Tab. 3 : itinéraire technique (et coût) d'une truffière dans une plantation « sylvicole » à faible densité

Des perspectives intéressantes

Diverses études de potentialités, à partir de la géologie et de la pédologie, montrent un développement possible et important de la trufficulture sur les plateaux calcaires du Nord de la France, en Lorraine, Bourgogne, Champagne et Franche-Comté. Les techniques de mycorhization des plants, de travail du sol préparatoire à la plantation, et d'entretien de la truffière mises au point ces dernières années par l'INRA offrent des perspectives nouvelles à une trufficulture raisonnée.

Avec les connaissances et compétences acquises sur la truffière communale de Champlitte, l'agence de Vesoul peut ainsi proposer à tout porteur de projet, notamment les communes, une alternative au reboisement des friches calcicoles. L'offre commerciale de l'agence de Vesoul est présentée en deux temps :
- diagnostic écologique sur la possibilité d'implanter une truffière et avant-projet sommaire avec chiffrage du coût du projet ;
- maîtrise d'œuvre des travaux d'implantation et des premiers entretiens.

Hélène PERIER
Responsable du service Conventions
ONF, agence de Vesoul

Gérard BESANÇON
Assistant du responsable
de l'unité territoriale de Gray

Alain MACAIRE
Directeur de l'agence de Vesoul

à suivre

n° 23 - hiver 2009

Prochain numéro sans dossier

parution : février 2008

Retrouvez *RenDez-Vous techniques* sur intraforêt

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

***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

Office National des Forêts

ISSN : 1763-6442
Prix : 10 €