



Imprimé
sur papier PEFC
PEFC/10-31-1146

Institut pour
le développement forestier
Service d'utilité forestière
du Centre national professionnel
de la propriété forestière
23, av. Bosquet, 75007 Paris
Tél. 01 40 62 22 80
idf@cnppf.fr

Directeur de la publication
Roland Martin

Directeur de la rédaction
Thomas Formery

Rédactrice
Nathalie Maréchal

Conception graphique
Jean-Éric Ridonat (High'com)

Maquettiste
Marie de Grossouvre

Responsable Édition-Diffusion
Samuel Six

Diffusion - abonnements
François Kuczynski

Publicité
Helium Régie

22, rue Drouot - 75009 Paris
Tél. 01 48 01 86 86
Fax. 01 48 01 86 82

Impression
Centre Impression
BP 218 - 87220 Feytiat
Tél. 05 55 71 39 29

Numéro d'imprimeur 00100

Tous droits de reproduction ou
de traduction réservés pour tous
pays, sauf autorisation de l'éditeur.

Périodicité : 6 numéros par an
Abonnement 2007
France : 47 € - étranger : 61 €
édité par le CNPPF

ISSN : 0752-5974
Siret : 180 092 355 00015

Les études présentées dans Forêt-entreprise ne donnent que des indications générales. Nous attirons l'attention du lecteur sur la nécessité d'un avis ou d'une étude émanant d'une personne ou d'un organisme compétent avant toute application à son cas particulier. En aucun cas l'IDF ne pourrait être tenu responsable des conséquences - quelles qu'elles soient - résultant de l'utilisation des méthodes ou matériels préconisés.

Cette publication peut être utilisée dans le cadre de la formation permanente.

Dépôt légal : Juillet 2008

sommaire

2

agenda

3

éditorial

4

parutions

5

actualité

6

carnet

7

cetef

La télématique
au cœur des forêts
Louis de Corcelles

9

dossier

*Forêts et carbone :
entre doutes
et certitudes*

42

économie

Retour sur les calculs
de rentabilité
A. de Chatelperron

45

populiculture

Les besoins en eau
des peupleraies
É. Paillassa

48

gestion

La typologie des stations en
Champagne-Ardenne :
un outil de plus en plus utilisé
C. Perrier

53

équilibre sylvocynétique

Les enclos témoins :
un projet commun entre
chasseurs et forestiers
P. Blanchard

56

recherche

La qualité du bois entre
dans le programme
de sélection du pin maritime
A. Raffin, G. Chantre

60

bois-énergie

Sécher le bois de chauffage
Une réponse rapide à la
demande de bois en bûches
G. Négrié

64

étranger

Les étudiants de La Germinière
au cœur de la forêt polonaise
C. Bertrand, T. Bernardie

Photo de couverture :
© M. de Grossouvre

Université d'été de la forêt de Bourgogne

La 4^e Université d'été de la forêt de Bourgogne se déroulera le jeudi 28 août 2008 à la salle polyvalente de Saulieu (Côte-d'Or). Organisée par les Forestiers privés de Bourgogne, ABCF (Association bourguignonne de certification forestière), et l'ONF, cette 4^e Université d'été aura pour thème : « Produire plus et préserver mieux ». Au cours de cette journée, dans la continuité des Assises de la forêt, il sera principalement question du rapport entre forêts et Grenelle de l'environnement.

Renseignements et inscriptions :
tél. : 03 80 36 21 40.



Festival des forêts

La 16^e édition du Festival des forêts du 20 juin au 21 juillet fera vibrer les beaux lieux chargés d'histoire des forêts de Compiègne et de Laigue, ainsi que la magnifique église romane de Morienvall. Une marche en forêt précède l'écoute de musique pour les concerts randonnées.

Cette année aura lieu un week-end découverte du 19 au 20 juillet : volez d'arbre en arbre dans le parc « d'accro branche » en forêt, puis à la nuit tombée rêvez et dormez au cœur de la forêt dans un nid perché : il vous faudra une tyrolienne pour rejoindre votre chambre d'hôtel au sommet d'un arbre !

Renseignements et réservation au bureau du Festival des Forêts, 6 promenade des Minimes, 60200 Compiègne de 9h00 à 19h00, tél. : 03 44 40 28 99, courriel : festivaldesforets@wanadoo.fr, Site internet : www.festivaldesforets.com



Salon Habitat Bois

Le salon habitat et bois se déroulera comme chaque année à Épinal, du 18 au 22 septembre 2008. Au cœur des Vosges, une région dont l'économie est fortement liée au bois, plus de 400 exposants se tiendront à la disposition des visiteurs pour expliquer comment construire, rénover, réaménager l'intérieur ou l'extérieur de leur habitat à l'aide du bois, et aussi conseiller sur les solutions de chauffage au bois.

Renseignements auprès de Promotex, BP 30002, 57600 Forbach, tél. : 03 87 88 68 45, site : www.salon-habitat-bois.com



Forêt-entreprise, la revue technique des forêts et des arbres

Pour vous aider dans vos choix présents et futurs, pour répondre à toutes vos questions, retrouvez tous les deux mois dans Forêt-entreprise.

- Des conseils techniques de pointe en matière de sylviculture, adaptés aux besoins de la forêt privée.
- Des études de rentabilité comparée tenant compte des contraintes particulières de la forêt privée.
- Des pistes nouvelles en matière de gestion de l'environnement et de l'aménagement du territoire.
- Des témoignages ou expériences de sylviculteurs.
- Et toutes les nouveautés forestières.

Oui, je m'abonne (Tarifs 2008)

- Abonnement France 1 an - 6 numéros : 47 €
- Abonnement étranger 1 an - 6 numéros : 61 €

Raison sociale
Nom Prénom
Adresse
Code postal Commune
Tél.



Je règle par chèque libellé à l'ordre de Agent comptable SUF IDF et retourne l'ensemble (bulletin + chèque) dûment complété sous enveloppe affranchie à : SUF IDF - CNPPF, 23 avenue Bosquet, 75007 Paris, Tél. : 01 40 62 22 81.

éditorial

Forêt-entreprise consacre un nouveau dossier à la question du gaz carbonique et de la forêt, sujet qui nous place au cœur des débats sur la réduction des gaz à effet de serre et du réchauffement climatique.

Derrière un constat simple – le bois est constitué de carbone et une tonne de bois anhydre en contient cinq cents kilos – il s'agit d'une question particulièrement complexe qui nécessite une excellente expertise.

Forêt, Bois et Carbone : séquestration et substitution

Dans le débat sur le rôle de la forêt dans la réduction des gaz à effet de serre, une première objection surgit instantanément : la forêt est fragile, la pompe à carbone n'est pas permanente, ni fiable, on ne peut s'en servir pour lutter durablement contre le réchauffement climatique, rien ne peut remplacer les économies d'énergie. On répondra d'abord que les forestiers n'ont jamais eu la prétention de lutter seuls et de proposer la solution miracle contre les gaz à effet de serre, mais que la forêt contribue à cette réduction (la forêt française séquestrerait 17 % des émissions de CO₂ annuelles françaises).

*Pour ce faire, il nous faut trouver les solutions techniques pour optimiser la **fonction séquestration du carbone** tout en gérant les forêts et en produisant du bois. Nous sommes bien d'accord, il n'est évidemment pas raisonnable d'augmenter sans fin le stock de bois sur pied – que deviendrait alors notre fonction de sylviculteur si ce n'est*

celle de devenir gardien de musée – même s'il augmente de fait, faute d'un prélèvement suffisant. Mais par contre, nous pouvons et devons l'optimiser et l'exporter dans le bois mis en œuvre. L'association France Forêts a engagé des travaux dans ce sens.

Une deuxième objection nous est alors opposée : ce deuxième réservoir de carbone est lui aussi, et encore plus que le réservoir forestier, de courte durée de vie – la durée de vie moyenne de l'ensemble des produits à base de bois est estimée au maximum à 15 à 20 ans – même si sa solidité est considérée comme supérieure à celle de la forêt.

De plus, son volume est très difficile à estimer, rendant l'argumentaire en sa faveur délicat. Mais ses possibilités d'augmentation sont considérables et c'est une autre piste à suivre ; encourageons et accompagnons tout ce qui va dans ce sens !

De plus, par ses qualités propres, le bois a un avenir prometteur par le rôle très positif qu'il peut avoir en se substituant à des matériaux grands consommateurs d'énergie fossile utilisés dans la construction ou autres, comme l'acier, l'aluminium, le béton, les matières plastiques, et à l'énergie fossile.

*Le constat partagé de cette économie d'énergie par une **action de substitution** doit ouvrir de nouveaux marchés au matériau bois, augmentant ainsi, de fait, notre deuxième réservoir. Cette grande aptitude de substitution est un atout incontestable pour le bois et donc pour la forêt ; c'est la troisième piste qu'il nous faut suivre.*

Henri Plauche Gillon

Stations forestières Alpes du Nord et montagnes de l'Ain



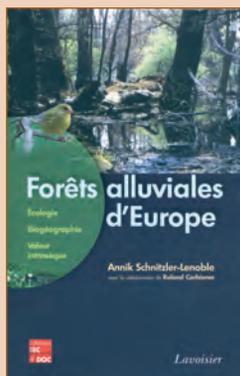
Le CRPF Rhône-Alpes vient d'éditer le premier volet d'une synthèse régionale des stations forestières : « les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain ». Cet outil opérationnel, accessible, bien illustré et transportable sur le terrain a été conçu pour tout gestionnaire de forêts.

Édité par le Centre régional de la propriété forestière de Rhône-Alpes, tél. 04 72 53 60 90, fax : 04 78 83 96 93, courriel : rhonealpes@crpf.fr

Forêts alluviales d'Europe

Mieux connaître le fonctionnement et la valeur intrinsèque des forêts alluviales d'Europe est essentiel pour aider les scientifiques, les naturalistes, les gestionnaires et les décideurs politiques à les préserver dans leur intégralité. Or, ces écosystèmes restent parmi les plus complexes et les plus riches en espèces d'Europe, et leur renouvellement dépend étroitement du système pulsé du fleuve. Cet ouvrage est une synthèse des connaissances actuelles sur les forêts alluviales, largement illustré de photos et de schémas.

Edition Tec & Doc Lavoisier. 386 pages, format 15,5 x 24 cm, 70 € ; commande possible sur www.lavoisier.fr ou à la librairie Lavoisier, 11 rue Lavoisier, 75008 Paris, tél. : 01 42 65 39 95.



La forêt française : résultats issus de la campagne d'inventaire 2005 et 2006

Un ouvrage de référence, à partir des observations et des mesures effectuées entre novembre 2004 et octobre 2006 par l'Inventaire forestier national sur environ 19 000 placettes d'inventaire dont environ 14 000 sont situées dans les forêts dont une des fonctions est la production de bois.

→ une partie consacrée aux résultats nationaux (surface, volume dont les gros bois, production, évolution, composition des peuplements, aire de répartition des principales essences, etc.) ;

→ une partie consacrée aux résultats interrégionaux avec pour chaque interrégion sa présentation générale et une double page sur les principales essences présentes. 230 graphiques, cartes et tableaux.

Format 21 x 29,7 cm. 142 pages, 19 € frais d'envoi inclus.

Disponible auprès de l'Inventaire forestier national, château des Barres, 45290 Nogent-sur-Vernisson, tél. : 02 38 28 18 00, courriel : dv@ifn.fr, site : www.ifn.fr

Gestion des habitats naturels et biodiversité



La mise en place du réseau des zones spéciales de conservation par le biais de l'opération Natura 2000, l'établissement des plans de gestion des parcs nationaux et des réserves naturelles de France, le transfert aux régions de la responsabilité de sites sensibles..., ces nombreux programmes de sauvegarde de la biodiversité nécessitent la mise en œuvre d'outils et de démarches pratiques peu intégrées dans la formation actuelle des écologistes. Cet ouvrage s'attache à l'élaboration de démarches raisonnées pour définir des modalités appropriées de gestion des habitats naturels.

Édition Tec & Doc Lavoisier. 352 pages, format 15,5 x 24 cm, 55 € ; commande possible sur www.lavoisier.fr ou à la librairie Lavoisier, 11 rue Lavoisier, 75008 Paris, tél. : 01 42 65 39 95.

PEFC édite un « Guide des achats publics à base de bois »



Réalisé pour inciter les acheteurs publics à privilégier les produits bois certifiés, issus de forêts gérées durablement, le Guide des achats publics à base de bois de PEFC France est un outil pour tous les acteurs des marchés publics qui souhaitent engager leurs collectivités et administrations dans une démarche de consommation responsable et citoyenne.

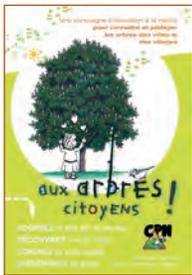
Téléchargeable sur le site de PEFC France : www.pefc-france.org

Mise en place d'une chaufferie au bois : Étude et installation d'une chaufferie au bois

La loi d'orientation sur l'énergie donne un objectif d'accroissement de 50 % de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique français. Ce guide technique (réédition actualisée) répond aux interrogations des opérateurs et utilisateurs sur l'opportunité de leur projet, et apporte une méthodologie éprouvée et des connaissances à jour.

Édité par EDP Sciences/ADEME, format 17 x 24 cm, 169 pages, 39 €, EDP Sciences, 17 avenue du Hoggar 91944 Les Ulis cedex A

Aux arbres citoyens !



La fédération des clubs CPN (connaître et protéger la nature) lance une nouvelle campagne d'éducation à la nature : « Aux arbres citoyens ! » : un ensemble d'outils techniques et pédagogiques (5 panneaux et 4 cahiers didactiques), des propositions concrètes pour mieux connaître et protéger l'arbre des villes et des villages, et autres initiatives. Un week-end est prévu les 22 et 23 novembre en partenariat avec LPO (2^e édition).

Renseignements sur le site : www.fcfn.org

ou à la maison des CPN 08 240 Boul't-aux-Bois ; tél : 03 24 30 21 90.



Marché européen du carbone

La Mission Climat de la Caisse des Dépôts, le Massachusetts Institute of Technology et l'University Collège de Dublin publient une analyse préliminaire des performances du Système Communautaire d'Échange de Quotas d'Émissions de gaz à effet de serre (SCEQE ou EU ETS) durant 3 ans (2005-2007). L'équipe de recherche est parvenu aux conclusions préliminaires suivantes : grâce à cette phase pilote, le marché européen a fourni un prix au carbone, il a facilité les réductions d'émissions, sans avoir un impact détectable sur la compétitivité de l'industrie européenne.

La synthèse est disponible sur www.caissedesdepots.fr/missionclimat/fr

ou auprès de Philippe Joyeux : 01 58 50 40 00.



Un nouveau régime forestier au Canada

Le ministre canadien des Ressources naturelles, Claude Richard, veut instaurer flexibilité, concurrence, rentabilité et décentralisation dans le système actuel de gestion de la forêt canadienne. Le gouvernement souhaite se doter d'une stratégie de développement industriel de produits à forte valeur ajoutée et encourager l'utilisation du bois dans les constructions.

25 % du marché des forêts canadiennes publiques seraient accessibles à de nouvelles entreprises en favorisant les deuxième et troisième transformations. L'objectif est la création de 15 000 emplois en exploitant les 5 millions de m³ non utilisés sur les 22 millions disponibles pour la transformation.



La pépinière expérimentale et forestière de l'État à Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) :



© Benoît Généré, CEMAGREF

La photographie publiée page 42 de notre revue 180 de mai 2008 a été prise sur le site de la pépinière expérimentale et forestière de l'État à Peyrat-le-Château (Haute-Vienne). La pépinière expérimentale et forestière de l'État à Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) a effectivement très largement contribué aux travaux d'expérimentations sur l'inoculation de mycorhizes conduits par l'Inra de Nancy et le Cemagref de Nogent sur Vernisson.

Cosylva se diversifie dans la maison en douglas

Douglas Structure (société créée en 2006) va démarrer son activité de construction de maisons en douglas grâce à une unité d'usinage de 2000 m² construite dans la Creuse. Réalisées en ossature madrier ou poteau poutres, elles répondront aux exigences environnementales. Une unité de sciage supplémentaire, équipée de séchoirs, approvisionnera en produits secs Cosylva (le leader européen du douglas collé), afin de développer son offre de douglas collé. Quinze emplois supplémentaires s'ajoutent ainsi à un effectif actuel de 80 personnes de Cosylva pour consolider un chiffre d'affaires de 12 millions d'euros.

Décès de Jean-François Piétri

Jean-François Piétri, journaliste et rédacteur en chef de la revue « Bois National » devenue « Bois International », est décédé prématurément fin mars. Il était apprécié et reconnu de tous dans la filière bois. L'IDF présente ses sincères condoléances à son épouse, à ses enfants, ainsi qu'à ses proches.

Disparition de Nicole Dufлот

Nous venons d'apprendre le décès de Nicole Dufлот, épouse d'Henry Dufлот, bien connu de nombreux sylviculteurs pour son livre sur le frêne inspiré par la forêt de la Cailleuse près de Vervins dans l'Aisne où il a réussi à concilier une sylviculture de qualité avec une forte densité de gibier. Les réunions nationales, stages techniques, séances de Cetef qui s'y sont déroulés depuis plus de 40 ans – très souvent à la demande de l'IDF – ne se comptent plus. Toujours, Madame Dufлот accueillait les visiteurs avec une gentillesse et une bonne humeur inépuisables. Nous partageons la peine de Monsieur Dufлот et de sa famille et nous leur présentons nos sincères condoléances.



Un passionné du peuplier nous a quittés

Dominique Meese est décédé le 1^{er} mai des suites de maladie.

Arrivé en 1996 dans le monde du peuplier, pour prendre en main la destinée de la célèbre peupleraie familiale du moulin de Bariteau, en Indre et Loire, il a su être le digne successeur de sa tante Françoise Meese, par son engagement total pour le développement du peuplier.

Après avoir apporté sa touche personnelle à la gestion du domaine populicole familial en informatisant le suivi de ses peupliers, avec un repérage de chaque arbre et l'organisation d'un suivi annuel de leur croissance, il a vite compris la nécessité d'une implication forte au profit de l'acquisition de la connaissance et de sa transmission. Ainsi, Dominique, tout en assurant la fonction première de sa peupleraie, la production, a ouvert sa propriété à la Recherche, au Développement et à la Vulgarisation afin de donner les moyens à chacun de travailler, tout en expliquant les besoins, les problèmes et les questions des producteurs de peuplier, utilisateurs finaux des fruits de ces travaux. Des essais cultivars, aux études sur l'enracinement des peupliers et leur résistance aux vents, en passant par l'efficacité en eau des cultivars ou les études sur les insectes du peuplier, nombreux sont les chercheurs qui ont pu travailler dans des conditions optimales pour le bien-fondé de l'acquisition des connaissances.

Mais pour Dominique, le « savoir » ne suffisait pas. Le « faire savoir » était aussi nécessaire. C'est pourquoi, il a créé localement l'association « le peuplier du Centre Val de Loire » pour informer et aider les populteurs de sa région, et mondialement le site internet « peupliersdefrance.org » pour informer les populteurs du monde entier. Ce site internet est le sien de A à Z : depuis 10 ans, il a su trier l'information, la mettre en ligne et l'actualisant sans cesse. La peupleraie du moulin de Bariteau a aussi été le lieu de nombreuses réunions de vulgarisation, Fogefor, visites de délégations étrangères au cours desquelles Dominique assurait pleinement son rôle de vulgarisateur.

Enfin son engagement passait aussi par son implication au sein du Groupe de travail peuplier de l'IDF et du Conseil National du Peuplier dont il avait pris la présidence en janvier dernier.

Tous ceux qui ont côtoyés Dominique ont pu juger de sa passion, de ces compétences, de son engagement et de sa virulence à défendre la cause du peuplier.

Eric Paillassa

Philippe de Boissieu, ancien président du Conseil National du Peuplier, a rendu hommage à Dominique Meese en l'église de Marçay (37) le 6 mai. Messieurs Hervé Droin, Eric Vandromme, vice-présidents du C.N.P. et lui-même représentaient la filière populicole.

« Permettez-moi, madame, d'exprimer toute la reconnaissance de l'ensemble de la filière populicole pour tout ce que votre mari a pu faire pour elle et dont vous avez une légitime part.

Rien, sauf des facteurs génétiques, ne le destinait à devenir populteur, mais nous avons assisté à une transformation rapide en un amateur de peupliers, je devrais dire, un spécialiste.

En peu de temps, au sein du groupe de travail peuplier de l'IDF, nous avons pu constater cette évolution. Mais cela ne lui a pas suffi, rapidement, il a pris d'autres responsabilités combien importantes pour l'ensemble de la filière.

Tout d'abord, il a assuré la défense des populteurs de la région en fondant une association dont la vitalité fait l'admiration, il a également sollicité un poste au CRPF ; ainsi il pouvait discuter efficacement avec l'administration.

Autre activité, il a mis à la disposition de la recherche INRA, GIS et l'université son domaine de Bariteau pour faire avancer nos connaissances populicoles.

Il a aussi créé un site internet qu'il alimentait avec beaucoup de compétences et qui permet de s'initier ou de compléter ses connaissances de populiculture.

Enfin il a participé activement à la création et à la vie du Conseil National du Peuplier dont il m'avait suggéré le titre et dont il avait accepté d'assurer le relai en décembre dernier.

Les activités que je viens de citer ne sont que quelques exemples des réalisations de monsieur Meese et je pourrai en citer beaucoup d'autres.

Aujourd'hui, si de très nombreux représentants de la filière sont présents, d'autres personnalités sont venus se joindre à nous pour dire un dernier adieu à monsieur Meese, ses activités n'étaient pas que techniques, le côté humain de son caractère, parfois un peu taquin, nous a tous séduits ; la gentillesse de son accueil et sa disponibilité aux autres étaient reconnus. »

Philippe de Boissieu

La télématic au cœur des forêts

Louis de Corcelles, sylviculteur en Mayenne

Les Cetefs des Pays de la Loire se proposent d'utiliser les moyens actuels via internet pour échanger des informations sur le marché du bois, les acheteurs, mais aussi pour dialoguer et favoriser la communication avec les forestiers d'autres régions.

Les forestiers des Pays de la Loire font preuve d'un dynamisme incontestable. On y trouve quatre Cetef, l'association « Le peuplier de Loire », et un groupe chêne. Dans le département de la Mayenne, l'un des moins boisés de France, les Fogefor reçoivent plus de quarante candidats à l'inscription cette année. Par ailleurs, le Cetef de la Mayenne conduit avec beaucoup de rigueur des expérimentations en liaison avec le CRPF, l'IDF et la DDAF. Les travaux effectués par les forestiers des Pays de la Loire sont centralisés à l'URPF (Union régionale des propriétaires forestiers) qui publie un bulletin semestriel, « Hauts Bois ». Ceux-ci ont conduit à la prise de conscience de deux points faibles communs à la plupart des forestiers français : méconnaissance de la valeur du bois et besoin de communication interne.

Méconnaissance de la valeur du lot de bois

Le scieur, acheteur d'un lot d'arbres sait l'usage qu'il pourra faire de chacun d'eux, le prix qu'il vendra les sciages qui en résulteront, ses coûts de fabrication ; il est donc apte à donner une évaluation précise du lot qui lui est proposé. Soyons lucides : le forestier est bien incapable d'en faire

autant. Nous abordons le marché en position de faiblesse et sommes tributaires de nos acheteurs pour les estimations. Mêmes lacunes relatives aux prix de revient, à la manière de proposer les lots (abattu débardé, etc.), à l'état du marché, et plus globalement, l'impact pour nous des évolutions technologiques et économiques mondiales.

Besoin de communication interne

Le peu que nous savons du fait de notre expérience personnelle, nous avons tendance à nous le cacher les uns aux autres. C'est le plus souvent notre acheteur qui nous informe des prix obtenus par nos voisins pour leurs lots ! Les acheteurs savent tout, l'administration fiscale aussi par le biais de la TVA et des chiffres d'affaires déclarés par les entreprises de transformation. Nous ne faisons de tort qu'à nous mêmes en nous cachant mutuellement des informations que nos partenaires connaissent.

Plus généralement, lorsque dans notre « coin » nous réfléchissons à des questions économiques, nous pouvons supposer que les mêmes travaux sont, ou ont été faits ailleurs, mais l'information ne circule pas.

Toute bonne stratégie consiste à convertir les points faibles en points

forts. Les forestiers privés des Pays de la Loire veulent y contribuer en plaçant « **la nouvelle économie** » au cœur de **nos forêts**. Dispersés sur tout le territoire, les forestiers sont prédisposés à utiliser ces outils, maintenant à la portée de tous, que sont le courrier électronique et Internet. L'utilisation des listes d'adresses mail permet à des groupes, tels les administrateurs d'un syndicat, de débattre de certains sujets de façon plus réfléchie et approfondie que dans une réunion, chacun restant chez soi au coin du feu ! L'utilisation d'Internet, en ces temps de mondialisation triomphante, nous situe au cœur des flux économiques mondiaux.

Début 2007, l'URPF des Pays de la Loire a créé un site Internet, à l'adresse **www.sylvomarket.com**. Son objet, comme ses moyens, modeste et limité, est de présenter, de façon aussi avenante que possible, les travaux qui ont été faits sur l'économie forestière dans les Pays de la Loire. Ainsi l'URPF a publié des travaux sur :

- l'abattu débardé ;
 - l'analyse des coûts entre la bille de chêne et le sciage, en vue de calculer le juste prix des bois ronds.
- En ce moment, sous l'égide du Fogefor régional, un groupe de référence « Exploitation Forestière » travaille sur l'amélioration du circuit forêt/scierie, étudiant notamment la création de plates-formes de tri et d'allotement (partage par lots).

Les Cetef de la région ont également réalisé des travaux spécifiquement économiques :

→ en Mayenne étude du prix de revient du douglas selon les types de sylviculture et les ages d'exploitation.

→ en Maine et Loire étude financière sur les plaquettes forestières.

Les forestiers peuvent exprimer aussi leurs idées et opinions personnelles, soit de façon développée dans la rubrique « idée du mois », soit plus sommairement dans le cadre des débats du « forum ».

Internet est largement utilisé par les scieurs et négociants pour revendre des grumes ; seuls les forestiers sont jusqu'à présent, restés à l'écart de ce mode de commercialisation qu'il convenait de tester. Ainsi à l'automne 2007 deux membres du CETEF de la Mayenne ont mis des lots en vente sur un site Internet, avec lequel la Fédération a conclu des accords tarifaires. La leçon de cette expérience a été tirée sur sylvomarket.com.

Les avantages d'Internet, pour la vente des lots d'arbres, sont de :

→ pouvoir mettre son lot en vente en dehors des périodes de ventes groupées (par exemple, le mois de septembre) ;

→ disposer d'une place pratiquement illimitée pour donner tous les détails souhaitables sur le lot (listes d'arbres, plans d'accès...) et sur les conditions contractuelles de la vente, qu'il est indispensable de préciser ;

→ atteindre tous les acheteurs potentiels et de faire jouer au maximum la pression de la concurrence.

L'inconvénient est, comme dans les ventes groupées, de ne pouvoir choisir l'acheteur : tout soumissionnaire, remplissant les conditions requises et offrant le meilleur prix, obtient le lot. Or le forestier peut souhaiter, même pour un prix légèrement moindre, vendre à un acheteur du voisinage dont il connaît les pratiques et avec lequel il souhaite donner à ses relations commerciales un caractère habituel. Dans mon cas, la meilleure offre a été faite par un scieur du voisinage. Mais un forestier voisin qui a fait l'expérience en même temps que moi a vendu dans une autre région.

En conclusion, Internet est particulièrement adapté pour ceux qui ne connaissent pas bien leur marché, pour des lots inhabituels, ou lorsque la demande n'est pas pressante et qu'il faut ratisser large. Il est plus opportun d'associer une offre sur Internet

à un lot abattu débardé, les acheteurs éloignés pouvant difficilement venir visiter des lots sur pied. Le courrier électronique s'est révélé un bon moyen de recueillir les soumissions : il est fiable, constitue un instrument de preuve du fait de la signature électronique, et comporte une datation par le système à la seconde près. Cela peut être un bon moyen de diffuser l'offre à une liste d'acheteurs sélectionnés.

Ainsi en mettant notre modeste savoir à la disposition d'autres, nous espérons leur apporter un peu d'aide, alimenter leur réflexion et les inciter à réagir à nos idées, à envoyer le résultat de leurs propres travaux. Au cours de cette première année de fonctionnement notre site, sans publicité ni utilisation des moteurs de recherche, a reçu, une ou plusieurs fois, la visite de **plus de 800 forestiers**. Nous souhaiterions plus de réactions sur le forum. Pourtant Internet est un espace de liberté, il ne faut pas hésiter à émettre les idées les plus paradoxales, elles stimuleront le débat ! Les forestiers ont beaucoup à échanger et nous espérons que 2008 sera une année foisonnante qui fera véritablement vivre notre site **Sylvomarket.com**. ■



Les bois raméaux fragmentés

E. Asselineau, G. Domenech
Éd. du Rouergue

Appelés « BRF », leur utilisation représente une véritable alternative pour l'agriculture de demain, en proposant une redécouverte du fonctionnement du sol basé sur le modèle de l'écosystème forestier.

Longtemps considéré comme un déchet, la branche d'arbre devient un produit de haute valeur agronomique, écologique, sociale et ouvre de nouvelles perspectives pour nourrir les sols.

190 pages, format 24 x 19,7 cm.

dossier

*Forêts et carbone :
entre doutes
et certitudes*

Dossier coordonné
par Christophe Drénou

10 Forêts et carbone : entre doutes et certitudes

Ch. Drénou

12 « Parlez-vous Carbone ? » : les principales définitions appliquées à la forêt

Ch. Drénou

22 Place des forêts dans les cycles long et court du carbone

Ch. Verati et P. Coquillard

27 Le puits de carbone de la forêt méditerranéenne : exemple d'un taillis de chênes verts à Puéchabon (Hérault)

J.-M. Ourcival

30 Les premiers résultats de l'INRA et du CIRAD

INRA

31 Incertitudes sur les stocks de carbone dans les forêts françaises

C. Nys, A. Legout, S. Lecointe, C. Walter

36 Les forêts et le carbone en question

Entretien avec V. Gitz, par Ch. Drénou

39 La forêt a aussi un rôle à jouer

Ch. Drénou

Forêts et carbone : entre doutes et certitudes

Christophe Drénou, ingénieur à l'IDF



© Christophe Drénou

« La halle de Beaumont de Lomagne (Tarn et Garonne) a été construite au XIV^e siècle. Trente-huit poteaux reposant sur des socles de pierre soutiennent, par le moyen d'une impressionnante charpente, un toit en pavillon de tuiles creuses. De forme approximativement carrée, elle a plus de 36 m de côté. »

Comment aborder le thème du carbone en forêt ? Les approches sont très différentes selon les questions posées :

→ Démarche climatologique pour évaluer le rôle des forêts sur l'effet de serre (rejet de vapeur d'eau et de CO₂, deux gaz à effet de serre, mais aussi absorption de CO₂).

→ Réflexion politique autour de la réglementation des émissions de CO₂ dans l'atmosphère (crédits carbone, compensation carbone, taxation carbone⁽¹⁾...).

→ Recherche biologique quand il s'agit de comprendre les mécanismes à l'origine des échanges gazeux en

forêt (photosynthèse, respiration, transpiration, fermentation...).

→ Expertise technologique enfin, si l'on s'intéresse aux produits issus du bois (bois construction, bois-énergie, biocarburants...).

Plusieurs de ces aspects ont déjà fait l'objet d'un dossier de Forêt-entreprise en 2006 (n°168 : « Crédits carbone : que fait la forêt ? »). Depuis, de nombreuses publications et divers colloques ont apporté des éclairages nouveaux, sans toutefois donner de réponses aux questions initiales. Ces dernières apparaissent au contraire encore plus complexes aux yeux des scientifiques et des professionnels.

Il nous a donc semblé utile d'entreprendre une nouvelle mise au point en alertant les lecteurs sur les niveaux d'incertitudes de nos connaissances et par conséquent sur tout ce qui est démontré, ainsi que sur tout ce qui relève du domaine des hypothèses.

Ce dossier se place en amont de la question du carbone en forêt et privilégie de ce fait les données d'ordre biologique. Plusieurs organismes de recherches ont contribué à cette synthèse : l'université de Sophia-Antipolis (Nice), le CNRS de Montpellier, L'INRA de Nancy et le Cired (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement). Les

chercheurs y présentent leurs résultats et nous font part de leurs doutes. Les forêts sont aujourd'hui en situation de puits de carbone. Mais ce comportement n'est pas naturel. Nul ne sait combien de temps il durera. Comment réagiront les forêts au changement climatique ? Cela va dépendre des paramètres climatiques, de la capacité de rétention en eau des sols, des exigences et des adaptations physiologiques des essences elles-mêmes (*lire l'article de Vêrati et Coquillard dans ce dossier*). Les forêts stockent du carbone, c'est indéniable, mais en quelle quantité ? Au niveau d'un peuplement, on ne peut pas établir d'équivalence automatique entre la fixation de carbone résultant de la croissance d'une forêt et la séquestration de carbone dans ce même écosystème (*lire l'article d'Ourcival et Rambal dans ce dossier*). De plus, selon Claude Nys et son équipe, les extrapolations des mesures de carbone à l'échelle du peuplement vers celle de la région sont actuellement entachées d'une erreur élevée, probablement supérieure à 65 %.

Il est prouvé que les forêts non gérées (en réserves intégrales) séquestrent davantage de carbone que les forêts exploitées. Certes, les produits du bois permettent d'allonger le temps de séquestration du carbone, mais la durée de vie des matériaux en bois est aujourd'hui insuffisante. À long terme, l'effet de substitution du bois aux matériaux énergivores (comme l'acier, le béton et l'aluminium⁽²⁾...) est-il plus prometteur que la séquestration du carbone en forêt (*voir l'entretien avec Vincent Gitz*) ?

Le carbone est un sujet sur lequel prolifèrent, via Internet ou d'autres médias, quantités de confusions et d'opinions relevant autant de l'affect, de la peur ou de phénomènes irrationnels, que d'intérêts politiques ou économiques. Aussi, avant de laisser s'exprimer les spécialistes sollicités pour ce dossier, il nous est paru sensé d'expliquer les principaux termes et concepts utilisés.

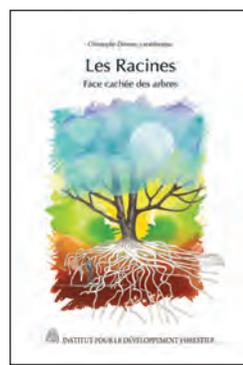
Pour conclure ce préambule, laissons la parole à Philippe Ciais, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et

de l'environnement et membre du Giec (Groupe d'experts intergouvernementaux sur le climat) : « *Le problème de l'effet de serre me fait penser à une fuite dans un bateau. Favoriser les puits de carbone revient à pomper l'eau : c'est utile, mais il faut en même temps colmater la brèche, c'est-à-dire dans notre cas, réduire nos émissions de CO₂* ». ■

(1) Au sujet de la taxation carbone, se reporter à l'article d'Yves Martin paru en page 56 du numéro 178 de Forêt-entreprise.

(2) Pour sa production le bois nécessite :

- 4 fois moins d'énergie que le béton ;
- 60 fois moins d'énergie que l'acier ;
- et 130 fois moins d'énergie que l'aluminium. (Source : CTBA-FCBA).



Les Racines, face cachée des arbres

Ch. Drénou, coordinateur

12 spécialistes se sont réunis pour rédiger une synthèse vivante et attractive sur cette autre moitié des arbres : les racines. Cet ouvrage, premier du genre en langue française, est constitué de trois parties. La première fournit les connaissances essentielles en biologie des racines fines, des micro-organismes associés et des racines ligneuses. La deuxième présente les sols sous l'angle de l'ancrage racinaire, de l'alimentation en eau et de la nutrition minérale des arbres. La troisième est consacrée aux applications pratiques transposables en forêt, dans les parcs et en milieu urbain : qualité des racines, soins aux racines, compétition racinaire herbe-arbres, technique du mulching, dégâts racinaires causés aux infrastructures, etc.

Tableau de conversion et abréviations utilisées dans le dossier

1 mégatonne (Mt)	1 000 000 tonnes (t)
1 gigatonne (Gt)	1 000 000 000 tonnes (t)
1 mole de CO₂	44 g (1 mole de carbone pèse 12 g et 1 mole d'oxygène pèse 16 g)
1 tonne de CO₂	0,273 tonne de carbone (tC)
1 tonne de carbone (tC)	3,663 tonnes de CO ₂
1 tonne de bois anhydre	50 % de carbone + 6 % d'hydrogène + 42,5 % d'oxygène + 0,5 % d'azote + 1 % d'autres molécules
1 m³ de bois	= 700 kg (à 20 % d'humidité) = 560 kg (anhydre) = 280 kg de carbone Brûlé ou biodégradé, 1 m ³ de bois émet 1 tonne de CO ₂

Mole : la mole est une unité de comptage (au même titre que la « vingtaine » ou la « douzaine », à la différence près que la mole d'atomes contient environ $6,022 \times 10^{23}$ atomes).

« Parlez-vous Carbone ? » : les principales définitions appliquées à la forêt

Christophe Drénou, ingénieur à l'IDF

Dans un cycle, il n'y a ni puits, ni source. Un flux de carbone entrant par photosynthèse ne suffit pas pour avoir un puits de carbone. Stocks et puits ne sont pas nécessairement corrélés. Un puits a un flux net négatif. Explications.

La question du carbone en forêt est particulièrement complexe. Parcelle forestière, peuplement, forêt française, Europe ou échelle planétaire, le CO₂ n'a pas de frontières. Comment étudier ce gaz invisible ? À quel pas de temps ? Les méthodes utilisées par les chercheurs sont diverses : tour à flux (*photo*), inventaire forestier, traçage isotopique... Des incertitudes importantes pèsent encore sur les chiffres et des intérêts économiques compliquent la situation. Sur un tel sujet, il faut avant tout s'entendre sur les termes et concepts utilisés. Revenons aux définitions biologiques.

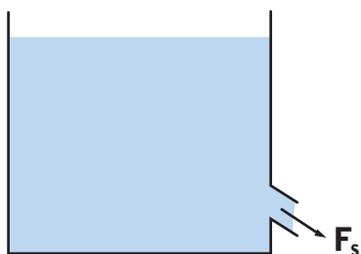


Détail d'une tour à flux.

© CRPF PACA

Source de carbone

Figure 1 : Schématisation d'une source de carbone qui se vide en raison d'un unique flux sortant (F_s)



Exemple : les ressources pétrolières mondiales.

Une source de carbone est un processus par lequel un réservoir de carbone se vide au cours du temps. Exemple : la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole) et la production de ciment⁽¹⁾ sont des sources de carbone. Si les tendances de consommation actuelle se maintiennent, les réservoirs de pétrole seront épuisés dans un avenir proche (40 à 50 ans, mais les chiffres sont encore largement discutés). Les émissions annuelles mondiales dues à la combustion des énergies fossiles et à la cimenterie sont de : 7,2 GtC/an \pm 0,3 (moyenne 2000-2005 ; Giec, 2007). Elles sont passées

à plus de 8,0 GtC/an en 2005-2006 (D. Loustau, communication pers.). Celles de la France sont estimées à 0,112 GtC/an ce qui la place en 4^e position des émetteurs européens, après l'Allemagne (0,230 GtC/an), la Grande-Bretagne (0,157 GtC/an) et l'Italie (0,127 GtC/an) (AIE, 2005). Autre source de carbone importante : le changement d'affectation des terres, c'est-à-dire le changement dans l'utilisation ou l'aménagement des sols qui entraîne une modification de la couverture terrestre. Ces changements sont dominés par deux sources de carbone : la déforestation des pays

Tableau 1 : Émissions de carbone dues au changement d'affectation des terres et à la combustion des énergies fossiles

	Émissions de carbone (en MtC)	
	Changement d'affectation des terres au cours de l'année 2000	Combustibles fossiles au cours de l'année 2005
Brésil	400 (a) Source principale : déforestation	98 (b)
Indonésie	400 (a) Source principale : drainage des tourbières	98 (b)
Afrique tropicale (46 pays)	383 (a) Source principale : déforestation	185 (b)
France	0,36 (c) Source principale : incendies	112 (b)
Monde	1 600 (d)	7 200 (c)

Sources bibliographiques :

(a) : Houghton, 2003 - (b) : AIE, 2005 - (c) : Chevrou, 2005 (émission de carbone due aux incendies en 2003) - (d) : Giec, 2007 (moyenne annuelle 2000-2005).

tropicaux et le drainage des tourbières. La principale cause de destruction de ces écosystèmes est l'expansion des cultures à vocation alimentaire conjuguée à la production de biocarburants. Au Brésil, la progression de la culture de canne à sucre, utilisée comme biocarburant de première génération, aboutit à déplacer les plantations de soja et les pâturages vers des terres jusqu'alors occupées par la forêt amazonienne. En Indonésie, le drainage des tourbières est motivé par la plantation de palmiers à huile, source de biocarburant, mais aussi par les boisements en acacias ou en eucalyptus. L'assèchement des tourbières conduit à stimuler l'activité bactérienne de décomposition de la matière organique, d'où l'émission de quantités importantes de CO₂ dans l'atmosphère. On estime que le changement d'affectation des terres est responsable au niveau mondial de l'émission dans l'atmosphère de 1,6 GtC/an (0,5 à 2,7 - Giec, 2007). La moitié provient de la mise en culture des tourbières soit davantage que les émissions liées à la déforestation, alors que les tourbières ne couvrent que 3 % des terres du globe.

Dans les pays concernés, l'émission de carbone due au changement d'affectation des terres dépasse très souvent celle engendrée par la combustion des énergies fossiles (Tableau 1). Notons que le Brésil et l'Indonésie à eux deux comptent pour 50 % de la quantité totale de carbone émise par les changements d'affectation des terres.

■

Puits de carbone

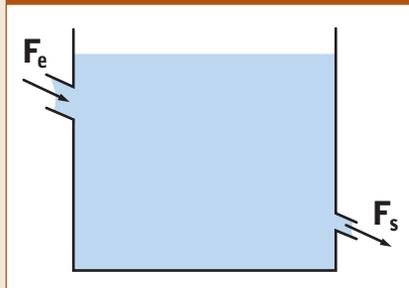
Un puits de carbone est un processus par lequel un réservoir de carbone se remplit au cours du temps. Exemple : les océans. Entre l'air et l'eau, le CO₂ ne fait pas beaucoup de différence. Il migre facilement de l'un à l'autre, cherchant à occuper ces deux milieux de la manière la plus uniforme possible. Quand la teneur atmosphérique en carbone augmente – ce qui est le cas depuis des décennies – l'océan tend à absorber le surplus pour rétablir l'équilibre. D'autant plus soluble dans l'eau que celle-ci est froide, le CO₂ est capturé en grandes quantités par les

eaux des pôles, pour être ensuite entraîné vers les profondeurs. Des siècles après, lorsque les eaux arrivent dans les zones intertropicales, elles se réchauffent et deviennent sursaturées en CO₂, lequel retourne alors à l'atmosphère. Néanmoins, au cours de ce trajet, aussi appelé « tapis roulant océanique », une partie du carbone dissout dans l'eau est directement consommée par le phytoplancton puis, par le jeu de la chaîne alimentaire, par les autres organismes marins. La matière organique produite (déchets, cadavres...) est en partie recyclée dans les eaux de surface, et l'atmosphère. Toutefois, environ un dixième de cette masse organique est exportée sous forme de sédiments carbonatés vers les eaux profondes où le carbone séjournera pour des temps géologiques (Lethé, 2007).

L'océan contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère et cette teneur augmente de 2,2 GtC ± 0,5 par an, soit entre 19,3 et 30,7 % des émissions mondiales de carbone (moyennes 2000-2005, Giec, 2007).

Remarque : l'atmosphère se remplit chaque année de 4,1 GtC ± 0,1 (Giec, 2007). À ce titre, il pourrait être considéré comme un puits de carbone. Dans la pratique, c'est toujours relativement au réservoir atmosphérique que sont définis les termes de sources et de puits.

Figure 2 : Schématisation d'un puits de carbone qui se remplit en raison d'une différence positive entre le flux entrant (F_e) et le flux sortant (F_s)



Exemple : l'océan.

Flux de carbone

La notion de flux est très générale et apparaît dès que l'on cherche à caractériser le transport de substances physiques, chimiques ou biologiques par un fluide en mouvement (l'eau ou l'air). Elle est utilisée en météorologie, en électromagnétisme, en optique, en biologie et même en économie. Le terme « flux de carbone » sert à désigner le transport d'une quantité de carbone durant un intervalle de temps donné. Il est exprimé en masse de carbone par unité de temps (par exemple en tC/an). Le plus souvent, on ne mesure que le poids du carbone, pas celui des autres atomes présents à ses côtés, pour pouvoir faire des comparaisons et calculer les échanges. Pour le CO₂ par exemple, on ne compte pas les deux atomes d'oxygène. Une tonne de CO₂ est alors comptabilisée comme 0,273 tonne de carbone. Le carbone peut sortir d'un réservoir (flux sortant) et aussi y entrer (flux entrant). On appelle flux net la différence entre le flux sortant et le flux entrant.

Flux net = flux sortant - flux entrant

Par convention, une source de carbone vers l'atmosphère correspond à un flux net positif (sortant > entrant). Inversement, un puits de carbone correspond à un flux net négatif (entrant > sortant). Attention, dans la littérature, le terme de « flux » est souvent utilisé seul à la place de « flux net » et son signe n'est pas précisé, ce qui ne facilite pas la compréhension. Exemple : « à la fin d'un cycle forestier, le flux de carbone diminue car il y a moins d'arbres à l'hectare ». Si l'auteur a voulu exprimer une baisse de l'efficacité du puits de carbone forestier, il aurait dû écrire : « le flux net de carbone augmente » ou « le flux net, en valeur absolue, diminue » ! Nous

verrons par la suite que cette citation comprend aussi une confusion entre « flux » et « stock » car si le nombre d'arbres baisse, c'est le stock de carbone qui décroît et non pas le flux net.

En forêt, la quantification des flux se fait par mesure des fluctuations turbulentes dans l'air avec des capteurs positionnés au dessus du couvert (tour à flux), ce qui permet de connaître en continu les échanges de masse ou d'énergie (CO₂, H₂O...) entre l'écosystème et l'atmosphère. L'estimation des flux par le suivi des variations du diamètre des arbres donne des résultats beaucoup moins précis et bien inférieurs à la réalité. L'accroissement moyen des tiges ne permet pas de comptabiliser les réserves internes des arbres (amidon riche en carbone). Il ne peut qu'estimer très grossièrement le sous-étage d'une forêt ou les systèmes racinaires et ignore le plus souvent le carbone des sols.

Cycle du carbone

En biochimie, un cycle est l'ensemble des transformations subies par un système le ramenant à son état initial. Exemple : le cycle de l'eau. Si l'on considère dans ce cycle, les deux réservoirs que sont l'atmosphère et la partie terrestre (continents et océans), les échanges d'eau sont permanents, et les contenus des réservoirs sont

stables. Les quantités évaporées sont égales aux précipitations. Aussi bien pour l'atmosphère que pour la terre : flux d'eau entrant = flux d'eau sortant (CNRS, 2004).

Dans un cycle à l'équilibre, il n'y a ni puits, ni source : aucun réservoir ne se remplit et aucun ne se vide, les contenus sont stables quelles que soient les quantités échangées entre eux. Peut-on alors parler de cycle du carbone ? Oui pour une période de 1 000 ans avant l'ère industrielle durant laquelle la quantité de carbone atmosphérique est restée constante. Dans ce cycle, quelque 90 GtC/an sont échangées dans les deux sens, entre l'océan et l'atmosphère, et 120 GtC/an entre la biosphère terrestre et l'atmosphère. Parmi ces dernières, 60 GtC/an sont immédiatement oxydées (respiration des végétaux et des animaux), et 60 GtC/an sont incorporées dans la végétation sous forme de biomasse, celle-ci étant à terme délivrée aux compartiments de litière et des sols (mortalité de la végétation) puis in fine retournée à l'atmosphère (oxydation de la matière organique du sol) (Petit *et al.*, 1999).

Chaque année, entre un quart et un tiers du contenu atmosphérique en CO₂ est ainsi dirigé vers d'autres réservoirs, et en retour, une quantité équivalente provenant de ces réservoirs revient à l'atmosphère. Le temps de transition du CO₂ dans ces réservoirs varie entre quelques heures

Figure 3 : Schématisation du cycle de l'eau entre l'atmosphère et la partie terrestre

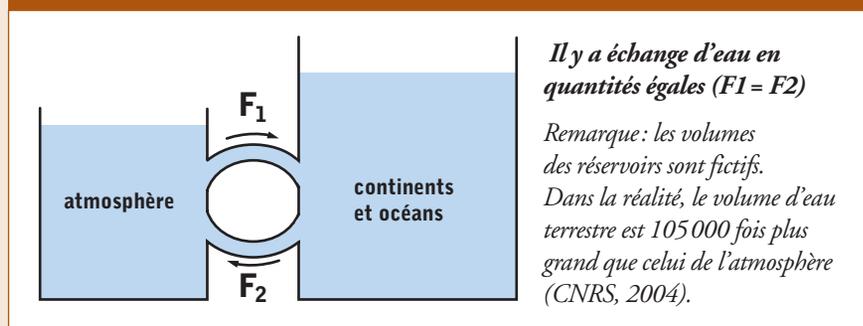
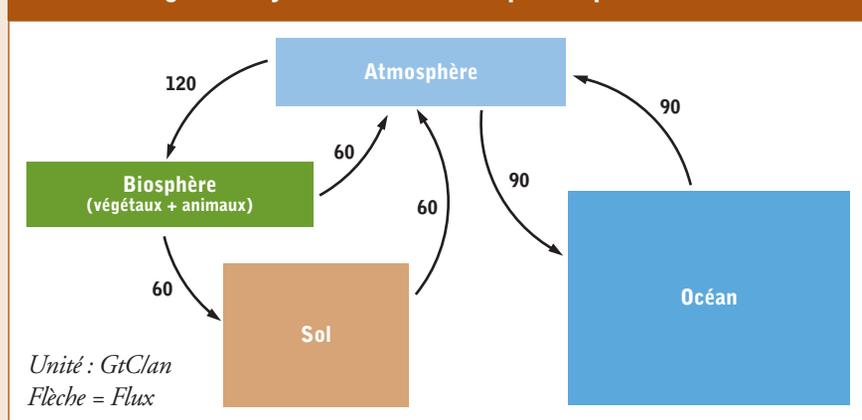


Figure 4 : Cycle du carbone à l'équilibre préindustriel



(respiration des plantes), plusieurs années (cycle plante-sol) ou plusieurs décennies (transport océanique). Le CO_2 atmosphérique présente donc une vitesse de renouvellement extrêmement rapide : en cinq ans, toutes les molécules de CO_2 de l'atmosphère sont recyclées en étant dirigées vers d'autres réservoirs.

Les activités de l'homme (déforestation, combustion des énergies fossiles⁽²⁾, cimenterie...) sont venues perturber ce cycle en créant artificiellement des sources de carbone. Celles-ci ont provoqué le basculement du réservoir-océan de l'état stable vers celui de puits. La biosphère a également réagi en devenant un puits de carbone, mais hélas, la totalité des puits ne compense pas les sources de carbone et un nouvel équilibre ne peut être atteint. Résultat : une augmentation de la concentration du CO_2 dans l'atmosphère de $4,1 \text{ GtC/an} \pm 0,1$ (moyenne 2000-2005, Giec, 2007). On peut donc dire qu'aujourd'hui le cycle du carbone est perturbé par l'homme.

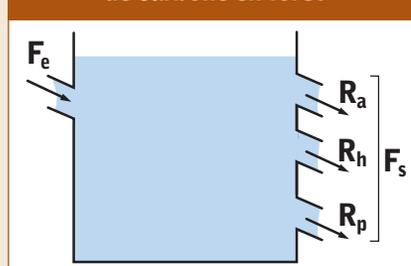
Flux de carbone en forêt

Un écosystème forestier compte un unique flux de carbone entrant (la photosynthèse) et trois flux sortants principaux : R_a , R_h et R_p . R_a est le flux issu

de la respiration autotrophe, processus oxydatif de transformation de l'énergie nécessaire au métabolisme des végétaux. La respiration hétérotrophe (R_h) est celle des décomposeurs animaux qui se nourrissent de la litière (feuilles, racines, arbres morts...), ainsi que celle de l'activité microbienne des sols. Les forêts sont soumises à des perturbations périodiques de nature sylvicole (éclaircies, récoltes, élagages...) ou imprévisibles (tempêtes, incendies, maladies...). Les émissions de CO_2 correspondantes (oxydation des rémanents et combustion des végétaux) sont intégrées dans le flux R_p (« p » pour « perturbations »).

La différence entre le flux entrant et la totalité des flux sortants est-elle positive ? La forêt est-elle un puits de carbone ?

Figure 5 : Schématisation des flux de carbone en forêt



F_e = photosynthèse (flux entrant).

R_a = respiration autotrophe.

R_h = respiration hétérotrophe.

R_p = perturbations sylvicoles, climatiques et parasitaires.

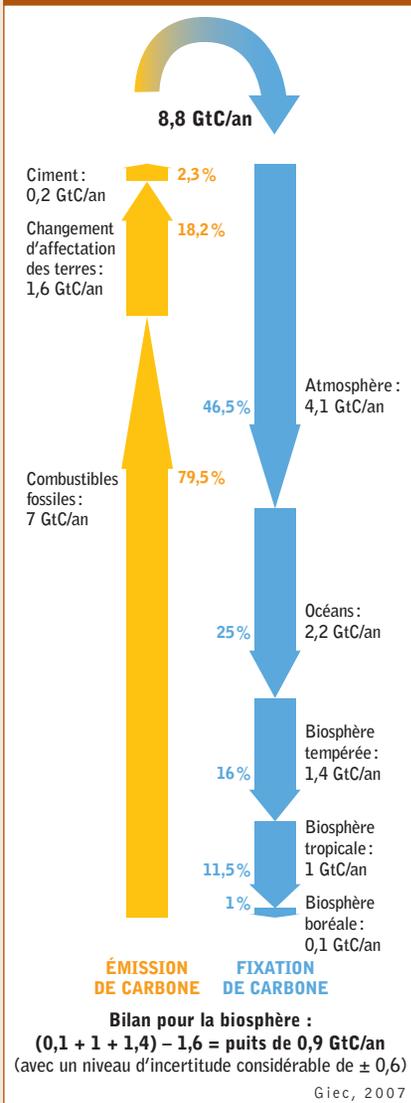
F_s = somme des flux sortants.

Tout dépend du moment considéré au cours d'un cycle de vie forestier. La fixation du carbone (flux entrant – flux sortants) suit une courbe en forme de « S » en partant de valeurs négatives (source de carbone). En effet, après une coupe, un incendie ou une tempête, la forêt rejette du carbone du fait de la minéralisation des débris organiques laissés au sol, rejet que ne compense pas la fixation de carbone par les jeunes arbres, ce qui donne un bilan négatif. Celui-ci ne devient positif qu'après un laps de temps variable, de 2 à 10 ans pour les essences à croissance rapide comme le pin maritime, plusieurs dizaines d'années pour certaines forêts boréales. Puis la fixation diminue avec le vieillissement des arbres.

À l'échelle d'une année également, les quantités de carbone fixées par un peuplement adulte ne sont pas réparties uniformément. Au printemps, le rayonnement augmente plus rapidement que la température du sol et la photosynthèse est nettement supérieure à la respiration, l'écosystème fixe alors plus de carbone qu'il n'en perd. En été, la photosynthèse et la respiration sont sous le contrôle de la quantité d'eau disponible et l'écosystème séquestre en général peu de carbone. En automne, la respiration du sol peut être supérieure à la photosynthèse car le sol est à la fois chaud et humide, la forêt peut alors être une source de carbone (Ourcival et Rambal, voir article dans ce dossier).

En synthétisant les résultats obtenus sur un ensemble de 20 écosystèmes forestiers d'Europe et d'Amérique, les chercheurs ont calculé la valeur moyenne de fixation du carbone (flux entrant – flux sortants) au cours d'un cycle de vie complet d'une forêt (Magnani et al., 2007). Ils ont montré que cette valeur moyenne est égale à 56 % des valeurs maximales de fixation de la forêt adulte. Ce qui signifie que l'on surestime le puits de carbone

Figure 6 : Répartition des flux de carbone à l'échelle du globe



en le mesurant ponctuellement sur une forêt adulte. En France, ce bilan moyen des flux (entrée – sortie) est estimé entre 2 et 4 tC/ha/an⁽³⁾.

Or, la photosynthèse de la végétation absorbe en France entre 10 et 25 tC/ha/an. Le rendement de la fixation du carbone varie donc autour de 15 %. La respiration autotrophe (Ra) représente généralement 50 à 55 % du flux entrant. La respiration hétérotrophe (Rh), de l'ordre de 25 %. Quant à Rp, très dépendante des types de forêts et de sylvicultures, sa valeur oscille autour de 10 % (Loustau, 2004).

À l'échelle de la planète, l'efficacité de la biosphère à fixer du carbone est beaucoup moins grande. Au total, 0,9 GtC/an ($\pm 0,6$) serait fixée par la biosphère, soit entre 3,4 et 17 % (noter le niveau d'incertitude) de nos émissions de carbones fossiles (Giec, 2007). D'après les études les plus récentes, les forêts tempérées, tropicales et boréales ne sont pas identiques en termes de puits de carbone. La zone tempérée est le puits le plus performant (flux entrant – (Ra + Rh) = 1,44 tC/ha/an en moyenne). Celui des régions boréales est beaucoup plus faible (0,10 tC/ha/an en moyenne), et la ceinture tropicale est

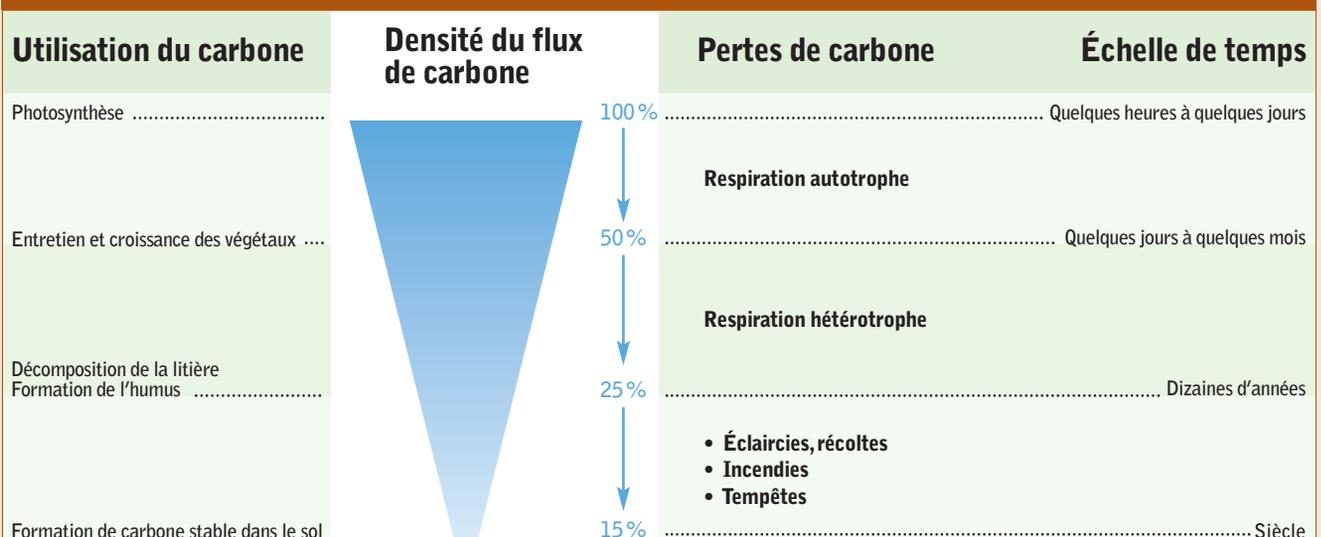
intermédiaire (0,96 tC/ha/an en moyenne) (Stephens *et al.*, 2007). Comme nous l'avons vu, si les forêts se comportent comme des puits, ce n'est pas naturel. Les raisons (liées aux activités humaines) sont doubles. D'une part, l'enrichissement en CO₂ atmosphérique permet à la photosynthèse d'augmenter le flux entrant de carbone. D'autre part, les pollutions industrielles engendrent des dépôts azotés dans l'air et les sols et jouent un rôle de fertilisation en stimulant la synthèse des protéines et donc la fixation du carbone dans la biomasse.

Réservoirs et stocks de carbone

Un stock de carbone représente une masse de carbone capitalisée dans un écosystème ou dans des biens artificiels. Ne pas confondre réservoir et stock. Le réservoir est le contenant, le stock est le contenu en carbone mesuré à un instant donné.

À l'échelle de la planète, on compte plusieurs réservoirs de carbone. Certains sont liés aux processus biologiques discutés plus haut (photosynthèse,

Figure 7 : Destination des flux de carbone au cours d'un cycle de vie complet d'une forêt française (Schématisation d'après Schulze and Heimann, 1998 avec les chiffres de Loustau, 2004)



respiration⁽⁴⁾). D'autres se sont constitués à partir de processus géologiques. Exemples : les roches sédimentaires et les combustibles fossiles. Voir tableau 2 (d'après Balesdent, 1998 et Gitz, 2004).

Les réservoirs associés aux forêts sont de trois types : le sol (litière + humus + horizons minéraux), la biomasse (aérienne et racinaire) et les produits du bois.

Le compartiment « sol » compte pour 40 à 80 % du carbone total des forêts avec cependant d'importantes variations selon les régions du monde. On remarquera, en ce qui concerne la forêt française, des valeurs très différentes selon les auteurs. Liski *et al.* (2002) ont estimé le carbone du sol à une profondeur de 20 cm à partir d'un modèle, tandis que Dupouey *et al.* (1999) ont utilisé la base de données du réseau européen (16 x 16 km) de suivi des dommages forestiers sur une profondeur de 30 cm.

On peut constater que les stocks ne sont pas liés aux flux nets. Ainsi la forêt boréale présente un stock à l'hectare 2,5 fois plus élevé que celui de la forêt tempérée alors que son flux net, en valeur absolue, est 10 fois moindre. Ce paradoxe s'explique aisément. Les stocks se sont constitués au cours des temps géologiques (périodes glaciaires et interglaciaires) alors que les flux nets enregistrés aujourd'hui sont récents et dus aux activités humaines (anthropiques). Les stocks sont naturels, les flux nets sont anthropiques. Quelles que soient les conditions pédo-climatiques, les peuplements non gérés présentent des stocks de carbone plus importants que les forêts gérées. Toute la question est de savoir si les forêts gérées stockent plus de carbone – en ajoutant les produits du bois et en tenant compte du rendement matière de leur transformation, de la durée de vie des produits obtenus et de leur recyclage en fin de vie.

Tableau 2 : Localisation des stocks de carbone sur le globe

Localisation des réservoirs		Nature des stocks
Atmosphère		•CO ₂ •CH ₄ (méthane)
Océan de surface (0-100 m)		•CO ₂ dissout
Océan profond		•Bicarbonates et carbonates (minéraux contenant l'ion CO ₃ ²⁻) •Hydrates de méthanes piégés dans la glace (les clathrates)
Biosphère (animaux, végétaux, sols)		•Matières organiques vivantes et mortes
Tourbières		•Matières organiques en situation d'engorgement hydrique permanent
Permafrost (ou pergélisol : sol perpétuellement gelé)		•Matières organiques •Hydrates de méthane piégés dans la glace (les clathrates)
Lithosphère (partie superficielle de la Terre)	Combustibles fossiles	•Charbon •Pétrole •Gaz naturel
	Roches carbonatées et sédimentaires	•Calcaires •Dolomies •Grès •schistes

Tableau 3 : Répartition des stocks de carbone en forêt

	Stocks de carbone (tC/ha)			Source
	Biomasse	Sol	Total	
Forêts boréales	64,2	343,8	408	Giec, 2000
Forêts tropicales	120,4	122,7	243,1	
Forêts tempérées	56,7	96,1	152,8	
Forêts françaises	71,2	79	150,2	Dupouey <i>et al.</i> , 1999
	52	35	87	Liski <i>et al.</i> , 2002

Figure 8 : Schématisation des flux et stocks de carbone en forêts tempérées et boréales.

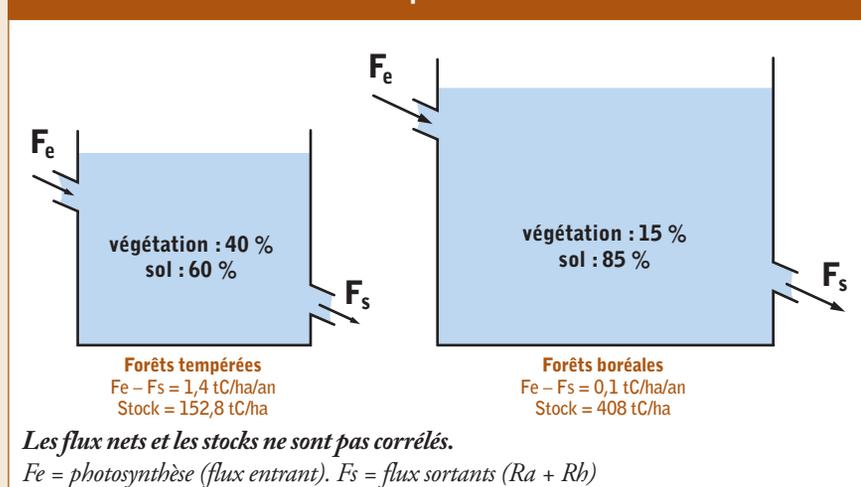


Tableau 4 : Comparaison des stocks de carbone entre peuplements gérés et non gérés

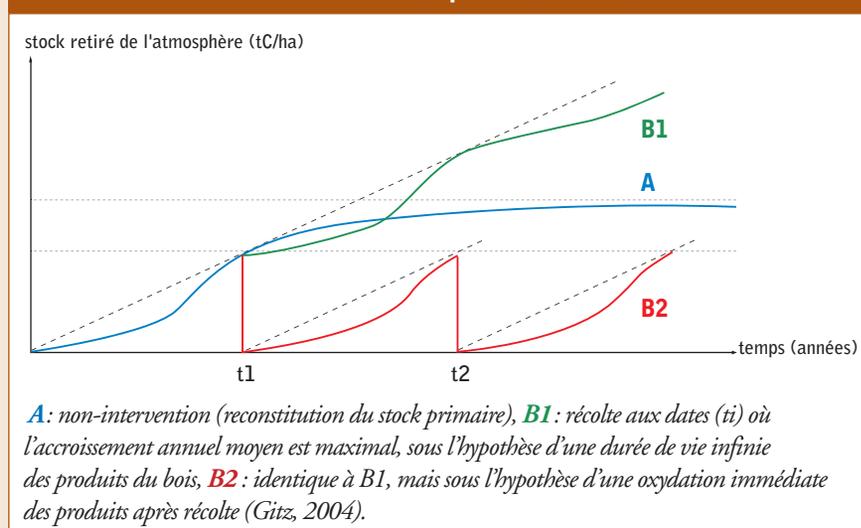
	Stocks de carbone (tC/ha)	
	Forêt non gérée	Forêt gérée
Zone tempérée		
Forêt naturelle (450 ans) de Douglas versus plantation (60 ans), Canada	612 -	- 259 - 274
Forêt tempérée feuillue versus plantation (80 ans), Europe	380 -	- 230
Hêtraie naturelle, Slovaquie versus hêtraie de production (150 ans)	290 -	- 137
Forêt de hêtres non gérée depuis 40 ans versus futaies régulières de hêtre (30 à 150 ans), Allemagne	345 -	- 235
Zone boréale, forêts non gérées versus gérées (100-150 ans)		
Forêt de pins	190	99
Forêt d'épicéa	169	93
Forêt de bouleaux	130	78

Source: WBGU, 1998 et Mund et Schulze, 2006.

Tableau 5 : Durées de vie des produits bois

	Durée de vie en France (selon Prieur, 2004)	Durée de vie apparente ⁽⁵⁾ (selon Vallet, 2005)
Construction	40 ans	9,1 ans
Ameublement	20 ans	8,5 ans
Emballage	7 ans	3,9 ans
Papier / carton	2 ans	26 mois
Énergie	1 an	20 mois

Figure 9 : Acceptations concurrentes du carbone retiré de l'atmosphère par la gestion d'un hectare de forêt, en fonction des hypothèses sur le devenir des produits du bois



Autrement dit, pour séquestrer du carbone, vaut-il mieux exploiter la forêt et garder le bois pendant un certain temps, ou constituer des réserves forestières et laisser le bois sur pied ? La fonction puits de carbone résultant d'un schéma de gestion est à son maximum en même temps que la production de bois, c'est-à-dire pour des récoltes s'effectuant aux dates où l'accroissement annuel moyen est maximal (Figure 9). Avec une hypothèse théorique de durée de vie infinie des produits du bois, il n'y aurait pas de limite supérieure à la quantité stockée par un hectare de forêt, puisque le bois s'accumulerait, récolte après récolte, sans s'oxyder. À l'opposé, si les produits du bois avaient une durée de vie nulle, alors le stock cumulé retiré de l'atmosphère serait à son maximum si la forêt était transformée en sanctuaire. Comment déterminer les conditions sous lesquelles l'établissement d'une filière forestière, contrôlant durée de rotation et durée de vie des produits, est un meilleur puits de carbone que l'établissement d'une réserve forestière ?

Pour répondre à cette question Gitz (2004) a utilisé une analyse théorique simple à trois variables :

- la durée de rotation ;
- l'accroissement annuel du stock de carbone ;
- et la durée de vie des produits du bois.

Le carbone du sol a été exclu de l'analyse. Dans le cadre de ce modèle très simple, la filière gérée conduit à séquestrer plus de carbone que la forêt sanctuaire si et seulement si les produits du bois ont une durée de vie supérieure à 40 % de la durée de rotation. En France, il faudrait considérablement augmenter la durée de vie moyenne des produits du bois pour qu'une telle condition soit vérifiée. Entre les trois compartiments d'une forêt : sol, biomasse et produits bois,

Équivalence entre 1 m³ de bois et 1 tonne de CO₂

« Grâce à la photosynthèse, pour produire 1 m³ de bois, l'arbre absorbe 1 tonne de CO₂ ». Cette affirmation trouvée dans de nombreuses publications de vulgarisation forestière est fausse...

Il est vrai qu'en moyenne 1 m³ de bois renferme 0,273 tonne de carbone, et si ce m³ est brûlé ou biodégradé, il émettra 1 tonne de CO₂. En revanche, combien de tonnes de CO₂ la forêt a-t-elle absorbées pour produire 1 m³ de bois ?

1 m³ de bois dans la biomasse aérienne (équivalant à 0,273 tonnes de carbone) ne peut se constituer que si 2 à 3 fois plus de carbone sont présents dans l'écosystème (soit : $0,273 \times 3 = 0,819$ tonnes de carbone). Le bois ne peut en effet se former sans l'activité biologique du sol et des racines. Or le carbone qui reste fixé dans une forêt correspond à environ 15 % du flux atmosphérique entrant par photosynthèse (voir figure 7). Il faut donc environ 20 tonnes de CO₂ (5,5 tC) pour produire 1 m³ de bois : $(0,819 \times 100)/15 = 5,46$ tonnes de carbone.

Autrement dit, avec la tonne de CO₂ émise par la combustion d'1 m³ de bois, une forêt ne peut fabriquer qu'un vingtième du cube initial (0,05 m³ soit un cube de 36 cm de côté).

ces derniers constituent le plus petit réservoir en raison des pertes importantes lors des premières et deuxième transformations (en France, seul un tiers du volume de bois exporté de la forêt est transformé en produits finis), et aussi parce que les produits du bois ont une très courte durée de vie. Selon Vallet (2005), la part des produits du bois varie entre 3 et 4 % de l'ensemble des stocks d'une futaie régulière de hêtres en France.

La répartition des stocks varie selon le type de sylviculture et la station. Dans le cas de vieux taillis de chênes verts méditerranéens, la biomasse aérienne (troncs, branches et feuilles) représente seulement un tiers du total de carbone ; le reste est réparti à parts égales entre souches et racines d'une part, et sol d'autre part (Ourcival et Rambal, voir article dans ce dossier).

Soulignons que tout mécanisme incitant à augmenter le contenu en carbone d'un seul des trois réservoirs (par exemple le bois sur pied en forêt) ne conduit pas forcément au meilleur résultat atmosphérique, car un schéma de gestion optimisé sur cette base

peut impliquer une perte de carbone dans les autres réservoirs.



Pompe à carbone

Une pompe n'est pas un réservoir. Elle ne peut donc être ni un puits (réservoir qui se remplit) ni une source (réservoir qui se vide). Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Les pompes répondent toutes au même besoin : déplacer un fluide d'un point à l'autre. Pour déplacer ce fluide, il faut lui communiquer de l'énergie, les pompes remplissent cette fonction. Exemple : le cœur. Le côté droit du cœur est chargé de renvoyer le sang pauvre en oxygène aux poumons pour éliminer le dioxyde de carbone et réoxygéner le sang. Le côté gauche du cœur reçoit le sang fraîchement oxygéné provenant des poumons et le redistribue dans tout le corps. Chez l'homme, chaque jour, 100 000 battements du cœur pompent presque 8 000 litres de sang. Nous avons vu que la forêt comprend

plusieurs mécanismes assimilables à des pompes : la photosynthèse au niveau des feuilles (pompe aspirant du CO₂ et ne fonctionnant que le jour), la respiration autotrophe sur toute la surface aérienne et racinaire des arbres (pompe refoulant du CO₂ et fonctionnant 24 heures sur 24) et la respiration hétérotrophe au niveau du sol (pompe refoulant du CO₂ tout au long de la chaîne alimentaire microbienne et animale).

Le terme « pompe » appliqué à la forêt entière ne fait qu'aggraver les risques de confusion sémantique. Il n'apporte rien de plus aux autres termes plus explicites que sont « flux entrant », « flux sortant », « puits » et « source ». Tout au plus peut-on dire que les pompes à CO₂ d'une forêt sont toutes de nature biologique, contrairement aux océans pour lesquels coexistent une pompe physique (« tapis roulant océanique » déjà évoqué) et une pompe biologique (photosynthèse du phytoplancton). Si on intègre les trois pompes d'une forêt française en une seule, on revient au calcul du flux net, et dans ce cas, il faut bien admettre que le rendement de la pompe forestière à carbone est bien faible : pour 100 atomes de carbone prélevés dans l'atmosphère, environ 15 seulement resteront dans l'écosystème (voir figure 7). ■

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette synthèse :

Messieurs P. Coquillard, D. Loustau et Ph. Riou-Nivert pour la relecture du texte,

Monsieur J.M. Ourcival pour nos discussions sur l'équivalence entre 1 m³ de bois et 1 tonne de CO₂,

Madame M. Mouas pour les recherches bibliographiques,

Madame M. Thollet pour la mise en forme du texte et des illustrations.

(1) La réaction de calcination ayant lieu lors de la production de ciment ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) revient à extraire du CO_2 provenant des carbonates du sol (Inéris, 2001).

(2) Les réservoirs de carbone fossile font partie d'un autre cycle beaucoup plus long : de l'ordre de 200 millions d'années !

(3) : La méthode par inventaire forestier donne des résultats inférieurs (Dupouey et al., 1999) : 17,1 MtC/an (période 1984-1996) ramenés aux 15 millions d'hectares de la forêt française font 1,14 tC/ha/an.

(4) Il faut également ajouter la fermentation (production de méthane CH_4 et de CO_2) dans les milieux anoxiques (sans oxygène).

(5) Si un produit fini a une espérance de vie de 15 ans, mais que 60% de la grume ayant servi à le construire est perdue en chutes ayant une durée de vie de 2 ans, alors la durée de vie apparente est de : $40\% \times 15 + 60\% \times 2 = 7,2$ ans.

Résumé

L'objectif de cet article est avant tout pédagogique. Il passe en revue les principaux termes et concepts utilisés en matière de carbone : source, puits, flux, cycle, stock et pompe. Avant de les appliquer au domaine forestier, ils sont d'abord expliqués à partir d'exemples divers tels que les océans, le cycle de l'eau ou encore le cœur. Cette approche, en identifiant les principales sources de confusion sémantique et en traitant le carbone à la fois à l'échelle de la France et à celle du globe, remet la forêt à sa juste place. La forêt n'est pas uniquement un remède potentiel contre les émissions de CO_2 . Elle a également sa part de responsabilité et risque par ailleurs d'être victime des changements climatiques.

Mots-clés : carbone, forêts, vocabulaire.

Glossaire		
Termes	Synonymes	Définition
Autotrophe et hétérotrophe		Les organismes hétérotrophes puisent l'énergie dont ils ont besoin exclusivement dans des substances organiques existant déjà. Les autotrophes sont capables d'utiliser directement d'autres formes d'énergie (par exemple l'énergie lumineuse).
Réservoir	Bassin de carbone	Tout système ayant la capacité d'accumuler ou de libérer du carbone. Un réservoir est un contenant, le stock est le contenu. Un réservoir peut être un puits ou une source de carbone.
Biome		Un biome est un ensemble d'écosystèmes caractéristique d'une aire géographique et nommé à partir de la végétation et des espèces animales qui y prédominent et y sont adaptées (exemple : la toundra, les mangroves, les déserts, les forêts tempérées...).
Biosphère		Partie de la sphère terrestre, siège de la vie sous toutes ses formes, ce qui comprend les organismes vivants ainsi que les matières organiques résultant de la vie (exemple : litière, détritiques, sol).
Carbone du sol		Expression employée afin de distinguer le réservoir de carbone que constitue spécifiquement le sol. Cela inclut différentes formes de carbone organique (humus) et de carbone minéral, y compris le charbon de bois, mais ni la biomasse souterraine (ex. : racines, bulbes, etc.), ni la faune des sols.
Flux de carbone		Quantité de carbone transportée d'un réservoir à un autre, exprimé en unité de masse par unité de surface et unité de temps (ex. : tC/ha/an).
Oxydation biologique		Processus fondamental de dégradation des hydrates de carbone (en particulier le glucose) qui permet un gain d'énergie dans la cellule vivante.
Permanence		Durabilité d'un réservoir de carbone et stabilité de ses stocks, compte tenu de son exploitation et des perturbations qu'il subit.
Pompe à carbone		Mécanisme permettant d'aspirer ou de refouler du carbone atmosphérique (ex. : photosynthèse, respirations...). Un réservoir n'est pas une pompe, mais il ne peut se remplir (ou se vider) sans pompe.
Produits du bois		Produits dérivés du bois brut récolté dans les forêts, comprenant le bois de feu et les grumes, ainsi que les produits dérivés tels que les sciages, les contreplaqués, la pâte de bois, le papier, etc.
Puits		Tout mécanisme qui absorbe un gaz à effet de serre ou un précurseur de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère. Un réservoir donné peut être un puits de carbone atmosphérique et ce, durant un certain laps de temps quand il absorbe davantage de carbone qu'il n'en libère.
Source		Contraire de puits. Dans un cycle du carbone en équilibre, il n'y a ni puits, ni source.
Stock	Réserve	Quantité de carbone contenue dans un réservoir à un moment donné. L'existence d'un stock de carbone présent dans un réservoir ne suffit pas pour que celui-ci soit un puits.
Stocker	Séquestrer Fixer Absorber Piéger	Constitution d'un stock de carbone dans un réservoir autre que l'atmosphère. Ce stock peut séjourner plus ou moins longtemps dans un réservoir avant de retourner à l'atmosphère ou transiter par un autre réservoir. Un réservoir qui augmente son stock se comporte comme un puits.

Bibliographie

- **AIE**, 2003 - *International carbon dioxide emissions and carbon intensity of fossil fuels (petroleum, natural gas, and coal) data*. Site internet AIE. Disponible à l'adresse <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/carbondioxide.html>
- **Balesdent (J.)**, 1998 - *Les isotopes du carbone et la dynamique des matières organiques des sols*. Cahiers Agricultures n°7, p. 201-206.
- **Chambers (J.Q.), Fisher (J.I.), Zeng (H.), Chapman (E.L.), Baker (D.B.), Hurr (G.C.)**, 2007 - *Hurricane Katrina's carbon footprint on U.S. Gulf coast forests*. Science, vol. 318, n°5853, p. 1107.
- **Chevrou (R. B.)**, 2005 - *Émission de carbone par les incendies de forêts*. VIII^e colloque Arbora - Carbone, forêts, bois. 1^{er} et 2 déc. 2005. Talence, p. 231-240.
- **Ciais (Ph.), Reichstein (M.), Viovy (N.), Granier (A.), Ogée (J.), Allard (V.), Aubinet (M.), Buchmann (N.), Bernhofer (Chr.), Carrara (A.), Chevallier (F.), de Noblet (N.), Friend (A.D.), Friedlingstein (P.), Grünwald (T.), Heinesch (B.), Keronen (P.), Knohl (A.), Krinner (G.), Loustau (D.), Manca (G.)[†], Matteucci (G.)[†], Miglietta (F.), Ourcival (J.M.), Papale (D.), Pilegaard (K.), Rambal (S.), Seufert (G.), Soussana (J.F.), Sanz (M.J.), Schulze (E.D.), Vesala (T.), Valentini (R.)**, 2005 - *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003*. Nature, vol. 437, p. 529-533.
- **Collectif CNRS**, 2004 - *L'eau douce, une ressource précieuse*. Dossiers scientifiques Sagascience. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau>
- **Dupouey (J.L.), Pignard (G.), Badeau (V.), Thimonier (A.), Dhôte (J.F.), Nepveu (G.), Berges (L.), Augusto (L.), Belkacem (S.), Nys (C.)**, 1999 - *Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises*. C.R. Acad. Agri. Fr., 85, 6, p. 293-310.
- **Giec**, 2007 - *Fourth Assessment Report-Working group 1*. Novembre 2007 - Valencia, Espagne.
- **Giec**, 2000 - *Land use, land-use change and forestry (LULUCF)*. Watson (R.T.) et al. (eds). Cambridge University Press. 375 p.
- **Gitz (V.)**, 2004 - *Changement d'usage des terres et politiques climatiques globales*. Thèse de doctorat. Engref. 437 p.
- **Houghton (R.A.)**, 2003 - *Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000*. Tellus, 55B, 2, p. 378-390.
- **Ineris**, 2001 - *Prévention et réduction intégrées de la pollution*. Document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans les industries de fabrication du ciment et de la chaux. <http://aida.ineris.fr/bref/ciment.htm>
- **Léthé (M.)**, 2007 - *Le CO₂ entre ciel et mer*. Research eu, numéro spécial déc. 2007, p. 13-14.
- **Liski (J.), Perruchoud (D.), Karjalainen (T.)**, 2002 - *Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe*. Forest Ecology and Management, 169, p. 159-175.
- **Loustau (D.), coordinateur**, 2004 - *Séquestration du carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles*. Rapport final du projet CARBOFOR. Unité EPHYSE, INRA Bordeaux. 138 p.
- **Magnani (F.), Mencuccini (M.), Borghetti (M.), Berbigier (P.), Berninger (F.), Delzon (S.), Grelle (A.), Hari (P.), Jarvis (P.G.), Kolari (P.), Kowalski (A.S.), Lankreijer (H.), Law (B.E.), Lindroth (A.), Loustau (D.), Manca (G.)[†], Moncrieff (J.B.), Rayment (M.), Tedeschi (V.), Valentini (R.), Grace (J.)**, 2007 - *The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests*. Nature, vol. 447, p. 848-850.
- **Mund (M.), Schulze (E.D.)**, 2006 - *Impacts of forest management on the carbon budget of European beech (Fagus sylvatica) forests*. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 177, p. 47-63.
- **Petit (J.R.), Jouzel (J.), Raynaud (D.), Barkov (N.I.), Barnola (J.M.), Basile (I.), Bender (M.), Chappellaz (J.), Davis (M.), Delaygue (G.), Delmotte (M.), Kotlyakov (V.M.), Legrand (M.), Lipenkov (V.Y.),**
- Lorius (C.), Pépin (L.), Ritz (C.), Saltzman (E.), Stievenard (M.)**, 1999 - *Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. Nature, vol. 399, p. 429-436.
- **Prieur (A.)**, 2004 - *Les ressources forestières: produits du bois, usages énergétiques, capture et stockage du carbone*. Thèse Univ. Bordeaux 1, 183 p.
- **Saugier (P.), coordinateur**, 2005 - *Livret pédagogique Carboschools. Projets intégrés CarboEurope et CarboOcéan, 6^e PCRD de l'Union Européenne*. 41 p. Disponible à l'adresse : <http://www.carboschools.org>
- **Schulze (E.D.), Heimann (H.)**, 1998 - *Carbon and water exchange of terrestrial systems*. In : Galloway (J.N.), Melillo (J.) (eds). Asian Change in the context of global change. Cambridge University Press IGBP-Series Vol. 3, p. 145-161.
- **Stephens (B.B.), Gurney (K.R.), Tans (P.P.), Sweeney (C.), Peters (W.), Bruhwiler (L.), Ciais (Ph.), Ramonet (M.), Bousquet (Ph.), Nakazawa (T.), Aoki (S.), Machida (T.), Inoue (G.), Vinnichenko (N.), Lloyd (J.), Jordan (A.), Heimann (M.), Shibistova (O.), Langenfelds (R.L.), Steele (L.P.), Francey (R.J.), Denning (A.S.)**, 2007 - *Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂*. Science 22, Vol. 316, n° 5832, p. 1732-1735.
- **Vallet (P.)**, 2005 - *Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction « puits de carbone » des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle*. Thèse de Doctorat, mention Sciences forestières. 195 p.
- **WBGU**, 1998 - *The accounting of biological sources and sinks under the Kyoto protocol*. Special report of the German Advisory Council on Global Change. Disponible à l'adresse : www.avi._bremerhaven.de/WBGU/wbgu_sn1998-engl.html

Place des forêts dans les cycles long et court du carbone

Ch. Verati et P. Coquillard, Université de Nice Sophia-Antipolis

Le changement climatique initié aura une influence sur la répartition, la diversité et le volume de la biomasse végétale. Les gestionnaires forestiers devront prendre en compte cette mutation.

Le cycle du carbone est un cycle biogéochimique complexe. Le carbone est en effet impliqué sous différentes formes chimiques (CO₂, matière organique, carbonates...) dans une multitude de réservoirs terrestres. Les transferts entre ces réservoirs interviennent à plusieurs échelles de temps. Comprendre et quantifier l'impact et l'avenir des réserves forestières dans ce cycle est d'autant plus complexe aujourd'hui qu'une augmentation de rejet de CO₂ par l'homme depuis une centaine d'années perturbe ce cycle.

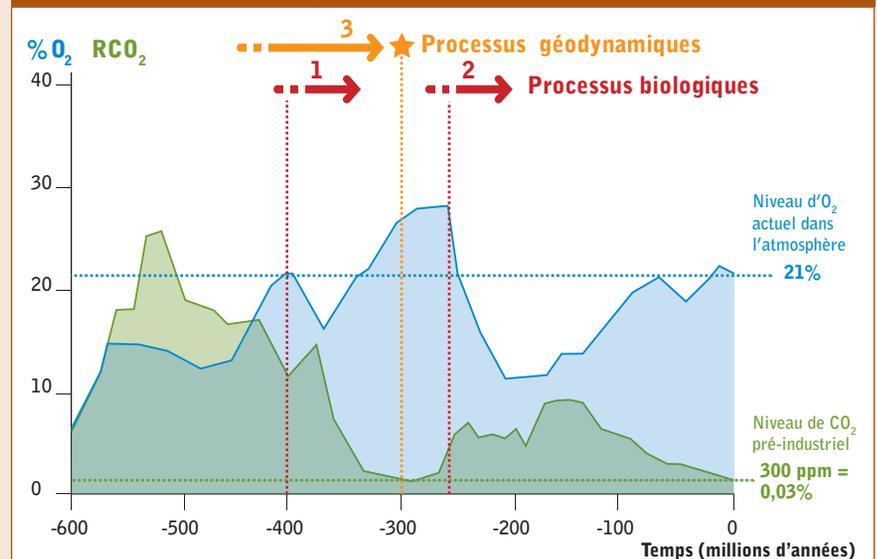
Le carbone est à l'échelle du globe engagé dans un cycle long

Afin de comprendre le cycle du carbone terrestre, plusieurs scientifiques ont établi, à partir des archives sédimentologiques et des modèles planétologiques, l'évolution des teneurs en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère depuis la formation de notre planète, c'est-à-dire depuis plus de 4 milliards d'années. Ces variations ont été très importantes en amplitude, bien plus que celles observées à l'échelle de l'histoire humaine et même bien plus que celles observées dans les archives glaciaires depuis 800 000 ans. Au tout premier âge de

formation de la Terre, la quantité estimée de CO₂ représentait environ 100 000 fois la quantité actuelle. Durant plusieurs milliards d'années ce CO₂ atmosphérique a été transféré irréversiblement vers les calcaires (CaCO₃) qui se sont déposés au fond des océans grâce à l'activité

photosynthétique des cyanobactéries. Il y a 600 millions d'années, le taux de CO₂ dans l'atmosphère s'est sensiblement stabilisé. La courbe de référence d'évolution en CO₂ de l'atmosphère depuis 600 millions d'années est appelée Géocarb III (Figure 1). Les variations observées sur cette courbe

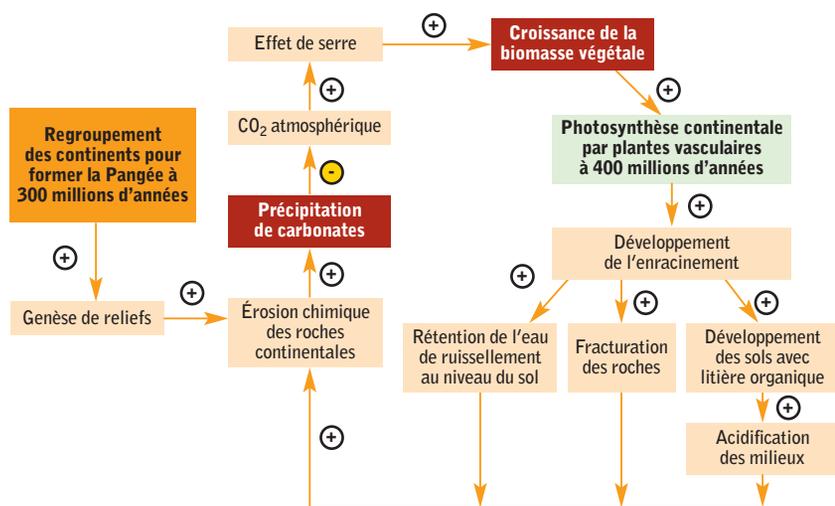
Figure 1 : Géocarb III. Courbes d'évolution de la teneur en dioxyde de carbone CO₂ atmosphérique (RCO₂) et de la teneur en oxygène (% O₂) d'après le modèle de Berner (2003)



RCO₂ est le rapport entre la masse de CO₂ atmosphérique à un temps donné et la masse actuelle (valeur pré-anthropique de 300 ppm). La ligne horizontale en tirets verts indique un RCO₂ de 1. Aujourd'hui, avant tout impact lié à l'activité humaine, on retrouve 21 % d'O₂ et 300 ppm (= 0,03 %) de CO₂ dans l'atmosphère. Il y a 300 millions d'années, il y avait autant de CO₂ dans l'atmosphère avec cependant une teneur en oxygène plus grande. Au Jurassique (150 millions d'années), il y avait pratiquement 10 fois plus de CO₂ qu'aujourd'hui dans l'atmosphère, pour une teneur en oxygène de 12 % seulement.

- 1 : Conquête du milieu terrestre par les végétaux vasculaires vers 400 millions d'années avec apparition de la lignine vers 350 millions d'années.
- 2 : Apparition des décomposeurs efficaces de la lignine.
- 3 : Regroupement des continents en un mégacontinent = Pangée; ce regroupement génère de grands reliefs et se termine vers 300 millions d'années (étoile).

Figure 2 : Explication de la chute importante de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère au cours de la fin du paléozoïque

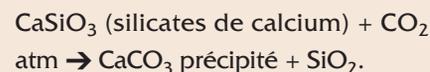


Un signe ⊕ signifie qu'une augmentation (ou diminution) du bloc précédent entraîne une augmentation (ou diminution) du bloc suivant. Un signe ⊖ indique une rétroaction négative, à savoir qu'une augmentation (ou diminution) du bloc précédent implique une diminution (ou augmentation) du bloc suivant. Les processus constituant des pompes à carbone sont indiqués en rouge.

depuis 600 millions d'années correspondent au cycle long du carbone qui implique les grands processus géodynamiques comme la subduction, le volcanisme et la formation de chaînes de montagne, ainsi que les grands changements dans l'évolution de la biosphère et notamment la conquête du milieu terrestre par les végétaux. L'impact de la biosphère sur les variations de carbone sur les 600 derniers millions d'années est indéniable. Un des exemples emblématiques est la chute importante du taux de CO₂ dans l'atmosphère dans la seconde moitié du Paléozoïque (de - 400 à - 300 mA ; Figure 1). Vers 500 millions d'années, il y avait 20 fois plus de CO₂ qu'aujourd'hui dans l'atmosphère. En moins de 200 millions d'années, ce taux atteint des valeurs proches de celles actuelles (de l'ordre de 0,03 %). Où est passé tout ce CO₂ atmosphérique ? Quel processus a joué le rôle très efficace de pompe à CO₂ sur cette échelle de temps ?

Deux facteurs simultanés prépondérants dans cette évolution sont venus perturber le cycle global du carbone : la formation d'une immense chaîne de montagne par le regroupement progressif des continents et la conquête conjointe des végétaux vasculaires sur les continents (Figure 1). Ces deux processus vont avoir comme effet d'augmenter l'érosion chimique des continents, qui est une grande consommatrice de CO₂ atmosphérique pour pouvoir précipiter des carbonates dans les océans (Figure 2). L'érosion chimique des reliefs silicatés en formation est facilitée par l'enracinement des végétaux qui contribue à la fracturation du socle rocheux, à la rétention d'eau météorique dans les sols et à l'acidification des milieux par l'apparition de litière organique. Les puits de carbone sont ainsi à cette époque la biomasse végétale vasculaire en déploiement sur les continents mais surtout les carbonates océaniques qui mobilisent beaucoup de CO₂

atmosphérique pour leur fabrication selon l'équation suivante :

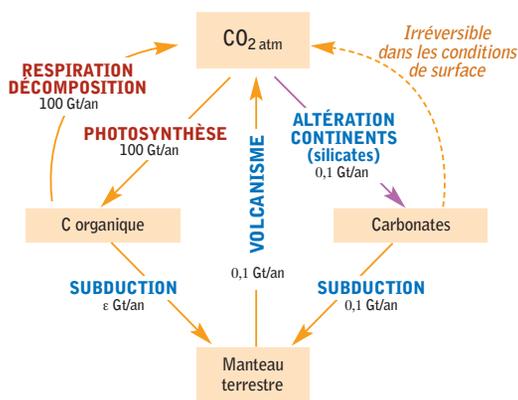


D'autre part, la séquestration de carbone par les végétaux vasculaires est renforcée à l'époque parce que le recyclage de ces nouvelles forêts, où la lignine fait son apparition vers 350 millions d'années, n'est pas possible. En effet, l'équilibre photosynthèse/décomposition n'est pas respecté sachant que les décomposeurs efficaces de la lignine n'apparaissent que vers 250 millions d'années (Trias). Une grande partie de cette nouvelle biomasse lignique va s'accumuler sous forme de carbone organique dans des bassins dans lesquels aujourd'hui on retrouve des gisements importants de combustibles fossiles (charbon, kérogène...), constituant un véritable puits de carbone entre 400 et 300 millions d'années.

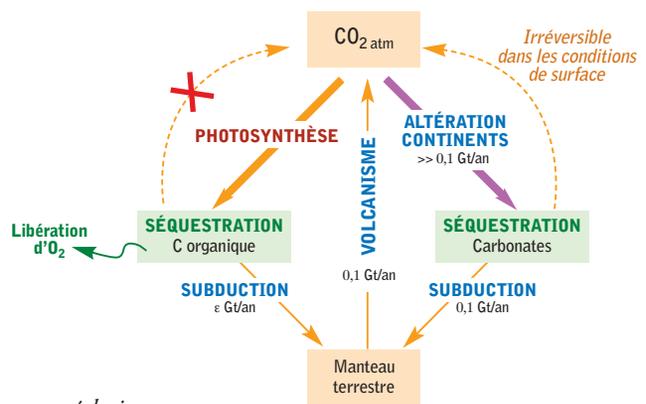
Cette séquestration de carbone organique explique pourquoi les taux d'oxygène atmosphérique augmentent fortement durant cette période (Figure 1) : on ne peut accumuler dans l'atmosphère de l'oxygène que si l'on fossile à grande échelle de la matière organique (Figure 3). Dès que les décomposeurs de lignine apparaissent, les taux d'oxygène baissent et les taux de CO₂ atmosphérique augmentent (relargage du carbone par oxydation de la matière organique enfouie). La teneur en CO₂ baissant à la fin du paléozoïque, l'effet de serre terrestre va progressivement baisser, impliquant ainsi un ralentissement de la croissance de la biomasse, accompagné d'une réduction de l'altération des reliefs. Cette baisse de l'effet de serre sera à l'origine d'une glaciation majeure à la surface de la Terre : la glaciation ayant eu lieu vers 300 millions d'années (permo-carbonifère). Dans la figure 3 le cycle du carbone est présenté à grande échelle de temps, avec les

Figure 3 : Cycle long du carbone

A : CYCLE LONG DU CARBONE EN ÉQUILIBRE



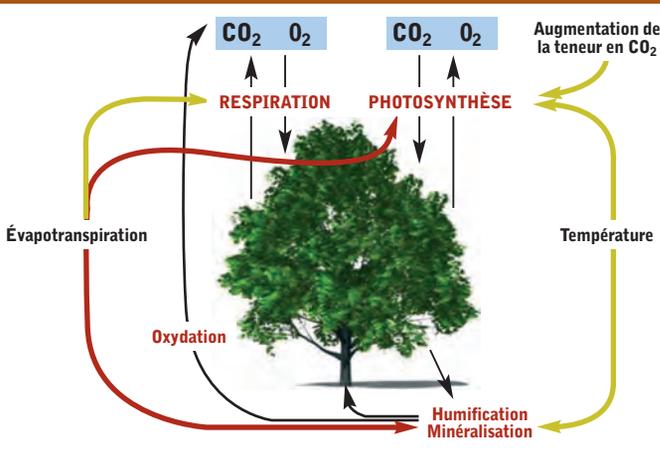
B : SÉQUESTRATION DU CARBONE ATMOSPHÉRIQUE de - 400 à - 300 millions d'années



En rouge sont représentés les processus biologiques, en bleu les processus géologiques.

A = Cycle en équilibre, où le taux de carbone recyclé dans le manteau via les zones de subduction (0,1 GtC/an) est égal à celui relâché par l'activité volcanique sur Terre, qui est égal à celui atmosphérique consommé par l'altération des continents. L'autre équilibre est celui entre la photosynthèse et la respiration. B = cycle en déséquilibre selon le scénario de la fin du Paléozoïque où le taux de CO₂ atmosphérique a considérablement baissé en raison de la formation d'une immense chaîne de montagne (→) et de l'absence de décomposeur de la lignine (X).

Figure 4 : Le cycle court du carbone



Le CO₂ atmosphérique est fixé sous formes d'hydrates de carbone dans l'organisme végétal par l'activité photosynthétique des feuilles au cours de laquelle du dioxygène (O₂) est libéré. Dans le même temps, la respiration effectue le processus inverse. L'élévation de température devrait favoriser la disponibilité en ressources minérales et accélérer la photosynthèse. Elle devrait, a contrario, augmenter l'évapotranspiration et induire ainsi un stress hydrique qui inhiberait la photosynthèse et la minéralisation mais activerait la respiration.

← flux de matière
 ← effets activateurs
 ← effets inhibiteurs

causes de la perturbation du cycle entre 400 et 300 millions d'années.

Le carbone est à l'échelle du globe engagé dans un cycle court

Mais le carbone est aussi engagé dans un cycle beaucoup plus court que le cycle biogéochimique : celui de la matière organique. En effet, le transfert du carbone atmosphérique vers la matière organique, via la photosynthèse,

puis son retour à l'atmosphère après avoir transité dans les divers organismes consommateurs et dans les sols (processus d'oxydation) met à peu près douze années pour s'effectuer. Il s'agit donc d'un processus très rapide, dont l'activité des diverses composantes peut influencer rapidement les concentrations de CO₂ atmosphérique. Cette circulation du carbone est indissociable de celle de l'oxygène auquel il est couplé (Figure 4). Si l'activité photosynthétique fixe le carbone selon l'équation générale : $6 (CO_2) + 6 (H_2O) \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6 (O_2)$

grâce à l'énergie lumineuse, et permet de stocker l'énergie nécessaire au métabolisme sous forme de glucides (hydrates de carbone), la respiration toujours présente, permet en revanche l'utilisation de ces réserves pour assurer la croissance, le renouvellement des pertes (chute des feuilles, branches mortes, etc.) et le métabolisme de base. Or, il s'agit exactement de la réaction inverse de la précédente. Donc, si nous considérons un arbre ayant atteint son équilibre (c'est-à-dire dont la masse ne varie pas d'une année sur l'autre), le bilan respiratoire

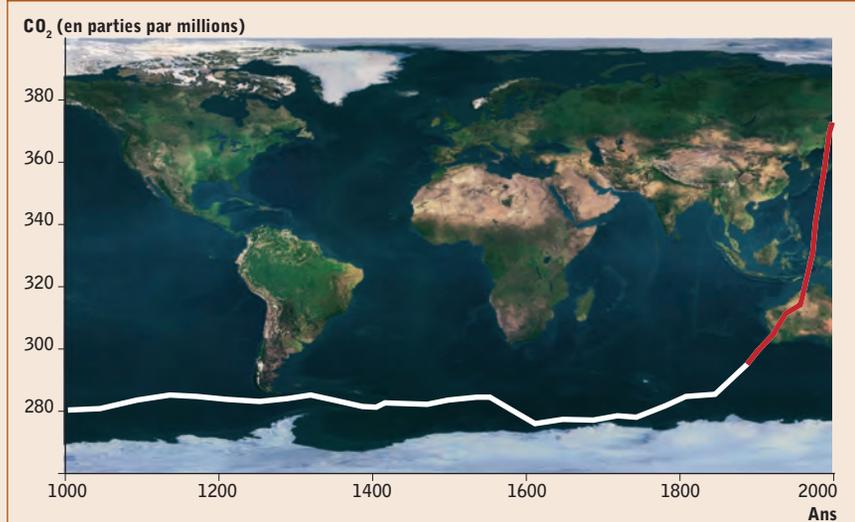
compense exactement celui de la photosynthèse. Autrement dit, le bilan carbone est nul, ou à peu près.

Il est donc bien clair qu'une forêt en équilibre ne saurait être ni pourvoyeuse d'oxygène pour la planète (comme on l'a vu trop souvent écrit) ni fixatrice de carbone. Seules les forêts en croissance (emprises spontanées sur les jachères, jeunes plantations) et les zones marécageuses sont fixatrices de carbone. On dit qu'elles forment un puits de carbone, par comparaison avec les activités humaines qui en constituent l'une des sources.

La pollution et la réponse de la végétation

Mais il y a un mais. Car ce constat n'est valide que si toutes choses restent égales par ailleurs. Or, nous connaissons depuis un siècle et demi un fort accroissement de la concentration en dioxyde de carbone dans notre atmosphère (Figure 5) en raison de l'activité industrielle (combustion de matières fossiles pour la production d'énergie et les transports, fabrication de ciment pour le bâtiment et déforestation). À l'échelle planétaire, on estime qu'actuellement les végétaux fixent 2,5 Gt par an de carbone⁽¹⁾ pour 8,8 Gt/an émises. Or, même si les océans sont

Figure 5 : Variation de la pression partielle du CO₂ atmosphérique au cours du dernier millénaire



capables de capter environ 2,2 Gt/an, la différence reste de l'ordre de 4,1 Gt/an. Deux conséquences :

→ le CO₂ étant un gaz à effet de serre, la température moyenne à la surface de notre planète a augmenté d'environ 1,5 °C sur cette période (Figure 6). Si nous continuons d'émettre du CO₂ au rythme actuel, c'est à une augmentation de 2 à 12 °C des températures moyennes annuelles, selon les régions du globe, qu'il faudra faire face à l'horizon de ce siècle, sans doute même avant ;

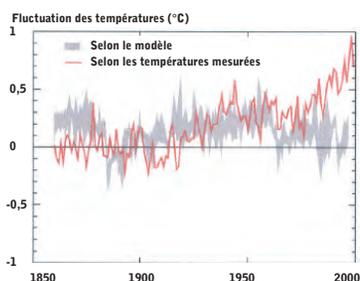
→ la croissance forestière, et des végétaux en général, s'en trouveraient facilités.

Avec l'augmentation du CO₂ atmosphérique, l'enzyme spécialisée dans la fixation photosynthétique du carbone

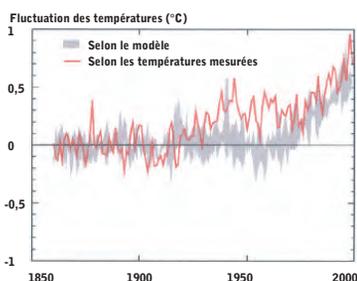
contenue dans les tissus chlorophylliens (feuilles pour la plupart des végétaux) verrait son activité et son efficacité renforcées. Par ailleurs, l'augmentation de température induite semble à première vue bénéfique pour les végétaux : comme toute réaction chimique, la photosynthèse est accélérée par la température. De même les processus d'humification et de minéralisation seraient favorisés et donc les végétaux pourraient bénéficier de ressources nouvelles. Au total, c'est un gain substantiel de biomasse que l'on pourrait espérer. Cependant, il faut considérer que les réactions chimiques nécessitent aussi la présence d'eau. L'augmentation des températures influencera nécessairement le bilan hydrique des sols et

Figure 6 : Fluctuation des températures moyennes annuelles du globe depuis 1850 (courbes en rouge)

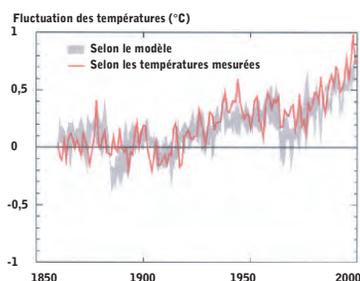
A : fluctuations naturelles seules selon un modèle de simulation



B : Fluctuations dues aux seules activités humaines (anthropiques)



C : Variation résultant des fluctuations naturelles et anthropiques



Source : IPCC (ou Giec), 2001

donc modifiera la réserve utile pour les végétaux. Laquelle pourrait diminuer significativement car selon les modèles climatiques, la pluviométrie annuelle devrait rester inchangée – voire diminuer dans notre partie de l'Europe. En conséquence, le stress hydrique des végétaux provoqué par une évapotranspiration accrue aurait des effets négatifs sur la photosynthèse notamment pendant une période estivale allongée avec une augmentation de la respiration et un ralentissement des processus de minéralisation dans les sols. Globalement, pour le végétal c'est le bilan photosynthèse/respiration qui sera déterminant. Si la respiration l'emporte c'est non seulement à un ralentissement de la croissance mais aussi à une perte de biomasse auxquels nous pourrions assister. D'une position de puits de carbone les forêts passeraient au statut de source!

L'avenir

Ce scénario ne devrait cependant pas être général. Tout d'abord parce que la modification prévue des températures n'est pas uniforme. Certaines régions devraient être plus affectées que d'autres, en particulier les latitudes nord. En ce qui concerne la France, la moitié sud de notre pays pourrait connaître un réchauffement avoisinant les 2 à 3 °C (en moyenne). Ce réchauffement considérable aurait pour conséquence un abaissement net de la productivité forestière partout où le déficit hydrique de longs étés se fera sentir. Ce sera le cas aux basses altitudes. En revanche, à moyenne altitude, le déficit de croissance en été pourrait être compensé, voire dépassé par des hivers plus courts et une reprise de végétation plus précoce qu'à l'heure actuelle. De récents travaux réalisés en Tunisie par Ali el Khorchani (2006) sur

une vingtaine de peuplements de pin d'Alep ont montré que les zones actuellement chroniquement déficitaires en eau pendant une grande partie de l'année (climats semi-arides à arides) devraient connaître un net recul de la croissance, et même le dépérissement de certains de leurs peuplements. En revanche, les peuplements du nord du pays de moyenne altitude, pourraient tirer bénéfices de la nouvelle situation par allongement de la période favorable à la croissance en Méditerranée à savoir le printemps et l'automne en raison d'hivers plus courts. On le voit, la situation n'est pas simple, car elle dépend à la fois des paramètres climatiques, de la capacité de rétention en eau des sols et des exigences des espèces elles-mêmes.

Actuellement, les écosystèmes constituent des puits de carbone, même si une grande incertitude persiste à propos de l'équilibre constaté dans la zone équatoriale. De fait, ils fixent 10 à 15 % de nos émissions annuelles en raison des changements d'usage en cours sur de très vastes surfaces, de la réduction et de la lutte contre les incendies dans l'hémisphère nord. En France, la croissance de l'espace forestier (40 000 ha/an selon la Derf) fixe environ 15 % des émissions du pays. Cependant ce processus de séquestration devrait, selon les résultats de simulation, se réduire drastiquement dans la seconde moitié du XXI^e siècle, même en cas de réduction importante des émissions.

Au-delà des chiffres globaux, toutes les simulations prédisent des changements régionaux drastiques de la végétation, parfois de taille et d'intensité catastrophiques. Par exemple, il est prédit un déclin des forêts boréales en raison d'un stress hydrique auquel elles ne sont pas adaptées ainsi qu'un effondrement de la forêt pluviale amazonienne liée à une forte réduction de la pluviométrie.

Si l'utilisation du bois comme source d'énergie (notamment le chauffage) ou matériau de construction est bien une mesure à encourager, on ne peut en aucun cas attendre des écosystèmes terrestres qu'ils compensent nos excès d'émission de CO₂. La réduction des émissions reste donc un objectif incontournable. ■

(1) 1,4 gigatonne, soit 1,4 milliard de tonnes.

Résumé

Le cycle du carbone est indissociable de celui de l'oxygène. On constate qu'une forêt en équilibre n'est ni pourvoyeuse d'oxygène ni fixatrice de carbone. Nous connaissons de nos jours un accroissement de la teneur en CO₂ à raison de deux milliards de tonnes par an, facilitant la croissance forestière. Mais, l'augmentation des températures pourrait avoir un effet négatif sur les bilans évapotranspiratifs, induisant une baisse de la productivité forestière. L'exploitation du bois est à encourager, mais les écosystèmes terrestres ne compenseront pas nos excès d'émission de CO₂.

Mots clés : Cycles du carbone, changements climatiques, photosynthèse, respiration, fixation de carbone.

Bibliographie

■ **Ali el Khorchani, 2006** - *Approche dendrochronologique de l'influence des changements climatiques sur la productivité des forêts de pin d'Alep en Tunisie*. Thèse doctorat Université Aix-Marseille III.

■ **Berner, 2003** - *The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition*, Nature, v 426, 323- 326.

■ **GIEC 2007** - Fourth Assessment Report - Working group 1. Novembre 2007 - Valencia, Espagne.

■ **IPCC (International Panel on Climate Change), 2001** - Rapport : <http://www.ipcc.ch/>

Le puits de carbone de la forêt méditerranéenne : exemple d'un taillis de chênes verts à Puéchabon (Hérault)

Jean-Marc Ourcival, Serge Rambal⁽¹⁾

Les écosystèmes forestiers méditerranéens français couvrent environ un million d'hectares dont 400 000 ha dominés par le chêne vert et 80 000 ha par le pin d'Alep. Ces deux espèces possèdent un feuillage persistant. Le climat méditerranéen associé à la présence de feuilles tout au long de l'année, permet une longue période d'assimilation de carbone interrompue par la sécheresse estivale.

La forêt méditerranéenne a été exploitée depuis plusieurs millénaires. Au cours des derniers siècles on effectuait une coupe à blanc tous les 20 à 30 ans. Ce mode de gestion a fortement favorisé le chêne vert (*Quercus ilex*), espèce qui rejette facilement de souche et a conduit à la mise en place des taillis que cette espèce domine largement. Le bois était principalement utilisé pour la fabrication de charbon de bois et l'écorce pour le tannin. Depuis la seconde guerre mondiale, nous observons une forte diminution de son exploitation. Actuellement, la forêt méditerranéenne est souvent utilisée comme espace de loisir (chasse, randonnée).

Le site de Puéchabon

Le site d'étude est situé dans la forêt domaniale de Puéchabon à 35 km au nord-ouest de Montpellier (Hérault). Le sol superficiel et calcaire ainsi que le climat sont caractéristiques des conditions moyennes de développement de la forêt à chêne vert (Tableau 1). La dernière coupe à blanc remonte à 1942 et depuis, aucun traitement sylvicole n'a été

réalisé. Depuis 1984, le Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cefe, laboratoire du CNRS) étudie la dynamique et le fonctionnement du taillis par des suivis de croissance en diamètre, des mesures des chutes de litière et par des mesures du climat.

Dynamique du peuplement

En 1984, 42 ans après la dernière coupe à blanc, il y avait 9 700 brins/ha,

la surface terrière était d'environ 21 m²/ha et la classe 30-40 mm de diamètre était la plus représentée. En 2006, il ne reste que 6 400 brins/ha, la surface terrière est de 32 m²/ha et la classe 70-80 mm est la plus représentée. Au cours de ces 22 années de mesure, les brins les plus faibles (classe de diamètre inférieure à 30 mm) ont disparu, mais le nombre de cépée n'a pas diminué. En moyenne, les classes de diamètre supérieures à 80 mm croissent de plus d'1 mm par an alors que les classes de moins de 80 mm croissent de moins de 0,4 mm par an. Malgré une production régulière de glands aucune germination n'a eu lieu.

Stock de carbone

En 2006, le carbone stocké dans la forêt représente 175 tC/ha. Il faut remarquer que la biomasse aérienne (tronc, branche et feuille) représente seulement un tiers du pool de carbone, le reste est réparti à parts égales entre les souches et les racines d'une part et le sol d'autre part (Tableau 2). Cette constatation rend très difficile, voire hasardeuse, la détermination des

Tableau 1 : Caractéristiques de la forêt de Puechabon

Végétation	Chêne vert
Âge des rejets	64 ans
Hauteur	5,5 m
Densité	6 393 brins/ha
Diamètre moyen à 1,30 m	7,7 cm
Indice foliaire (surf feuille/surf sol)	2,8
Précipitation moyenne (1984-2006)	905 mm
Min.	546 mm
Max.	1 549 mm
Température moyenne (1984-2006)	13,4 °C
Min. en janvier	5,5 °C
Max. en juillet	22,9 °C
Sol (0-50cm)	38,8 % argile 35,2 % limon 26 % sable 75 % de cailloux

Inventaire de 2006.

Tableau 2 : Stocks de carbone (tC/ha) de la forêt de Puéchabon

Troncs et branches	54	31 %
Feuilles	3	1,5 %
Racines	57	32,5 %
Sol	61	35 %
Total	175	100 %

Inventaire de 2006.

quantités de carbone fixé calculées à partir de la seule mesure des accroissements de diamètre des troncs.

Le suivi des variations de diamètre des troncs pour la période 1984-2006 nous donne un accroissement moyen annuel de 0,91 tC/ha. Si l'on fait l'hypothèse que l'accroissement des racines est proportionnel à celui des branches, la quantité annuelle moyenne de carbone fixée par les chênes verts est de 1,87 tC/ha. Nous estimons que le sous-bois fixe 0,09 tC/ha/an. Notre estimation du carbone fixé par la croissance des plantes de cet écosystème est donc au total de 1,96 tC/ha/an.

Flux de carbone

Depuis l'été 1998, un dispositif de mesure des fluctuations turbulentes est installé à Puéchabon. Cette méthode permet la mesure en continu des échanges gazeux (carbone et vapeur d'eau) entre la forêt et l'atmosphère. Nous pouvons donc établir des bilans de carbone de l'écosystème à la demi-

heure près et les intégrer sur la journée, le mois ou l'année. Cette méthode établit en continu un bilan net (Bn) entre les entrées de carbone (photosynthèse brute, Pb) et les pertes de carbone par respiration (R). Les données nocturnes fournissent une bonne estimation de l'importance du terme respiration de l'écosystème et permettent d'estimer la photosynthèse brute.

Bn (mesuré) =

Pb (déduite) - R (mesurée la nuit)

En moyenne, l'écosystème se comporte comme un puits de carbone et fixe 254 gC/m²/an (ou Bn = 2,54 tC/ha/an). La fixation de carbone ou photosynthèse brute est de 1 274 gC/m²/an (Pb = 12,7 tC/ha/an) et les pertes par respiration de 1 021 gC/m²/an (R = 10,2 tC/ha/an). Les quantités de carbone fixées ne sont pas réparties uniformément au cours de l'année, elles sont proportionnelles à l'intensité du rayonnement photosynthétiquement actif sauf au cours de l'été pendant lequel le carbone fixé est directement lié à la quantité d'eau disponible dans le sol. En général, plus de 80 % du carbone fixé annuellement est acquis pendant les mois de mars à juin. Cette dissymétrie dans la fixation de carbone s'explique par le fait que la photosynthèse brute est contrôlée par le rayonnement et la disponibilité en eau, tandis que la respiration est sous le contrôle de la température du sol et de la teneur en eau du sol. Au printemps, le rayonnement

augmente plus rapidement que la température du sol, la photosynthèse brute est alors nettement supérieure à la respiration, l'écosystème fixe plus de carbone qu'il n'en perd, la photosynthèse nette est alors maximale. En été, la photosynthèse brute et la respiration sont sous le contrôle de la quantité en eau disponible, la photosynthèse nette est en général assez faible. En automne, la respiration du sol peut être supérieure à la photosynthèse brute car le sol est à la fois chaud et humide, l'écosystème peut alors être une source de carbone.

Nous noterons la présence de fortes différences interannuelles dans les quantités de carbone fixé par cet écosystème (Figure 1). Selon les années cet écosystème fixe de 149 à 451 gC/m²/an, ce sont les conditions climatiques qui vont déterminer le bilan de carbone de l'année. Un printemps sec (2005, 2006) va réduire fortement les acquisitions de carbone en limitant plus fortement la photosynthèse brute que la respiration. Au contraire, des précipitations régulièrement réparties au cours de l'année vont favoriser la fixation de carbone (2004). La canicule de l'été 2003 a réduit la photosynthèse brute ce qui a provoqué des pertes de carbone pendant les mois d'août et septembre mais a eu un faible impact sur le bilan annuel de carbone. La faible quantité de carbone fixée en 2005 n'a pas pour seule cause le climat. En effet,

Figure 1 : Quantité annuelle de carbone fixé par la forêt de Puechabon

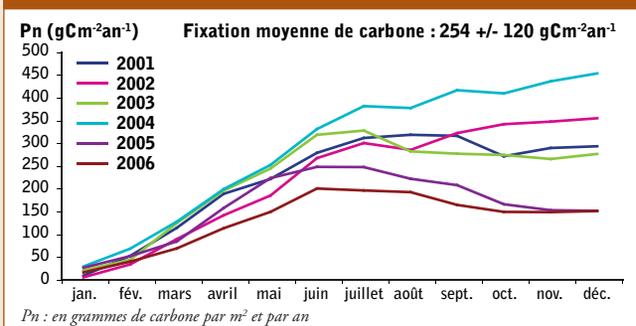
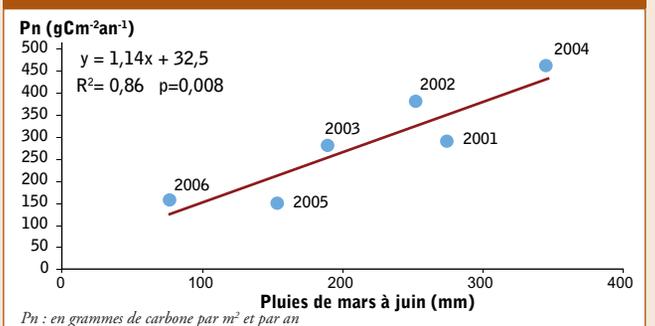


Figure 2 : Relation entre les pluies de printemps (mars à juin) et les quantités de carbone fixées annuellement



une chenille (*Lymantria dispar*) a détruit les pousses de l'année ce qui a réduit nettement la photosynthèse brute au printemps.

La quantité de carbone fixée estimée par la méthode des flux (2,54 tC/ha/an) est supérieure à celles obtenues par le suivi des accroissements de diamètres (1,96 tC/ha/an). Les 0,58 tC/ha/an de différence que l'on observe entre les deux méthodes d'estimation pourrait être due à la non comptabilisation des réserves, c'est-à-dire les carbohydrates (glucides) non structuraux stockés (amidon ou sucres), des émissions de composés organiques volatiles dans l'atmosphère (*terpènes*: voir encadré) et à l'augmentation de la quantité de carbone du sol.

Terpènes

Le chêne vert, comme beaucoup d'autres espèces méditerranéennes, émet des composés organiques volatiles, ici des terpènes. Ces composés sont directement issus du carbone assimilé par une voie de synthèse encore assez mal connue. Ils ne sont pas stockés comme dans les aiguilles de pins. Ils contribuent à la protection des systèmes photosynthétiques à haute température. Ces composés sont très réactifs. Sous fortes irradiations solaires, ils réagissent avec la pollution azotée automobile pour générer de l'ozone de basse couche.

Manipulations des précipitations

Au cours du XXI^e siècle, le bassin méditerranéen subira une diminution des précipitations de 20 % entre avril et septembre couplée à une augmentation des événements extrêmes (Giorgi,



Dispositif d'exclusion de 30 % des pluies installé en 2003.

2006). Le maintien de l'intensité du puits de carbone de la forêt de chênes verts dans le cadre des changements climatiques annoncés peut devenir problématique. Car d'une part, la pérennité de l'espèce peut être menacée et d'autre part, le terme respiration pourrait augmenter au détriment du bilan net. Afin d'étudier ces changements, le Cefe CNRS a mis en place en 2003 (dans le cadre du programme européen MIND) une exclusion partielle des pluies. 30 % de la surface de parcelles de 100 m² sont couverts par des gouttières qui rejettent l'eau de pluie à l'extérieur des parcelles (Photo).

Les premiers résultats nous conduisent à beaucoup de modestie. Face à cet accroissement continu de la contrainte hydrique, le chêne vert met en place un ensemble de mécanismes d'ajustement qu'il convient d'étudier sur le moyen terme pour préciser la trajectoire de la dynamique de ce taillis. Dans le traitement sec, nous observons une augmentation de la teneur en azote des feuilles et de leur efficacité d'utilisation de l'eau. L'activité cambiale semble retardée. À l'échelle de l'écosystème, la diversité mycorhizienne est affectée, ce qui à moyen terme peut affecter le cycle du phosphore.

Conclusion

La forêt de chêne vert de Puéchabon comporte un stock de carbone de 175 tonnes par hectare. Un tiers se situe dans la partie aérienne, un tiers dans les racines, et le reste correspond à la matière organique du sol. Environ 2,5 tonnes de carbone par hectare sont fixées annuellement mais on observe une forte diminution de la fixation en cas de printemps sec. Les différences de quantités de carbone stocké estimées à partir des fluctuations turbulentes ou de l'accroissement de diamètre montrent qu'une partie du carbone fixé est probablement stocké sous forme de réserves dans les souches. ■

(1) Cefe CNRS 1919 Route de Mende 34293 Montpellier Cedex 05, tél.: 04 67 61 32 93, fax: 04 67 41 21 38, courriels: Jean-marc.ourcival@cefe.cnrs.fr et serge.rambal@cefe.cnrs.fr

Résumé

Le taillis de chênes verts est largement représenté en zone méditerranéenne. Depuis 1984 le Cefe CNRS mène des études dans la forêt de Puéchabon représentative de ce milieu. Cet écosystème fixe environ 2,5 tonnes de carbone par hectare et par an, les pluies printanières conditionnent l'intensité du puits de carbone et expliquent la variabilité interannuelle. Les changements climatiques prévus par les modèles pourraient affecter les volumes de carbone fixé si les précipitations de printemps sont diminuées de 20 %.

Mots-clés: stock et flux de carbone, forêt méditerranéenne, chêne vert.

Bibliographie

■ Giorgi F., 2006 - *Climate change hot-spots*. Geophysical Research Letters, 33, CitelID L08707.

Les premiers résultats de l'INRA et du CIRAD

Extraits d'un article de presse INRA⁽¹⁾

Grâce à leurs stations de mesure installées sur tout le globe, les chercheurs de l'INRA et du CIRAD ont déjà obtenu des résultats novateurs améliorant la compréhension des interactions entre les forêts et l'atmosphère.

En Europe, trois programmes successifs ont permis de comprendre et modéliser le rôle des forêts dans le cycle du carbone et leur capacité à séquestrer le CO₂ atmosphérique. Ce réseau met en œuvre des méthodes nouvelles de mesure des flux d'eau et de CO₂ au-dessus des couverts végétaux. Les données recueillies sont mutualisées dans des bases de données internationales qui permettent l'analyse du fonctionnement des forêts en fonction de l'espèce, du climat, du sol ou de la gestion.

En Lorraine

Le site de la forêt de Hesse, géré par l'unité « Ecologie et écophysiologie forestières » (INRA Nancy) possède deux intérêts majeurs :

→ il offre une des plus longues séries de données disponibles dans le monde (13 ans en 2008) ;

→ c'est aussi une des rares jeunes forêts feuillues (hêtre) étudiées dans le réseau européen dans lequel ce site s'intègre.

Pendant la période non feuillée, donc en l'absence de photosynthèse, cet écosystème constitue une source de carbone pour l'atmosphère, à cause des pertes respiratoires des organes vivants de l'écosystème (branches, troncs et racines) et de la décomposition des débris végétaux ou de la

matière organique du sol. Au cours de la période feuillée, de mai à octobre, la photosynthèse est nettement supérieure aux pertes de carbone : l'écosystème montre une fixation nette de carbone.

Sur une année, la forêt de Hesse en croissance représente un puits de carbone, en moyenne d'environ 4 tonnes de carbone par hectare et par an. La majeure partie de ce carbone stocké correspond à la croissance en biomasse aérienne et souterraine des arbres.

En Guyane

Le site « Guyaflux » a été installé en 2003 dans la forêt tropicale humide de Guyane française par l'INRA, dans le cadre des activités scientifiques de l'unité « Ecologie des Forêts de Guyane ». Il existe encore très peu de mesures sur les forêts tropicales humides ou sèches et le fonctionnement de la forêt guyanaise est fondamentalement différent de celle d'une forêt tempérée. Cet écosystème est caractérisé par une diversité d'espèces d'arbres très importante. On compte environ 150 espèces d'arbres par hectare, pour une richesse totale d'espèces d'arbres de l'ordre de 1 400 espèces. De plus, les variations de la durée du jour ou de la température de l'air sont peu importantes au cours de l'année à proximité de l'équateur, et

l'écosystème forestier tropical humide est composé en majorité d'arbres à feuilles persistantes. Il reste donc « vert » toute l'année, avec une chute de litière continue, et la photosynthèse et les pertes respiratoires restent élevées toute l'année. En période de pluies, la forêt guyanaise se comporte comme une source de carbone pour l'atmosphère, car la photosynthèse est un peu moins importante que les pertes respiratoires. En saison sèche, au contraire, la photosynthèse est maximum et les pertes respiratoires réduites (en particulier au niveau du sol) en relation avec la diminution de l'eau dans le sol. L'écosystème se comporte alors comme un puits de carbone. De façon surprenante, puisque l'on considère que l'écosystème étudié est une forêt mature, très ancienne et non gérée, l'écosystème étudié est au final un puits de carbone, de l'ordre de 1 à 1,5 tonnes de carbone par hectare et par an. L'origine de ce puits reste méconnue mais pourrait être expliqué en partie par le réchauffement climatique (+ 0,8 °C en Guyane depuis un siècle), l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère depuis l'ère industrielle qui favorise la photosynthèse, ou la dynamique forestière locale de l'écosystème étudié (phase de maturation). ■

⁽¹⁾ Service Presse de l'INRA (tél: 01 42 75 91 69). La version intégrale est téléchargeable sur: www.inra.fr/presse/role_forêts_cycle_carbone

Incertitudes sur les stocks de carbone dans les forêts françaises

Claude Nys*, Arnaud Legout*, Sandrine Lecoïnte**, Christian Walter**⁽¹⁾

Dans le cadre actuel de nos connaissances, il est illusoire de vouloir répondre à l'impact d'un changement climatique sur la capacité des écosystèmes forestiers nationaux à stocker du carbone. Les estimations calculées par extrapolation des mesures de carbone à l'échelle du peuplement vers l'échelle de la région ou des continents sont actuellement entachées d'une erreur probablement supérieure à 65 %.

Bien qu'elles ne couvrent que 30 % de la surface des continents, les forêts contiennent 81 % du carbone de la biomasse terrestre (Dupouey *et al.*, 1999). Elles possèdent des capacités importantes d'accumulation de carbone dans la végétation, les humus ou les sols (Dixon *et al.*, 1994). Par ce rôle de puits, elles pourraient contribuer à limiter l'effet de serre en immobilisant une partie du carbone émis lors de l'utilisation des sources d'énergies fossiles. Lors des conférences d'Helsinki (1993) et de Kyoto (1997), il fut décidé d'établir un inventaire précis des stocks de carbone et de ses possibilités d'accumulation dans les forêts.

Ces travaux d'inventaires ont été menés à l'échelle des sols forestiers de France, puis – afin d'explicitier les causes des erreurs estimées – les facteurs de variations de ces stocks de carbone dans chacun des compartiments de l'écosystème (sol, humus, végétation) ont été analysés aux échelles de la parcelle et du massif forestier.

Matériels et méthodes

Origines des données

À l'échelle de la France, les 713 pla-

cettes « sol + humus » prises en compte dans cette étude recouvrent diverses régions climatiques. Ces placettes sont issues de plusieurs projets : « Hêtraie du Nord-Est de la France », « Changement globaux » (INRA), « Renécofor » (ONF), « Réseau européen » (DSF) et des données de l'INRA. Les espèces les plus représentées sont le hêtre, le chêne pédonculé, l'épicéa commun, le Douglas, le sapin pectiné et le pin sylvestre.

À l'échelle du peuplement et du massif, les 127 écosystèmes retenus sont ceux du site atelier « Hêtre de plaine du Gip Écofor-ONF » situé en forêt domaniale de Fougères en Bretagne (35).

Évaluation du stock de carbone

Dans le sol, entre 5 et 10 prélèvements (répétitions) par site ont été réalisés. Pour les humus, les couches organiques (OL, OF, OH) sont prélevées sur 0,1 m², séchées (65 °C) et pesées ; le carbone est déterminé, après broyage fin, par combustion dans un analyseur automatique (CHN). Pour le sol, les horizons sont prélevés par niveau (de 10 ou 15 cm d'épaisseur selon les études). L'échantillon est séché à l'air (30 °C), tamisé puis broyé avant détermination du carbone soit par oxydation humide au bichromate de potassium, soit par combustion (CHN).

Les deux méthodes sont comparables⁽²⁾. Le stock est évalué en utilisant soit la mesure de la densité apparente du sol (masse volumique), soit un modèle alternatif (Arrouays *et al.*, 1999 ; Dupouey *et al.*, 1999).

Dans le peuplement, les inventaires du C130 (circonférence du tronc à 1,30 mètre de hauteur), permettent d'obtenir indirectement la biomasse de l'arbre. Dans un but d'homogénéité des données, le cercle de 5 mètres de rayon préalablement défini pour prélever les humus et les sols, a été aussi retenu pour l'étude de la végétation, mais son rayon a été élargi à 15 m pour les inventaires des arbres de plus de 60 ans. La biomasse de chaque arbre a été estimée à partir d'équations de régression (appelées « modèles allométriques »). Nous avons donc établi ou sélectionné dans la littérature les équations de régression pour chacune des espèces ligneuses rencontrées (Lecoïnte, 2003).

Des relevés botaniques ont été réalisés sur la strate herbacée et arbustive. La relation utilisée pour estimer la biomasse herbacée (en g) utilisant le pourcentage de recouvrement (Rec), est : $Y = 4,1010 + 0,2483 \times \text{Rec} + 0,0376 \times \text{Rec}^2$, avec $r^2 = 0,64$

Ces biomasses par point sont ensuite converties en stock de carbone.

La teneur en carbone varie de 460 g/kg à 500 g/kg de biomasse végétale. Les variations correspondent principalement aux différences d'âge, d'espèces et d'organes de l'arbre (Huet *et al.*, 2004).

Stratégie d'échantillonnage

Les données bibliographiques concernant le stockage du carbone dans la végétation, dans les humus et dans les sols des forêts tempérées montrent que les facteurs discriminants de variation des stocks de carbone sont les perturbations « naturelles » (feu, attaques parasitaires, tempête), les pratiques sylvicoles (éclaircie, fertilisation), la nature des essences forestières, l'âge des peuplements, et le type de sol.

À chaque échelle de travail, le plan d'échantillonnage a permis de prendre en compte ces facteurs de variation. Des zones homogènes par le peuplement et les sols ont été identifiées, et dans ces zones, des points ont été sélectionnés pour les observations et les prélèvements (Lecoite *et al.*, 2006).



Résultats

Variabilité des stocks de carbone des sols de France

Les types de sol étudiés pour l'analyse du stock de carbone recouvrent une large gamme de sols. Un regroupement par type de sol a été effectué pour les statistiques. Les sols bruns acides sont les plus représentés avec 30 % de l'ensemble des placettes. Les sols bruns calciques sont les moins représentés avec 8 %. Le groupe de sol 'Podzols' se caractérise par une litière où les concentrations en carbone sont significativement les plus élevées. Le stock de carbone est significativement le plus élevé dans le groupe 'Sols bruns acides'.

Les stocks totaux de carbone par groupe de sol montrent une variabilité très

élevée dans les humus. Le coefficient de variation⁽³⁾ est supérieur à 100 %, quel que soit le groupe de sol (Tableau 1). Dans la couche minérale, la valeur du coefficient de variation est plus faible (\cong 65 %) et le groupe 'Sols bruns calciques' a la variation la moins importante.

La première source de variabilité est celle de la masse de matière sèche. Il est donc important de rechercher à réduire cette variabilité par une représentativité maximale du site étudié.

La prédiction de la masse volumique ou densité apparente du sol est une étape importante de ce calcul de stock dans les sols en raison de l'absence générale de sa mesure dans les bases de données disponibles et du coût de sa mesure sur le terrain. Le modèle établi reste limité dans son application car le nombre de données était insuffisant pour les couches de profondeur supérieure à 65 cm.

Une deuxième source de variabilité est l'espèce forestière qui croît sur le type de sol et qui explique une partie de la variabilité décrite dans le tableau 1. Cette variabilité est illustrée dans le tableau 2. Les coefficients de variation sont toujours élevés. Les espèces ont un impact significatif sur le stock de carbone de l'humus, plus aléatoire dans les sols car il y a des transferts de

matière organique en particulier par l'action des vers de terre. Ces résultats reflètent la vitesse de décomposition des humus selon les essences (décomposition rapide pour les chênes et lente pour les pins).

La qualité des résultats des stocks de carbone est impérative si l'on envisage de répondre aux questions du rôle de l'espèce forestière et du type de sol dans l'accumulation du carbone atmosphérique et de définir la sensibilité des évolutions. Pour une estimation agronomique des stocks, 5 répétitions sont suffisantes (erreur tolérée 10 %). Mais pour pouvoir estimer une évolution, il convient d'améliorer la qualité de la base de données sur les sols forestiers par un accroissement du nombre des répétitions (20 points au lieu de 5) et par l'analyse de chacun des échantillons au lieu de la moyenne comme cela a été le cas pour près de la moitié des sites de cette étude ; cela afin de préciser la variabilité à l'intérieur du site.

Nos incertitudes sur les stocks de carbone donnent des valeurs importantes de l'erreur sur les estimations des stocks, souvent supérieure à 65 %. C'est la raison pour laquelle, dans le cadre actuel de nos connaissances, il est illusoire de vouloir répondre à l'impact d'un changement climatique sur

Tableau 1 : Coefficients de variation (CV) des moyennes de la concentration et du stock de carbone des différents groupes de sol pour les humus et la couche minérale comprise entre 0 et 65 cm de profondeur

Groupes de Sol	Concentration en carbone				Stocks de carbone			
	Humus		0-65 cm		Humus		0-65 cm	
	n	CV (%)	n	CV (%)	n	CV (%)	n	CV (%)
Rendzines, Bruns calcaires	119	23	115	62	112	165	113	88
Bruns calciques	61	20	54	64	58	127	51	40
Bruns	114	21	117	88	104	129	116	70
Bruns acides	203	21	241	84	260	138	160	73
Podzols	109	25	130	76	92	135	119	73
Pseudogley, Gley	59	18	144	71	70	203	142	55

n = nombre de placettes par type de sol.

Tableau 2 : Stocks de carbone (en tonnes par hectare) des couches d'humus et des sols (de 0 à 65 cm de profondeur) sous différentes essences forestières et par type de sol

		Types de sol													
		Sols bruns calcaires Rendzines		Sols bruns calciques		Sols bruns		Sols Bruns acides		Sols Podzoliques		Sols lessivés Pseudogley			
		Rendosol - Calcisol		Calcisol		Brunisol		Alocrisol		Podzosol		Luvisol - Redoxisol			
Essences forestières	Couches	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm	Humus	0-65 cm
	Chêne sessile	Moyennes ±	3,8 4,6	51,8 13,5	2 0,8	112,1 14,2	3,9 0,8	97,4 26,8	11,4 6,9	100 31	7,8 3,5	119,8 42	19,4 9,4	26 9,7	
	Chêne pédonculé	Moyennes ±	4,6 2,8	93,9 252,5	4,1 3,1	85,2 33,7	4,2 0,9	95,6 37,1	6,7 2,3	68,6 29,9	4,1 2,7	72,3 7,9	5,5 2,7	72,3 10,2	
	Hêtre	Moyennes ±	8,1 4,2	120,1 39,6	7,8 4,3	106,3 19,6	9,3 5,3	95,9 31,4	10,8 3,6	120,1 48,5	8,3 4,8	76,7 31,3	4,9 3,9	90,4 40,1	
	Sapin pectiné	Moyennes ±	9,6 13,2	80,6 142,6	18,7 48,8	131,5 23,2	12,6 13,8	152,2 209,1	15 4,6	109,3 26,8	4,2 -	63,3 21,9	4,9 30,2	59,3 384,2	
	Douglas	Moyennes ±	-	-	-	-	18,3 25,9	81,3 78,7	9,7 3,6	129,5 35,5	21,5 243,3	61,3 20,8	4,1 2,9	48,2 33,4	
	Mélèze	Moyennes ±	10,1 101,1	109 369,9	-	-	7,5 20,9	121,9 166,9	6,9 2,7	79 65,2	16,5 -	49,8 28,4	4,6 20,9	43,5 40,7	
	Epicéa commun	Moyennes ±	7,4 6	87 43,5	15,7 21,3	130,3 60,4	18,7 16,4	117,7 66,5	18,6 7,4	100,8 24,6	8,5 18,6	80,7 30,9	6,3 3,5	83,5 40,3	
	Pin maritime	Moyennes ±	70,7 62,8	30,8 13,6	-	-	12,8 8,6	90,6 67,7	33,5 20,6	102,1 47,6	8 1,8	105,9 46,5	51,6 -	84,5 33,8	
	Pin sylvestre	Moyennes ±	10,2 6,1	90,3 38,3	7,9 52,8	44,3 -	18,1 18,7	98,6 75,9	32,6 14,3	90,6 78,6	31,8 29,3	78,2 42,1	53,6 61,9	99,6 32,5	

Les chiffres en italiques représentent l'incertitude sur l'estimation avec 95 % de chance de ne pas se tromper. Les noms des sols sont ceux de la nomenclature de Duchaufour (ligne du haut) et la correspondance avec le référentiel pédologique français (AFES) est précisée en-dessous.

La capacité des écosystèmes forestiers nationaux à stocker du carbone. Il nous faut donc comprendre les règles qui gèrent cette variabilité à des échelles plus grandes, comme celles du peuplement forestier et de son extrapolation au massif. C'est ce que les équipes du dispositif ORE F-ORÉ-T du Gip Écofor essayent d'évaluer sur les sites ateliers comme celui de la hêtraie de plaine à Fougères (Bretagne).

Variabilité des stocks de carbone dans la hêtraie de Fougères

Le tableau 3 donne les stocks de carbone médians en tC/ha dans les différents compartiments de la végétation, les sols et dans les humus.

Les stocks dans les humus et dans le sol varient relativement peu entre les classes d'échantillonnage. Pour l'ensemble des sites échantillonnés, ils se situent entre 0 et 50 tC/ha dans les humus et

de 100 à plus de 300 tC/ha dans les sols. La végétation est le compartiment aux stocks les plus variables, avec des valeurs de 0 à plus de 600 tC/ha.

Facteurs de variabilité spatiale des stocks de carbone

Âge des peuplements

Pour les feuillus, les tests statistiques (Kruskall-Wallis) montrent un effet significatif de l'âge des peuplements sur les stocks de carbone dans la végétation et dans les humus, mais pas pour le sol. L'âge des peuplements, par la biomasse sur pied, est une source majeure de variabilité des stocks de carbone sur le massif forestier de Fougères. L'incertitude sur l'estimation pour le sol est plus grande que la mesure d'évolution du stock avec l'âge du peuplement.

Effet de l'espèce

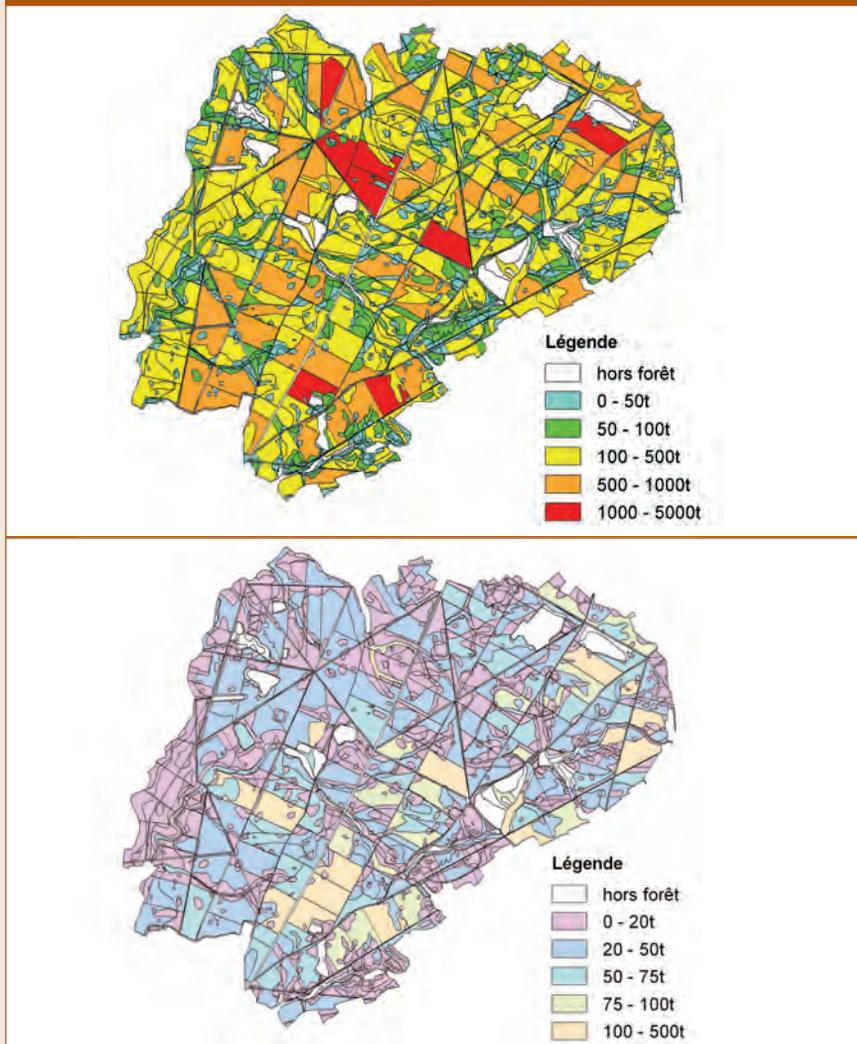
Le massif de Fougères est une hêtraie pour 70 % de sa surface. Les peuplements résineux ou les peuplements des zones humides sont significativement différents, mais uniquement

Tableau 3 : Stocks de carbone et sa variation dans les différents compartiments de l'écosystème forestier. Impact de l'âge et de l'espèce

class	Surface (ha)	Humus		Sol		Végétation		Total	
		Stocks (tC/ha)	± (tCha)	Stocks (tC/ha)	± (tC/ha)	Stocks (tC/ha)	± (tC/ha)	Stocks (tC/ha)	± (tC/ha)
Feuillus 0-15 ans	289	9,2 a	11,9	134,3 a	40,7	0,04 a	38,9	143,8	46
Feuillus 15-60 ans	329	10,8 a	4,4	128,2 a	50	86,7 b	7,5	230,5	14,6
Feuillus 60-90 ans	258	18,4 b	9	124,8 a	39,3	209,1 c	6,7	361,4	14,1
Feuillus >90 ans	463	18,7 b	15,5	138,8 a	45	220,7 d	29,5	373	36,9
Résineux	87	22,9 b	9,6	138,2 a	52,3	139,2 e	22,8	291,5	30,2
Zone Humide	139	5,4 c	31,5	234,2 b	104,5	6,8 f	86,7	246,6	131,4
Massif	1566	14,6	8,9	136,2	8,9	112,9	164,8	269,1	109,4

Les lettres indiquent des différences significatives.

Figure 1 : Carte des stocks médians totaux de carbone (en haut) et carte de leur dispersion, en tonnes de carbone



pour la végétation. L'âge des peuplements engendrerait, ici, plus de variabilité des stocks que les essences. Le coefficient de détermination (r^2) indique que 13 % de la variabilité des stocks de carbone dans les humus peut s'expliquer par leur épaisseur et 18 % de cette variabilité dépend des stocks de carbone dans la végétation.

Effet du type de sol

Le massif de Fougères est particulièrement homogène. Seules les zones de bas fonds hydromorphes sont discriminées (Legout *et al.*, 2008). Une étude complémentaire (Eglin *et al.*, 2008) montre que la transition est progressive sur les pentes faibles (< 10 %), rapide et forte sur les pentes des vallons encaissés.

Estimation et cartographie des stocks totaux sur le massif forestier

Les humus représentent 5 % des stocks totaux, la végétation 45 % et les sols 50 %. Sur l'ensemble du massif forestier de Fougères, la végétation représente un stock compris entre 198 000 tC et 241 000 tC. Les sols contiennent la plus grande part des stocks de carbone, avec un total variant de 222 000 à 239 000 tC. Les humus stockent 22 000 à 25 000 tC.

La *figure 1* présente la carte des stocks médians totaux et celle de leur dispersion (erreur). La majorité des parcelles présente un stock compris entre 100 et 500 tC. La dispersion s'avère nettement plus hétérogène et peut

aller jusqu'à 100 à 500 tC. Les parcelles des classes de peuplements entre 30 et 90 ans présentent des dispersions faibles et les plus élevées concernent les classes des jeunes ou des très vieux peuplements (> 90 ans).

Après avoir réalisé le changement d'échelle, nous obtenons une fourchette d'estimation du stock total. Le massif forestier de Fougères contient donc un stock de carbone total compris entre 442 191 tC et 505 151 tC, ce qui correspond à un stock total par hectare compris entre 282,5 tC/ha et 322,6 tC/ha. L'écart entre les deux bornes de cette fourchette d'estimation est de l'ordre de 15 %.

Conclusion

Les estimations des stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers ne sont pas faciles à établir du fait de la grande diversité des massifs forestiers français. Ces travaux démontrent que l'estimation du stock de carbone est fonction du type de sol, de l'espèce forestière, et pour chacune de ces espèces, de son âge. Il y a peu d'estimations de l'incertitude liée aux effets propres de la sylviculture ou des conditions climatiques. Les mesures dans les sites ateliers apporteront des connaissances sur les processus mis en jeu, et le développement de modèles permettra d'estimer les changements de vitesse des flux que l'on peut attendre en fonction des scénarii de changements climatiques ou sylvicoles.

Il faut donc être conscient que les estimations calculées par extrapolation des mesures à l'échelle du peuplement vers celle de la région ou des continents sont actuellement entachées d'une erreur élevée, probablement supérieure à 65 %.

Remerciements

Ces travaux n'ont pu être réalisés qu'avec l'aide technique des personnels de l'Inra (S. Didier, L. Gelhaye, C. Hossann, S. Belkacem, J. Marchand,

G. Dutin, J.C. Marie, B. Lemerrier
et aux financements de l'ONF et
du Ministère de l'environnement
(AGRIGES).

(1) * INRA, Centre de Nancy, Biogéochimie des
Écosystèmes Forestiers, 54280 Champenoux,
France; nys@nancy.inra.fr

** UMR INRA/Agrocampus Sol-Agronomie-
Spatialisation, 65 rue de St Briec - CS 84215,
F-35042 Rennes Cedex;

Christian.Walter@agrocampus-rennes.fr

(2) r^2 de 0,98, $n = 630$, Carbone (%) = 0,4844 x
(Pertes au feu %) - 1,0004 (Belkacem et al.,
1998).

(3) Plus le coefficient de variation est grand, plus
la dispersion des valeurs autour de la moyenne est
importante (grande hétérogénéité entre les
valeurs constituant la moyenne). Lorsque le coef-
ficient de variation est supérieur à 25 %, il est
considéré très élevé.

Résumé

Lors du protocole de Kyoto (1997), il fut décidé d'établir un inventaire précis des stocks de carbone dans les forêts. Une première approche à l'échelle locale a été conduite sur les sols forestiers de France et sur les écosystèmes d'un massif forestier de 1 566 hectares à Fougères (Bretagne). Les stocks y ont été mesurés dans les humus et dans les sols et estimés dans la végétation. La seconde étape a été une extrapolation de ces données à tout le massif en se basant sur l'analyse des facteurs de variabilité des stocks dans la forêt de Fougères. Il en résulte, d'une part, une estimation du stock total entre 442 000 tonnes de carbone et 505 000 tonnes de carbone, ce qui équivaut à 282 tonnes de carbone par hectare et 322 tonnes de carbone par hectare, et, d'autre part, une tentative de quantification de l'erreur. La moitié de ces stocks s'accumule dans les sols de la forêt de Fougères, 45 % dans la végétation et 5 % dans les humus.

Mots-clés : stocks de carbone, massif forestier, changement d'échelle, biomasse végétale, humus.

Bibliographie

- **Arrouays (D.), Deslay (W.), Daroussin (J.), Balesdent (J.), Gaillard (J.), Dupouey (J.L.), Nys (C.), Badeau (V.) & Belkacem (S.), 1999** - Stock de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? C. r. Acad. Agric. Fr., Séance du 19 Mai 1999, 85, 6 : 278-292.
- **Belkacem (S.), Nys (C.) & Dupouey (J.L.), 1998** - Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers : Importance de la sylviculture et du milieu sur la variabilité, AIP AGRIGES 1995/96/DPE n°6 - 95/329/P00006. Nancy, Institut de la Recherche Agronomique, 68 p.
- **Dixon (R.K.), Brown (S.), Houghton (R.A.), Solomon (A.M.), Trexler (M.C.), Wisniewski (J.), 1994** - Carbon pools and flux of global forest ecosystems, Science, 263, 185-190.
- **Dupouey (J.L.), Pignard (G.), Badeau (V.), Thimonier (A.), Dhôte (J.F.), Nepveu (G.), Bergès (L.), Augusto (L.), Belkacem (S.) & Nys (C.), 1999** - Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises, C.R. Acad. Agric. Fr., 85 (6), 293-310. Rev. for. fr., LII, n° Spéc. : « Conséquences des changements climatiques pour la forêt et la sylviculture » : 139-154.
- **Eglin (Th.), Walter (C.), Nys (C.), Forgeard (F.), Squidant (H.), Follain (S.), Legout (A.), 2008** - Influence of waterlogging on carbon stock variability at slope scale in a beech forest (Fougères Forest - W. France) Ann. For. Sci., 5 (),
- **Huet (S.), Forgeard (F.) & Nys (C.), 2004** - Above- and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. Ann. for. Sci, 61, (7), 683-694.
- **Lecoite (S.), 2003** - État des connaissances sur l'accumulation du carbone dans la biomasse végétale et dans la litière des forêts tempérées, Mémoire bibliographique, DAA, ENSA Rennes, 21p.
- **Lecoite (S.), Nys (C.), Walter (C.), Forgeard (F.), Huet (S.) Recena (P.) & Follain (S.), 2006** - Estimation of carbon stocks in a beech forest (Fougères Forest - W. France) : extrapolation from the plots to the whole forest. Ann. For. Sci., 63, (1), 139-148.
- **Legout (A.), Walter (C.), Nys (C.), 2008** - Spatial variability of nutrient stocks in the humus and soils of a forest massif (Fougères, France) Ann. For. Sci., 65, (1),
- **Recena (P.), 2003** - Estimation des stocks de carbone dans les sols et la litière à l'échelle d'un massif forestier. Cas du massif forestier de Fougères (Ille-et-Vilaine), Mémoire de fin d'études, DAA ENSA Rennes, 35 p.

Explication des termes statistiques utilisés

Le coefficient de variation (CV) est la mesure de la dispersion relative. C'est la valeur du rapport « écart-type/moyenne ».

L'incertitude désigne la marge d'imprécision sur la valeur de la mesure d'une grandeur physique.

L'erreur statistique est due à l'extrapolation des résultats d'une étude effectuée sur un échantillon.

La dispersion, en mesure physique (métrologie), est estimée par l'écart type, qui sert à calculer l'erreur de mesure. C'est l'image de la variabilité de la population des échantillons.

La moyenne arithmétique se calcule comme la somme des valeurs numériques divisée par le nombre d'individus de la série.

La médiane correspond à la valeur qui partage la série numérique ordonnée en deux populations égales.

Une différence significative signifie qu'il existe une réelle différence des populations dont sont extraits des échantillons.

Les forêts et le carbone en question

Entretien avec Vincent Gitz, par Christophe Drénou

Vincent Gitz est polytechnicien, ingénieur du Gref (Génie rural, des eaux et des forêts), économiste et docteur en sciences de l'environnement. Il est spécialiste des questions de modélisation intégrée économie/énergie/agriculture/sciences de la nature (dont cycle du carbone et climat). En 2007, il a reçu le prix Le Monde de la recherche universitaire pour sa thèse intitulée « Usage des terres et politiques climatiques globales ». Depuis 2004, il est chercheur au Cired de Nogent-sur-Marne (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement).

Forêt-entreprise: Selon vous, la forêt et les produits issus du bois (bois d'œuvre, bois-énergie) sont-ils une solution contre le changement climatique ?

Vincent Gitz: Oui, mais il y a une différence fondamentale entre le bois d'œuvre et le bois-énergie. Le bois d'œuvre est efficace de deux façons: d'une part il permet d'augmenter la « durée de vie » du carbone ligneux (17 à 19 ans en moyenne tous produits confondus en France); d'autre part il permet d'éviter l'emploi de matériaux à haute empreinte énergétique tels que le béton ou l'acier (NDLR: « gourmands » en énergie pour leur fabrication).

Concernant l'augmentation de la durée de vie des produits, il en découle une augmentation du stock de bois d'œuvre qui sera autant de carbone stocké. Mais quand nous aurons atteint un plafond de durée de vie des produits, l'effet sur l'atmosphère redeviendra nul, puisque tous les stocks (en forêt et sous forme de produits) seront à nouveau constants en moyenne. L'augmentation, nécessairement finie, de la durée de vie des

La destruction des forêts tropicales est à terme plus dommageable pour le climat que le simple déstockage, lors du défrichement, du carbone qu'elles contenaient.



© Christophe Drénou, IDF

produits ne peut donc constituer qu'une mesure transitoire. **L'intérêt prédominant vient en revanche du fait que ces produits se substituent à l'usage de matériaux à haute intensité énergétique.** Cet effet est lui permanent et vaut pour chaque m³ de bois ainsi utilisé dans la construction, et même sans augmentation du stock de bois d'œuvre.

Le bois-énergie quant à lui est un substitut direct à l'énergie fossile. Cependant le bilan net sur l'effet de serre doit être nuancé en raison du « coût énergétique » en transport des systèmes traditionnels de bois-énergie. Cela reste aussi une mesure coûteuse. L'avenir s'annonce cependant prometteur pour la production de biocarburants dits « de seconde génération » (à partir d'espèces à courte rotation et à fort contenu en cellulose comme le peuplier, par voie soit enzymatique, soit thermochimique). Les biocarburants seront d'autant plus demandés que les transports seront un des secteurs où la lutte contre l'effet de serre sera la plus difficile et coûteuse, bien plus que dans les systèmes centralisés de production d'énergie.

FE: Depuis quelques années, les industriels se prennent de passion pour les arbres. La forêt ne risque-t-elle pas d'être utilisée pour blanchir les pollueurs ?

VG: Il y a un effet de mode, qui a certainement pour inconvénient de laisser croire que l'utilisation d'un crédit carbone forestier peut régler tous les problèmes. Or si des programmes de plantation conduisent à effectivement stocker du carbone, ils ne sont utiles qu'à la marge, et l'issue du problème climatique dépend au final de la transformation du système énergétique. Acheter des plantations d'arbres, en compensation des émissions de CO₂ lors de la location d'une voiture, ne fonctionnera qu'un temps. À terme,

lorsque tous les potentiels de plantation seront épuisés, il faudra bien trouver une solution de transport « propre ».

Dans cet ordre d'idée, l'utilisation de la forêt est surtout un moyen de « gagner du temps » pour que les particuliers ou les industriels puissent changer leur mode de fonctionnement et de production plus progressivement, et donc sans supporter des coûts trop élevés.

FE: Certains demandent que la sylviculture soit rémunérée pour le carbone qu'elle stocke par accroissement du volume de bois sur pied. Faut-il selon vous encourager financièrement le stockage du carbone en forêt? Faut-il plutôt se diriger vers une taxation des énergies fossiles ?

VG: La taxation des énergies fossiles semble plus simple à mettre en place que la rémunération de projets forestiers. Cependant, dans la mesure où les accroissements de stocks forestiers sont aussi réels que les stocks d'émissions fossiles évitées, il serait incohérent de ne pas les rémunérer de la même manière. Mais si on veut être cohérent, il faudra aussi comptabiliser la fin de vie des produits du bois. Le crédit carbone ne peut donc, en toute logique, être que temporaire. Il aura certainement pour impact de favoriser une légère augmentation de la durée de vie des rotations.

La transmission du crédit lors de la vente de bois fait aussi partie des grandes questions. S'il est facile de comptabiliser le carbone « sur pied », les choses se compliquent après la coupe, étant donné la multiplicité des filières. Il sera probablement plus simple de rémunérer uniquement le forestier. Mais se posera alors le problème de la création d'incitations dans la filière aval jusqu'à la consommation : celle-ci aura probablement un grand rôle à jouer et voudra

aussi être « récompensée » pour cela. Dans le cas des filières bois-énergie à courte rotation au contraire, il y a un risque pour que les forestiers ne récupèrent aucun crédit carbone, de même que l'activité de conversion de rotations longues vers des rotations courtes implique un débit carbone.

Il faudra donc inmanquablement se poser la question du partage, nécessairement complexe, des crédits le long de la filière bois, une question qui revient à revoir la formation des prix intermédiaires le long de la filière.

FE: Vous avez montré qu'une tonne de carbone émise par déforestation contribue plus à l'augmentation du CO₂ atmosphérique (jusqu'à 55 %) qu'une tonne d'émission de carbone fossile. Pour quelles raisons ?

VG: L'idée est simple : un monde où l'Amazonie et les forêts équatoriales africaines auraient disparu d'ici à 2050, serait un monde où non seulement nous aurions perdu un grand stock de carbone, mais où aussi nous nous retrouverions privés d'un important mécanisme compensatoire de l'augmentation des concentrations. Ce mécanisme est lié au fait que la photosynthèse est stimulée globalement par la hausse des températures (par exemple l'allongement de la saison de croissance) dans l'hémisphère Nord, et partout par l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Cette augmentation du « flux entrant » de l'atmosphère vers la biomasse ne se traduit qu'après un certain délai, égal au temps de résidence du carbone dans le système plante-sol, par une augmentation équivalente des « flux sortants » vers l'atmosphère. D'où un stockage net de carbone dans l'écosystème, tant que la photosynthèse est croissante, et d'autant plus important que le temps de résidence du carbone dans la végétation et les sols est élevé.

Aujourd'hui, grâce à ce phénomène, près d'un quart des émissions anthropiques de CO₂ sont converties à terme en augmentation de stock des écosystèmes forestiers primaires, alors qu'un autre quart va dans l'océan. Un énorme cadeau dans le problème de l'effet de serre. Les écosystèmes de types prairies ou cultures issues du défrichement « recyclent » le carbone plus rapidement et leur capacité de stockage additionnel est moindre. Ainsi, la perte des forêts est à terme plus dommageable pour le climat que le simple déstockage, lors du défrichement, du carbone qu'elles contenaient.

FE: Selon vous, une tonne de carbone séquestrée par une jeune forêt en croissance peut-elle compenser une tonne de carbone fossile? Un hectare de boisement (d'une terre agricole par exemple) compense-t-il un hectare de déforestation?

VG: Du simple point de vue du bilan de masse de carbone, oui. Mais il ne faut pas oublier qu'il faudra comptabiliser la fin de vie du bois, au même titre que l'on comptabilise la « fin de vie » d'un stock de produit fossile. Le raisonnement à l'hectare est moins immédiat, car il y a une asymétrie forte entre une perte rapide lors du défrichement, et un gain relativement long à se manifester

lors du reboisement. C'est d'ailleurs pour cette raison que le mécanisme de crédit carbone n'est finalement intéressant pour le forestier que s'il entre en vigueur alors que ses forêts sont jeunes, en début de rotations.

FE: Que pensez-vous du protocole de Kyoto? Quel est son avenir après 2012?

VG: Le protocole de Kyoto est un premier pas indispensable pour le règlement du problème climatique. Les volumes de réduction, même économiquement ambitieux, sont finalement faibles eu égard au problème de la stabilisation des concentrations, d'autant que les pays en développement et les États-Unis, qui seront parmi les principaux émetteurs dans le futur, en sont exclus. Par contre, il est indéniable que la Convention Climat de Rio et le Protocole ont mis en place un mécanisme relativement robuste et mondialement partagé de décision et de concertation dans le problème du climat. Tous les pays du monde se réunissent chaque année, depuis maintenant 15 ans sans interruption et sans que cela soit remis en cause, pour discuter des instruments pour résoudre le problème. Les États-Unis eux-mêmes, même s'ils ont refusé de ratifier le Protocole de Kyoto, n'ont pas quitté la table de

négociation. Il n'y a pas beaucoup d'autres exemples de gouvernance mondiale sur une aussi bonne voie.

Il faudra cependant aller beaucoup plus loin, et le principal défi de l'après-2012 sera de convaincre les pays en développement de rentrer dans des engagements quantitatifs. Le mode de prise en compte de la forêt aura probablement, une fois encore, son rôle à jouer dans le jeu diplomatique entre pays développés et pays en développement, dans la mesure où certains de ces pays, comme le Brésil, sont aussi les principaux touchés par la déforestation.

FE: Que pensez-vous de l'idée lancée par les Nations unies: « Plantons pour la planète: la campagne pour un milliard d'arbres »?

VG: L'arbre n'est pas seulement utile pour la question du carbone, du climat, de la dégradation des écosystèmes ou des sols: c'est aussi un beau symbole de la transmission de valeurs entre générations, de solidarité. Qui sait? D'ici plusieurs générations, nos arrière-petits-enfants iront peut-être se promener dans des forêts ainsi plantées et on leur expliquera qu'elles sont les témoignages vivants qu'à une époque, l'homme a eu à faire face avec imagination au problème du changement climatique. ■



Retrouvez dans le dossier Climat en ligne sur le site de la forêt privée des informations complémentaires sur le changement climatique et le carbone : actualités, colloques et formations, articles et documents à télécharger, livres et revues à commander, liens...

<http://www.foretpriveefrancaise.com/climat/>

Nouvelle version été 2008

Une librairie en ligne plus belle et plus ergonomique. Les couleurs du portail qui changent au fil des saisons.



La forêt a aussi un rôle à jouer

Christophe Drénou, ingénieur à l'IDF

Le concept de forêt/puits de carbone semble connaître son heure de gloire. Pourtant, la forêt n'est pas uniquement un remède potentiel contre les émissions de CO₂. Elle a également sa part de responsabilité et risque d'être victime des changements climatiques.

La forêt présente plusieurs facettes vis-à-vis du carbone et de son cycle : à la fois responsable d'émissions, victime du changement climatique, mais aussi génératrice de solutions contre le renforcement de l'effet de serre. Il s'agit de proposer les meilleures stratégies pour maximiser le rôle bénéfique des forêts.

Une forêt responsable

Trois sources de carbone sont venues perturber le cycle du carbone : la combustion des énergies fossiles, la déforestation tropicale et la mise en culture des tourbières en Asie du Sud-Est. La première va se tarir au cours des décennies à venir. Les deux autres sont préoccupantes car l'éventualité d'une diminution des surfaces agricoles n'est pas à l'ordre du jour sur une planète qui connaît une augmentation galopante de sa démographie et une forte demande en biocarburants. La lutte contre la déforestation tropicale et la dégradation des tourbières est aujourd'hui exclue du protocole de Kyoto. Cet oubli est grave et il est urgent de le réparer en priorité, ce qui a enfin été reconnu lors de la conférence des Nations unies (ONU) sur les changements climatiques tenue à Bali en décembre 2007.



La forêt et les produits forestiers, ensemble, ont un rôle à jouer contre le renforcement de l'effet de serre.

Une forêt victime

La photosynthèse est actuellement stimulée par les activités humaines (CO₂ et dépôts azotés) mais cet effet va-t-il perdurer ? En situation de stress hydrique, la photosynthèse risque de diminuer (par fermeture des stomates) tandis que la respiration racinaire augmentera. Par ailleurs, comme les icebergs, la partie aérienne d'une forêt ne représente

qu'une fraction du total du stock de carbone. Or si la température monte, l'activité microbienne du sol va probablement augmenter et accélérer la décomposition du carbone organique dans les sols. Que dire des risques d'incendies et de tempêtes dans le cadre de ce réchauffement climatique ?

Bref, l'équation suivante est à craindre : Une photosynthèse en chute + des flux sortants croissants (aussi bien Ra, Rh que Rp) = une forêt passant de l'état de puits à celui de source de carbone.

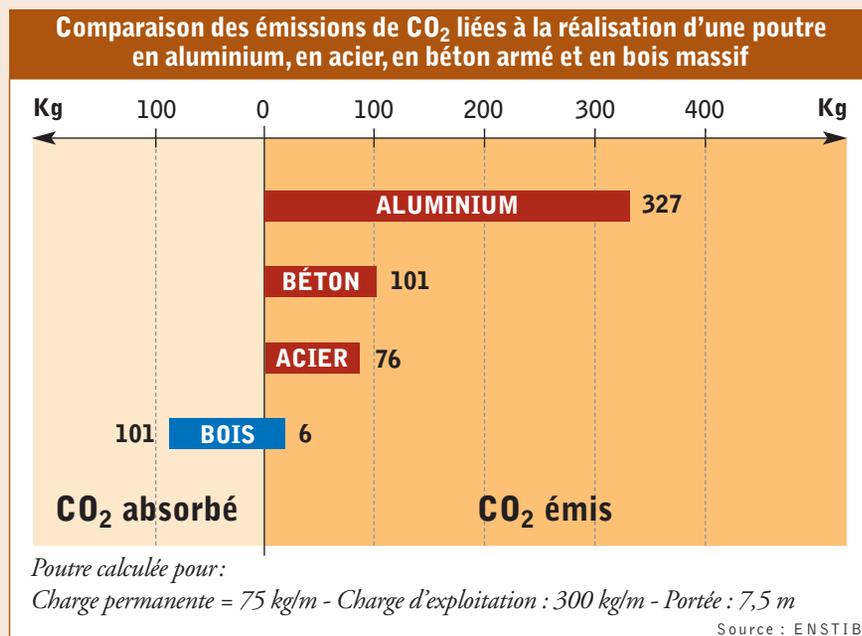
La canicule de 2003 a peut-être été un

avant-goût de ce scénario catastrophe. Ainsi, à l'échelle de l'Europe, la quantité de CO₂ libérée par les végétaux dans l'atmosphère en 2003 (500 millions de tonnes de CO₂) a dépassé celle qui avait été fixée durant les quatre années précédentes (Ciais *et al.*, 2005). Le seul ouragan Katrina d'août 2005 qui a touché cinq millions d'hectares de forêts à travers le Mississippi, la Louisiane et l'Alabama, aurait entraîné le rejet d'autant de carbone dans l'atmosphère qu'il en est stocké en moyenne par an par les forêts des Etats-Unis (Chambers *et al.*, 2007)

Et si planter des arbres revenait à transmettre aux générations futures nos excédents de carbone ? Car si la séquestration du CO₂ par la photosynthèse est le résultat d'un processus long et complexe, sa libération dans l'atmosphère peut être brutale et inéluctable (incendies, tempêtes, épidémies parasitaires, etc.). Cette caractéristique correspond au slogan « slow-in, fast-out » utilisé par les biologistes pour désigner la fragilité de la forêt en tant que stock à carbone.

Une forêt remède

Les forestiers n'ont pas l'ambition de résoudre tous les problèmes liés à l'intensification de l'effet de serre. Il n'est pas question de compenser la totalité de nos émissions de CO₂ par des reboisements, mais simplement d'y participer. Il n'est évidemment pas raisonnable d'augmenter le stock sur pied (même s'il augmente de fait, faute d'un prélèvement suffisant) pour se rapprocher des maximums atteints par les forêts vierges. Allonger la durée de révolution, c'est en effet accroître fortement les risques de chablis du fait des hauteurs atteintes par les arbres. Enfin, l'allongement de la durée de vie des produits bois a de



toute évidence une limite. La forêt et les produits forestiers, ensemble, ont tout de même un rôle à jouer. Quelles sont les voies à suivre ?

Première voie

Le piégeage du CO₂ par les écosystèmes forestiers et les matériaux en bois. L'effet attendu risque de n'être que temporaire tant les incertitudes sur le long terme sont grandes (pérennité des puits, vulnérabilité des stocks, croissance des arbres...). Il s'agit donc surtout d'un moyen de gagner du temps pour que les particuliers et les industriels puissent changer leur mode de fonctionnement et de production plus progressivement, et donc sans supporter des coûts trop élevés. Dans cette optique, il est impératif d'augmenter la résilience des forêts. Adaptation des essences aux stations, mélange d'essences, traitement irrégulier des forêts, introduction d'espèces xérophiles, protection des sols..., les techniques ne manquent pas, mais elles sont encore peu utilisées.

Deuxième voie

Contribuer aux économies d'énergie fossile. Le bois est produit dans la nature par l'énergie solaire et son

usage est peu coûteux en énergie supplémentaire. Il peut par conséquent être substitué aux matériaux énergivores tels que le béton, l'acier, l'aluminium... Et ceci d'autant plus que le bois présente souvent, à poids égal, des performances mécaniques supérieures aux autres matériaux. Pour fabriquer une poutre de 3 mètres de long capable de supporter 20 tonnes, il faut seulement 60 kg d'épicéa quand il faut 80 kg d'acier et 300 kg de béton⁽¹⁾. Comme le montre la figure ci-contre, pour la fabrication d'une poutre, l'utilisation du bois permet d'éviter l'émission d'une grande quantité de CO₂. L'avantage du bois est manifeste. Reste à agir sur la compétitivité économique du bois et dans ce sens, l'idée d'une taxe sur les matériaux selon leurs bilans énergétiques est à défendre.

Troisième voie

Contribuer au développement des énergies renouvelables. Le bois est une source d'énergie renouvelable car la forêt reconstitue la matière ligneuse brûlée tout en recyclant le CO₂ émis. De plus, le bois émet, à valeur énergétique égale, six fois moins de CO₂ que le pétrole. Cependant le bilan net sur

Rôles de la forêt et des produits forestiers dans la lutte contre le renforcement de l'effet de serre

	Contribution aux mesures de piégeage du CO ₂ atmosphérique	Contribution aux économies d'énergie fossile	Contribution au développement des énergies renouvelables
Mécanisme	→ Transformation du CO ₂ en sucres au niveau des feuilles	→ Utilisation de l'énergie solaire par les arbres pour produire le matériau bois (et usinage du bois peu coûteux en énergie)	→ Reconstitution par la forêt de la matière ligneuse brûlée (avec recyclage du CO ₂ émis)
Incertitudes	→ Estimation des quantités de carbone séquestrées → Conséquences du changement climatique sur le bilan photosynthèse-respiration	→ Marché mondial du bois et des matériaux coûteux en énergie fossile (acier, aluminium, béton...)	→ Part de l'autoconsommation du bois de chauffage (en forêt privée principalement)
Plan d'actions	→ Lutter contre la déforestation tropicale → Augmenter la résilience des forêts (mélange d'essences, traitement irrégulier...) → Prévenir les incendies de forêt → Augmenter la part du bois d'œuvre à longue durée de vie (charpente, ameublement...)	→ Développer l'utilisation du bois en substitution des matériaux énergivores → Créer une taxe carbone sur les matériaux voraces en énergies fossiles ⁽²⁾ et proposer des prix attractifs pour les matériaux en bois → Diminuer la part du bois importé (tropical en particulier) → Développer un marché de proximité pour limiter le coût en CO ₂ du transport	→ Développer l'emploi du bois comme source d'énergie ⁽³⁾ → Utiliser les pertes de matière lors de l'usinage du bois → Utiliser la biomasse ligneuse sans porter atteinte à l'identité vivante des sols → Développer un marché de proximité pour limiter le coût en CO ₂ du transport → Encourager les recherches sur les biocarburants dans le cadre d'une gestion durable des forêts

l'effet de serre doit être nuancé en raison du fort contenu énergétique du poste « transport » des systèmes traditionnels du bois-énergie. Le marché se développe et doit continuer à se structurer. En parallèle, les recherches sur les biocarburants destinés aux véhicules avancent et les besoins en cellulose vont mobiliser le secteur forestier.

Ces trois stratégies ne sont pas indépendantes les unes des autres. Substituer le bois aux matériaux énergivores afin de réaliser des économies d'énergie, c'est aussi augmenter le stock de matériau bois mis en œuvre

et donc la quantité de CO₂ atmosphérique séquestrée. À l'inverse, tout mécanisme incitant à produire une grande quantité de biomasse à des fins énergétiques, ne conduit pas nécessairement au meilleur stockage du carbone en forêt, car une telle gestion peut impliquer une libération massive du carbone du sol. Autre exemple : développer le matériau bois en substitution d'autres matériaux, c'est aussi accroître les pertes de matière lors des processus de transformation, lesquelles peuvent ensuite être valorisées à des fins énergétiques.

Pour conclure, face au défi de l'effet de serre, miser sur les produits bois et donc sur leur élaboration en forêt et leur exportation, apparaît finalement comme la meilleure voie à suivre. ■

(1) Source : Delaunay F, 2003 - *Le bois, un puits de carbone à effet de levier. Forêts de France n°464*, p. 17-20.

(2) Lire à ce sujet, l'article d'Yves Martin paru pages 56-57 du n°178 de *Forêt-entreprise*, janvier 2008.

(3) *Forêt-entreprise n°172 - Dossier Bois-énergie*, p. 9-51. Coordination Alice Gauthier, janvier 2007.



La bâche respirante...

Qui protège des intempéries !

Pour le séchage et le stockage des plaquettes de bois de chaufferie à l'extérieur

DANIEL BREHM Tél 03 88 70 70 14 www.dbrehm.fr
daniel.brehm@libertysurf.fr

Retour sur les calculs de rentabilité

Alain de Chatelperron, propriétaire forestier solognot

Alain de Chatelperron, sylviculteur en Sologne expose ici une méthode pour comparer deux sylvicultures différentes, d'un point de vue de leurs rentabilités.

L' époque n'est pas si lointaine où il était de mauvais goût, parmi les forestiers, de parler de rentabilité, de comparer dépenses et recettes... On préférerait considérer la question comme insoluble, inutile et dangereuse. Dangereuse car la fiscalité, perçue bien sûr comme excessive, risquait, pensait-on d'être encore alourdie s'il apparaissait que la forêt pût être jugée rentable.

Mais aujourd'hui, un lecteur assidu de nombreuses études sur productivité forestière, coûts, prix de vente, sylvicultures plus ou moins dynamiques, cherche à résumer tous ces chiffres pour évaluer, par exemple, la rentabilité d'une futaie de pins laricio. Il veut pouvoir prendre en compte plusieurs hypothèses y compris en cas de sinistres, peu probables mais vraisemblables, tels qu'ouragans ou attaques de parasites. Voyons les outils à la disposition de ce forestier que nous appellerons Sylvain.

La valeur actuelle - VA -

Imaginons que Crésus, banquier, lui propose d'avancer les frais d'établissement de la plantation et de se rembourser dans le temps en encaissant à sa place les revenus des coupes à venir. En contrepartie, Crésus lui versera, à l'année zéro, le bénéfice de l'opération compte tenu du taux de placement choisi : T. Ce bénéfice est appelé

« valeur actuelle de l'investissement » ou plus précisément « valeur actuelle au taux T ». (pour plus de précisions voir l'encadré A). Sylvain peut donc se représenter les conséquences sur la rentabilité :

- de l'ensemble de ses choix, déplacer des éclaircies, changer leur intensité... ;
- d'opérations partielles, par exemple élagage compensé (ou non ?) par une plus grande valeur du mètre cube à la récolte finale.

- dynamique sur 60 ans ;
- et lente sur 90 ans.

En effet, la comparaison des valeurs actuelles ne vaut pas car, dans le premier cas, il ne se passe plus rien au bout de 60 ans. Il faut alors utiliser un autre indicateur : la VASI (Valeur Actuelle à la Séquence Infinie), bâtie en supposant que la sylviculture se répète à l'identique jusqu'à la fin des temps (pour plus de précisions voir l'encadré B). Sylvain peut également comparer les sylvicultures d'essences différentes.

Sylviculture dynamique ou lente : la VASI

Sylvain veut maintenant comparer la rentabilité de deux sylvicultures :

La rentabilité interne

On peut toujours faire des calculs, à supposer qu'ils soient exacts, la difficulté commence lorsqu'on veut en

Valeur actuelle : VA (encadré A)

Si T est le taux de placement choisi, la valeur actuelle d'une somme S reçue ou réglée à l'année N est : $VA(N, S) = \frac{S}{(1+T)^N}$

La valeur actuelle d'une sylviculture représentée par une suite de recettes et de dépenses S_i affectées de leur année d'occurrence N_i par rapport à l'année zéro de la première dépense est : $VA = \text{Somme} \frac{S_i}{(1+T)^{N_i}}$

Une valeur actuelle plus strictement financière prend en compte, outre les opérations sylvicoles :

- Le prix d'achat du sol à l'année 0.
- Une dépense à l'année appelée « Capital d'administration » dont les intérêts annuels représentent les charges liées à la propriété du sol telles qu'impôts, garde-rie, entretien d'infrastructure.
- Les sommes ci-dessus en recettes à l'année de la récolte finale.

Valeur Actuelle à la Séquence infinie: VASI (encadré B)

Si VA est la valeur actuelle d'une révolution complète récoltée à l'année F, et qu'on répète la même sylviculture par la suite sans interruption, on obtient la VASI qui pourra se comparer à celle d'une sylviculture plus ou moins dynamique ou à toute autre utilisation du sol.

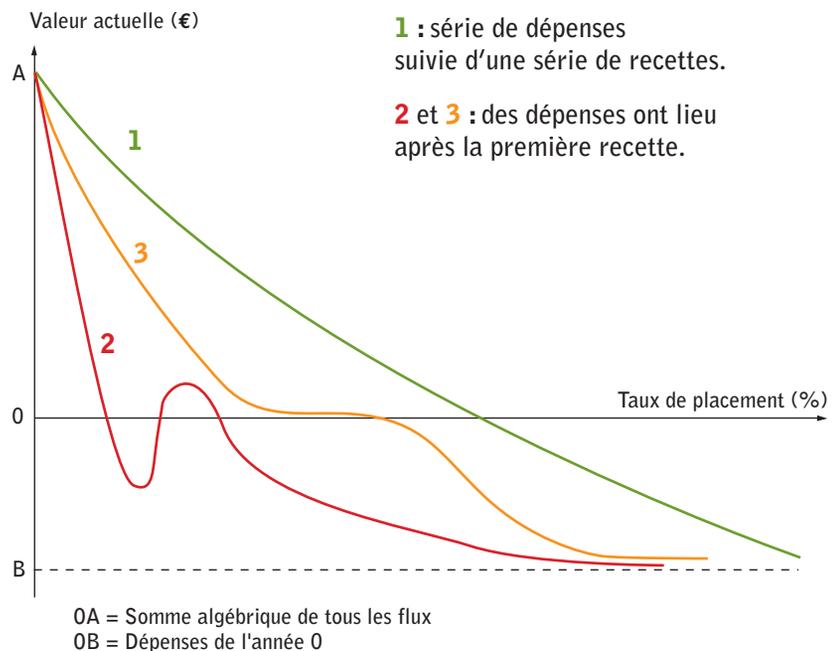
$$\text{VASI} = \frac{\text{VA}}{1 - \frac{1}{(1+T)^F}}$$

interpréter les résultats ! Ici se pose la question du taux de placement à utiliser, d'où l'idée de chercher s'il existe un et un seul taux de placement compatible avec l'ensemble des recettes et des dépenses considérées et qui donne une valeur actuelle nulle : le TIR (Taux Interne de Rentabilité). Il faut aussi pouvoir le calculer.

Or, ce taux unique existe toujours dans le cas ordinaire d'une série de dépenses suivie d'une série de recettes. De plus, bien des programmes le calculeront pour Sylvain. Il pourra alors réviser une sylviculture particulière pour augmenter son TIR. Plus délicate est la comparaison de sylvicultures très différentes, en effet un investissement initial plus important peut être préféré à un autre plus modeste au TIR plus élevé. Comme quoi, on gagne davantage à placer 10 000 à 2 % qu'à placer 1 000 à 6 % !

En outre, des sylvicultures incluant des dépenses en cours de vie peuvent donner des TIRs multiples, qui n'ont guère de sens ou une plage de TIR imprécise. De plus les programmes de calcul ignorent parfois ce phénomène (*pour plus de précisions voir l'encadré C*). Ces considérations peuvent paraître excessivement prudentes, mais on voit aussi certains utiliser le TIR de façon excessive.

Valeur actuelle en fonction du taux de placement



Taux Interne de Rentabilité: TIR (encadré C)

La courbe obtenue en faisant varier T (taux choisi) de zéro à une valeur infinie :

- démarre sur l'axe des ordonnées par un point situé à la somme algébrique de toutes les sommes reçues ou dépensées ;
- décroît au début ;
- se termine asymptotiquement à la dépense de l'année 0.

Lorsque la sylviculture se résume à une série de dépenses suivie d'une série de recettes, on obtient la courbe de type 1 qui, sans ambiguïté coupe l'axe des X en un point.

Discussion

Mais si des dépenses ont lieu après la première recette, ce qui peut correspondre à la réalité, la courbe peut onduler et devenir de type 2 ou 3.

Le type 2 coupe l'axe des x en plusieurs points, on ne peut plus parler du taux de rentabilité mais de plusieurs taux et comment interpréter ce résultat ?

Le type 3 frôle l'axe des x sur une plage. Étant donné que recettes et dépenses ne sont que des estimations, quel taux choisir ?

Dans les deux cas, il faut obtenir du programme de calcul qu'il trace la courbe complète afin de pouvoir l'interpréter.

Or, parmi les nombreux programmes censés calculer le **TIR unique**, il n'est pas sûr qu'il en existe qui alertent l'utilisateur sur ces bizarreries. Par exemple, ils pourraient vérifier que les dérivées première et seconde n'ont pas de racine réelle positive. Peut-être qu'un jour un mathématicien analysera les conditions nécessaires pour que le TIR soit unique...

Conclusion

Le TIR peut rendre de grands services, mais dans les cas simples.

Avenir aléatoire (encadré D)

La VASI permet de prendre en compte de multiples hypothèses.

Ainsi, supposons qu'on ait établi les sylvicultures possibles ci-dessous et qu'on ait calculé chaque Valeur Actuelle.

→ VAh, pour la sylviculture heureuse, se terminant à 70 ans. Elle est probable à 89 %.

→ VAt pour le cas de tempête suivie de mesures de rattrapage. Récolte finale à 60 ans. Il est probable à 3 %.

→ VAs pour le cas d'attaque de scolytes à 35 ans. Il est probable à 8 %.

Si dans chaque cas, après la récolte finale, on reprend le même parti, à cette date on se retrouve dans la même situation aléatoire qu'à l'année 0, qui a l'inconnue VASI pour valeur. On peut donc écrire :

$$\text{VASI} = 89\% \text{ de VAh} + \text{VASI}/(1+T)^{70} \\ + 3\% \text{ de VAt} + \text{VASI}/(1+T)^{60} \\ + 8\% \text{ de VAs} + \text{VASI}/(1+T)^{35}$$

Ce qui permet de calculer la VASI au prix de regroupement des facteurs.

Les scénarios catastrophe

Sylvain est encore insatisfait car il veut tenir compte de sinistres éventuels.

Il a chiffré des hypothèses complètes telles que :

→ tempête à 45 ans avec chablis du tiers du peuplement et vente à vil prix, puis adaptation de la suite de la sylviculture. Probabilité : 0,03 ;

→ attaque de scolytes à 35 ans, qui le conduit à tout vendre dans l'état. Probabilité : 0,08.

Qu'il se rassure, la VASI citée plus haut de l'ensemble des trois hypothèses : « heureuse », tempête et scolyte se calcule aisément au prix d'une algèbre simple. Sylvain pourra ainsi explorer un avenir aléatoire (*pour plus de précisions, voir l'encadré D*).

Conclusion

La rentabilité d'un investissement forestier se calcule à partir des estimations de dépenses et de recettes tout

au long de sa vie. Comme les calculs sont précis alors que les données sont incertaines s'agissant de l'avenir, il est nécessaire de tâtonner en réitérant (refaisant) le calcul après avoir modifié certaines données : dates d'éclaircie, élagage ou non, prix de vente. De plus, on peut évaluer l'impact sur le résultat de sinistres tels que tempête ou attaque de parasites. L'appui d'un ordinateur est conseillé sauf pour les outils les plus simples. ■

Résumé

Appliqués aux investissements forestiers, à l'étude d'un projet de plantation de futaie, par exemple, les calculs classiques de rentabilité financière présentent des lacunes. Les méthodes nouvelles et anciennes s'adaptent à des situations variées. De récents perfectionnements permettent d'évaluer l'impact sur la rentabilité, des sinistres dont on a chiffré les conséquences et estimé la probabilité de se produire.

Mots-clés : Rentabilité forestière, aléatoire, TIR, valeur actuelle.



LA REVUE GÉNÉRALISTE ET INDÉPENDANTE DE QUALITÉ SUR LA FORÊT
TRAITANT DE SUJETS POUR LES PROPRIÉTAIRES ET LES PROFESSIONNELS DE LA FORÊT



FILIÈRE BOIS ET UTILISATIONS DU BOIS **MATÉRIEL FORESTIER**
DROIT ET FISCALITÉ POLITIQUE FORESTIÈRE DE LA FORÊT ET RÉGLEMENTATIONS
COURS DES BOIS SUR PIED
SYLVICULTURE ET GESTION FORESTIÈRE



OFFRE DÉCOUVERTE
-20%
SOIT 40 €
au lieu de 49€
Remise valable au premier abonnement d'un an

S'adresser à :
«La Forêt Privée» 61 av. de la Grande Armée, 75782 Paris cedex 16.
Tél. : 01 45 00 46 61 - Fax : 01 40 67 16 62 - njc@lafortetprivée.com laforetprivée.com

SPECIMEN GRATUIT À LA DEMANDE

Les besoins en eau des peupleraies

Éric Paillassa, ingénieur à l'IDF

Les besoins en eau des peupleraies varieraient selon l'âge, la densité, les cultivars et la localisation des peupleraies. Déterminer ces besoins en eau permettrait de préciser les conditions limites pour la production de peuplier, sur stations hors nappe.

Le peuplier est une essence exigeante vis-à-vis de son alimentation en eau. Cette exigence implique que ses besoins en eau soient assurés régulièrement, d'où naturellement sa place en bordure ou à proximité des cours d'eau. Loin des cours d'eau, il est nécessaire de connaître plus précisément ces besoins en eau. De même, le changement climatique annoncé est un autre argument en faveur de l'évaluation du bilan hydrique d'une peupleraie, afin d'éviter ou de prévenir des dépérissements futurs.



Jeune peupleraie sur station humide.

© E. Paillassa

Des résultats scientifiques

Dans le numéro 160 de Forêt-entreprise, Étienne Muller et Luc Lambs du laboratoire dynamique de la biodiversité (CNRS de Toulouse) ont présenté une étude sur les flux de sève et la consommation en eau des peupliers, réalisée au cours de l'année 2002, sur deux parcelles de I 214 et I 45/51 de 7 et 13 ans dans un site de la plaine de la Garonne. Ils ont montré que la consommation d'eau était très variable d'un jour à l'autre au cours de la saison de végétation. Elle pouvait varier du simple au décuple : de 17 à 170 litres par jour pour un I 214 et de 26 à 210 litres par jour pour un I 45/51. Ils ont montré aussi que la consommation en eau moyenne d'un arbre, à l'échelle d'une

saison de végétation, dépendait essentiellement de son diamètre. Ainsi, ils ont retenu, comme ordre de grandeur, que **la consommation moyenne d'un peuplier durant la saison active de végétation est de l'ordre de 3 litres par jour et par cm de diamètre de tronc (à 1,30 m) en vallée de Garonne.** Ce résultat est conforme à ceux obtenus par d'autres équipes de chercheurs (Hinckley *et al.*, 1994 ; Edwards, 1986). Ces derniers avaient obtenus des consommations entre 2,4 et 3,4 litres par jour et par cm de diamètre.

À partir de cet ordre de grandeur – qu'il conviendra bien évidemment de valider pour d'autres cultivars, sur d'autres stations et dans d'autres régions –, il est concevable d'extrapoler cette valeur afin d'obtenir des pre-

mières évaluations globales des besoins en eau des peupleraies, nécessaires pour mieux appréhender les conditions limites de la production de peuplier s'agissant de l'alimentation en eau.

Trois facteurs de variations

Pour transformer le résultat scientifique des besoins en eau d'un arbre, au besoin en eau globale d'une peupleraie sur une année, trois facteurs de variation semblent intervenir : la durée de végétation, la densité de plantation, et la dimension des arbres (et donc l'âge).

La durée de végétation est un élément intéressant car il permet de distinguer les peupleraies septentrionales et les

Figure 1 : Besoin en eau annuel (en m³/ha) et peupleraies nordiques

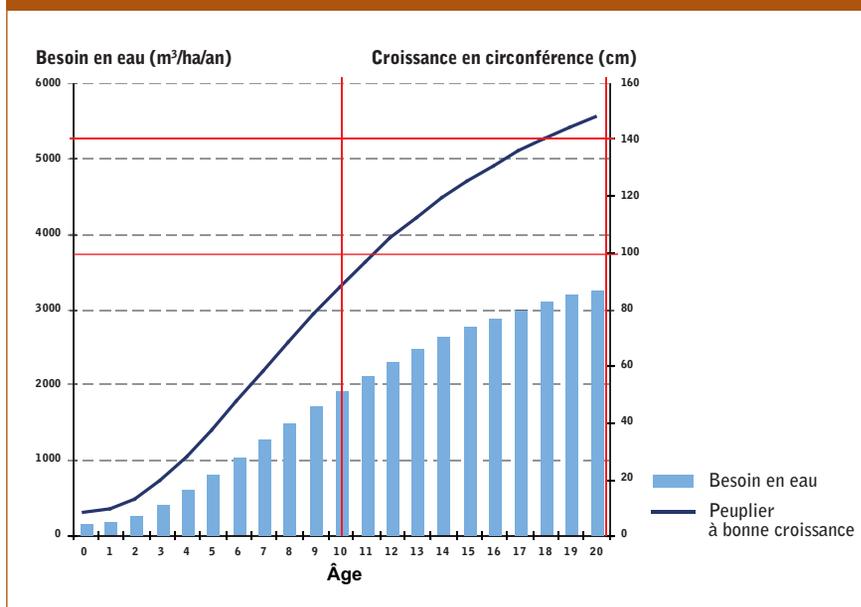
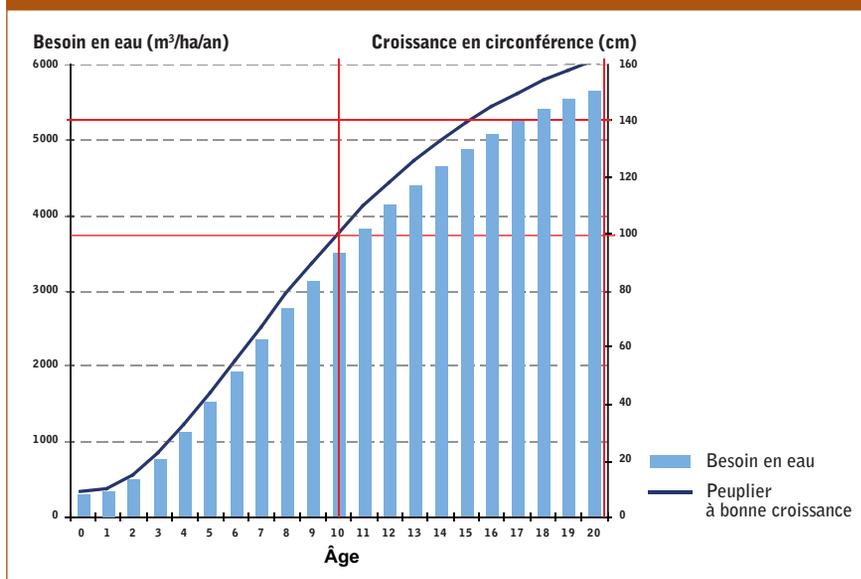


Figure 2 : Besoin en eau annuel (en m³/ha) et peupleraies méridionales



peupleraies méridionales. Ainsi, pour l'évaluation, il est retenu une durée de végétation de 180 jours pour le sud (d'avril à septembre) et de 150 jours (de mai à septembre) pour le nord.

La densité de plantation intervient quand il faut passer de l'arbre à l'hectare : il est retenu 204 tiges/ha pour la zone méridionale et 155 tiges/ha pour la zone septentrionale.

Ces deux premiers facteurs incitent donc à proposer deux évaluations des besoins en eau des peupleraies : une pour le

nord et une pour le sud de la France.

Enfin le troisième facteur est **la dimension des arbres**, et plus particulièrement son diamètre. Pour prendre en compte ce facteur, il est retenu deux courbes de croissance type pour des peupleraies de bonne croissance :

→ la courbe de croissance septentrionale type, qui atteint 85-90 cm de circonférence à 10 ans, et 140 cm à 18 ans ;

→ la courbe de croissance méridionale type qui atteint 100 cm de circonférence à 10 ans, et 140 cm à 16 ans.

En appliquant le résultat de 3 litres par centimètre de diamètre, les courbes permettent de suivre l'évolution des besoins en eau d'une peupleraie au cours de la vie du peuplement.

Du nord au sud, des besoins différents

Les besoins en eau des peupleraies septentrionales adultes, matures à 18 ans seraient de l'ordre de 3 100 m³/ha/an, contre 2 000 m³/ha/an à mi-révolution (voir figure 1). Cette évaluation montre bien qu'au cours de la vie du peuplement les besoins ne sont pas du tout du même ordre de grandeur.

Pour les peupleraies méridionales, les besoins en eau sont supérieurs, avec 5 000 m³/ha/an pour la peupleraie mature à 16 ans et 3 400 m³/ha/an pour la peupleraie de 10 ans (voir figure 2).

Les différences notables entre les peupleraies septentrionales et méridionales sont le fait des densités de plantation différentes (+ 25 % de plants dans le sud), d'une période de végétation plus longue dans le Sud (+ 20 %), mais aussi d'un rythme de croissance plus rapide en zone méridionale.

Densité : facteur important

Les graphiques précédents montrent que la densité de plantation intervient comme un facteur multiplicatif des besoins en eau. Cette remarque prend toute son importance sur les stations où l'alimentation en eau des peupleraies peut poser un problème, en particulier dans les situations hors nappe phréatique. En effet, si au stade jeune peuplement les besoins en eau sont peu importants et permettent d'obte-

nir des peupleraies bien poussantes, le passage au peuplement adulte accroît de façon importante ces besoins et peut aboutir à une insuffisance des disponibilités en eau. Nous obtenons alors des réductions de croissance fortes, et des fins de rotation difficiles. Ce cas est visible, par exemple, sur les stations profondes limono-sableuse de vallée de Garonne. De même, en période de sécheresse (comme en 2005), les peuplements à plus forte densité seront davantage pénalisés si la densité de plantation est trop importante par rapport aux ressources en eau, surtout en l'absence de nappe.

Besoins variables dans le temps

La relation logique entre besoin en eau et dimension de l'arbre, définit dans le temps des consommations en eau des peupliers très variables. Après la plantation, les besoins seraient de l'ordre de 200 à 300 m³/ha/an pour atteindre les 3 100 à 5 000 m³/ha/an chez les peuplements matures (NDLR: ces besoins en eau représentent, s'il ne pleut pas, une réserve utile d'eau de 31 à 50 cm dans la couche du sol prospectable par les racines durant la saison de végétation). Il est important de souligner que les besoins en eau des peupliers ne sont pas constants dans le temps. Ainsi, si

les fortes consommations ne durent généralement pas très longtemps, elles correspondent en revanche aux périodes à risques maximum sur les stations à stress hydrique possible, en cas de sécheresse climatique. Il est donc impératif de s'assurer des capacités d'alimentation en eau de la peupleraie avant plantation.

Besoins similaires à la prairie

Pour les peupleraies dont les besoins en eau sont les plus importants (peupleraies matures), les besoins journaliers moyens sont de l'ordre de 28 m³/ha/jour, pendant la période de végétation et pour une densité de 204 tiges/ha. Cet ordre de grandeur est similaire à ceux des formations végétales humides basses (32 m³/ha/jour) ou des prairies humides (36 m³/ha/jour). Ce constat n'est pas étonnant car ces ordres de grandeurs doivent correspondre aux capacités hydriques de ces milieux assez humides (hygroclines).

Conclusion

Les besoins en eau des peupleraies sont variables avec l'âge de la peupleraie, la densité de plantation et la

durée de la période de végétation. Ainsi, du nord au sud de la France, les besoins en eau des peupleraies ne sont pas les mêmes. Il existe probablement aussi un quatrième facteur de variation : le cultivar. Bien que pour l'instant la réflexion menée soit basée sur des résultats obtenus avec I 214 et I 45/51, il faut admettre que les différents cultivars utilisés actuellement en France n'ont probablement pas la même efficacité vis-à-vis de l'eau et donc pas tout à fait les mêmes besoins.

À partir de ces besoins identifiés, il est possible de mieux préciser les stations à peuplier capable de subvenir à ces besoins, et en particulier dans le cas des stations sans nappe phréatique accessible. ■

Résumé

Les besoins en eau des peupleraies augmentent avec l'âge de la peupleraie, la densité de plantation, le cultivar et la durée de végétation. La consommation moyenne d'un peuplier durant la saison active de végétation est de l'ordre de 3 litres par jour et par centimètre de diamètre. Ce qui donne pour une peupleraie mature (204 tiges par hectare) en période de végétation, des besoins journaliers moyens comparables à ceux d'une prairie, soit environ 28 m³ par hectare et par jour.

Mots-clés : peuplier, besoins en eau, cultivars.

Bibliographie

- **Hinckley (T.M.), Brooks (J.R.), Cermak (J.), Ceulemans (R.), Kucera (J.), Meinzer (F.C.) and Roberts (D.A.).** *Water flux in a hybrid poplar stand.* Tree Physiology 14, 1994, pages 1005-1018.
- **Edwards (W. R. N.).** *Precision weighing lysimetry for trees, using a simplified tared-balance design.* Tree Physiology 1, 1986, pages 127-144.

CARTOGRAPHIE FORESTIERE



CAGEF

Relevés GPS,
Typologie des peuplements,
Réalisation de toutes les cartes nécessaires
à vos besoins (peuplement, équipement,
travaux sylvicoles...).

Pour nous contacter :

Tél : 02 41 18 09 13
Fax : 02 41 18 20 31
e-mail : cagef@ifrance.com
Site : www.cagefcartographie.com

La typologie des stations en Champagne-Ardenne : un outil de plus en plus utilisé

Céline Perrier, CRPF Champagne-Ardenne

Les actions en faveur de l'utilisation de la typologie des stations en Champagne-Ardenne ont eu un impact favorable sur les pratiques de ses utilisateurs. Une enquête a été conduite pour identifier leurs attentes et définir de nouveaux objectifs.

Depuis plusieurs années, la région Champagne-Ardenne se mobilise pour faire progresser à l'échelle régionale, le niveau d'utilisation de la typologie des stations. Les résultats d'une enquête conduite en 2002 et ciblée sur ce thème ont encouragé cette mobilisation. Ayant permis d'établir un premier état des lieux des besoins des utilisateurs, un programme d'actions adapté a pu être mis en œuvre.

Ce dynamisme a valu à la Champagne-Ardenne comme à Rhône-Alpes, d'être désignée en 2003 région pilote pour le programme national de relance de la typologie des stations (Derf, 2002), apportant ainsi un nouvel élan aux actions déjà entreprises.

Les résultats de l'enquête 2002 complétés par un constat à l'échelle nationale de l'utilisation de la typologie des stations (Boisseau, 1999) ont contribué à établir une réponse ciblée à la

demande des utilisateurs. De nouveaux outils d'aide à la reconnaissance des stations ont ainsi été conçus, en concertation systématique avec les utilisateurs potentiels (comités de pilotage, de relecture...). Chaque publication a été accompagnée d'un programme de formation destiné à favoriser la prise en main et l'utilisation du document. Cependant, pour encourager l'utilisation des guides, un accompagnement supplémentaire s'est avéré nécessaire.

Source: CRPF de Champagne-Ardenne.

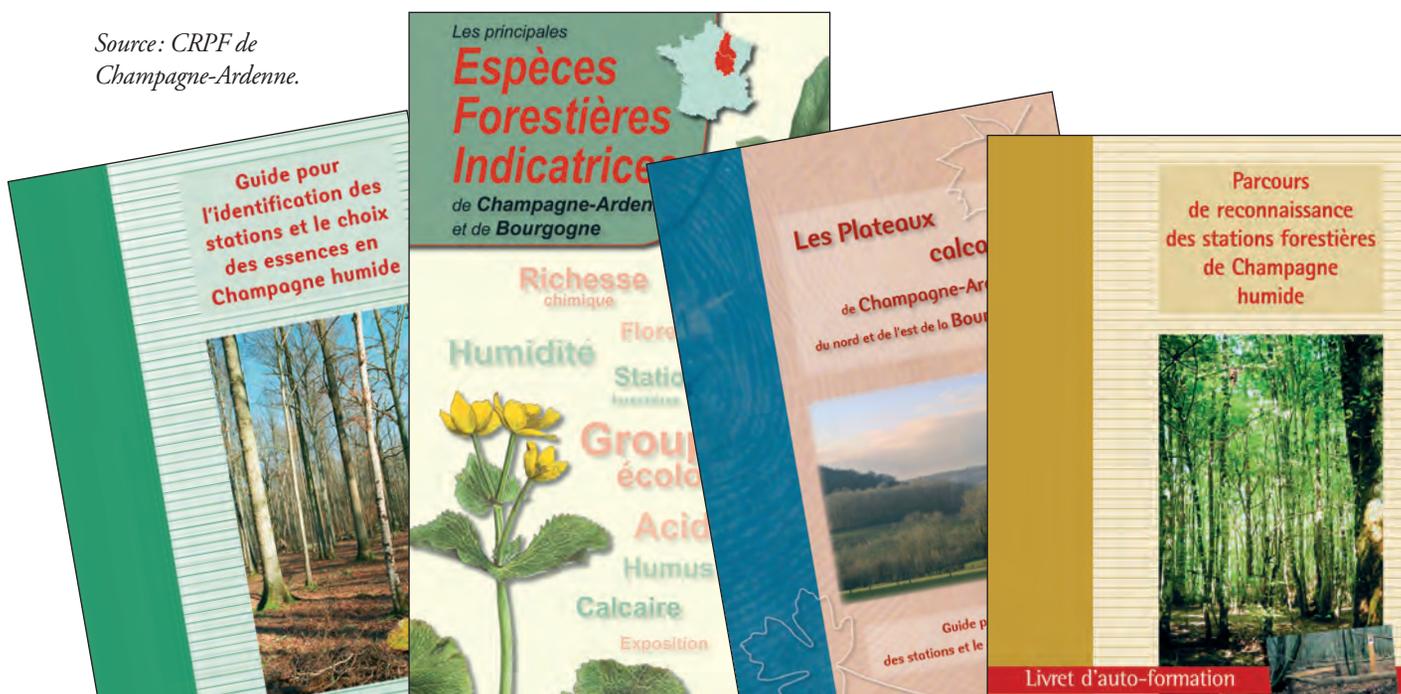
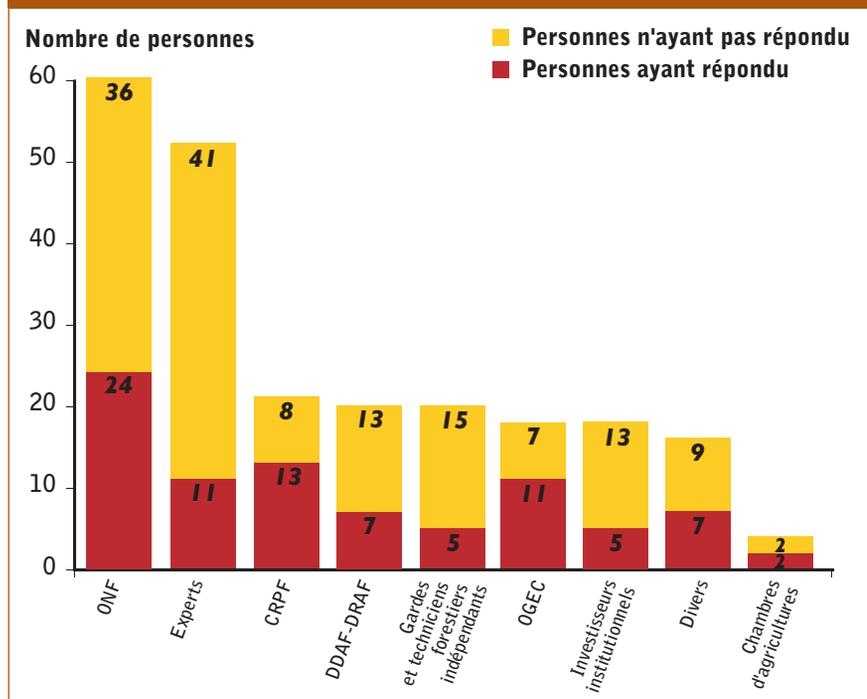


Figure 1 : Quelques-uns des outils de vulgarisation et de formation à la typologie des stations publiés par la région Champagne-Ardenne

Figure 2 : Comparaison du niveau de participation de chaque organisme



La catégorie « divers » regroupe l'IFN, le Cemagref, l'interprofession et les établissements d'enseignement.

Ainsi des initiatives de développement ont aussi été mises en place, parallèlement aux publications des nouveaux outils de détermination : analyse de différentes méthodes de cartographie des stations (Bazin et Gaudin, 2004), projets personnalisés de cartographie des stations, mise en place d'un parcours pédagogique d'initiation à la typologie des stations (Gaudin, 2005), publication d'un guide de reconnaissance des principales espèces forestières de Champagne-Ardenne et de Bourgogne (Coulmier, 2004), recommandations pour la prise en compte des effets du changement climatique dans le choix des essences (*lire l'article de S. Gaudin - Forêt-entreprise N°180*)...

Après trois années de mise en application, un retour sur les multiples actions entreprises est apparu nécessaire. Ainsi une seconde enquête a été initiée à l'automne 2005, afin de pouvoir évaluer l'impact des actions de relance de la typologie des stations et de recadrer si besoin les objectifs, et de programmer de nouvelles actions.

Mise en place et organisation de l'enquête

Deux stratégies d'enquête ont été mises en œuvre, afin de pouvoir toucher un large public : une diffusion à large échelle et une plus ciblée. La première enquête, sous forme d'un questionnaire écrit, a été adressée à l'ensemble des utilisateurs potentiels de la typologie des stations de la région et des départements limitrophes, qu'ils soient fréquents ou occasionnels. Pour 227 questionnaires ainsi envoyés, le taux de réponse a été de 37 %. Cette participation très satisfaisante, démontre un intérêt marqué des professionnels de la forêt pour la typologie des stations ; les utilisateurs ayant été sensibilisés depuis plusieurs années sur le sujet. Cette participation est deux fois plus importante que celle enregistrée pour l'enquête de 2002 qui n'avait concerné que 60 propriétaires et

gestionnaires, tous déjà sensibilisés. Les organismes ayant été sollicités sont nombreux (ONF, Experts, CRPF, Ogec, Chambres d'Agriculture...). Leur participation à l'enquête est assez inégale en raison de cette diversité. En revanche, chaque organisme ou catégorie d'organisme pris individuellement, présente un assez bon taux de participation.

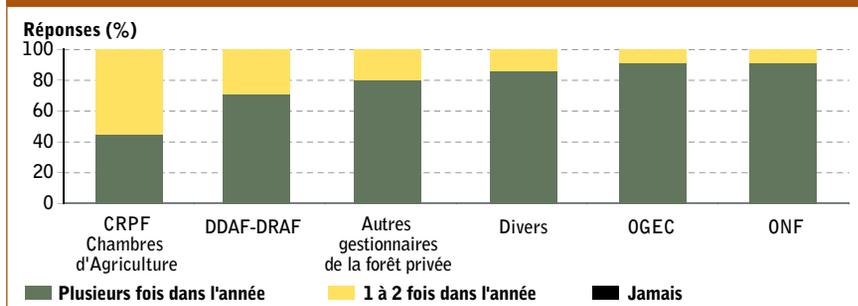
La deuxième enquête n'a concerné quant à elle, que 12 professionnels parmi les 227 sollicités et dont l'utilisation effective de la typologie des stations n'était a priori pas connue (absence de réponse au questionnaire et distance par rapport au programme de formations). Ces derniers ont été contactés par téléphone pour un court entretien, favorisant le recueil de réponses ouvertes.

Cette enquête a donc été conduite en deux temps pour pouvoir prendre en considération l'avis de l'ensemble des professionnels concernés par la typologie des stations. L'interprétation des résultats obtenus donne un aperçu des différentes formes d'utilisation de la typologie des stations, de la perception des actions de la région pilote par les utilisateurs et de l'évolution de leurs pratiques et de leurs attentes.

Quelle utilisation est faite de la typologie des stations ?

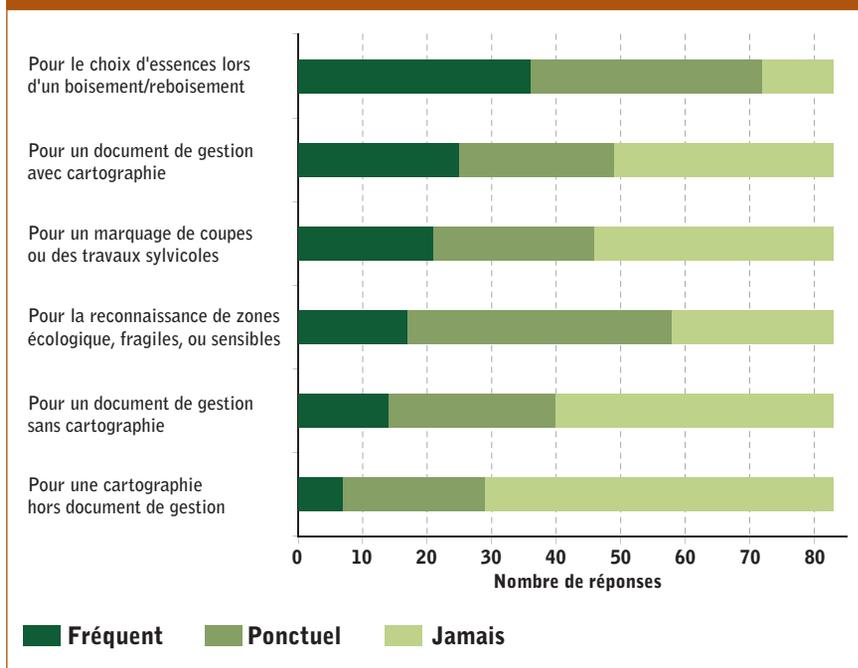
Les opinions recueillies par l'enquête révèlent des profils d'utilisateurs très divers. Cette diversité est liée à l'hétérogénéité des personnes interrogées. Il est par conséquent difficilement envisageable de créer des catégories distinctes d'utilisateurs. La fréquence d'utilisation de la typologie des stations est globalement forte en Champagne-Ardenne. En effet, 76 % des personnes ayant répondu à l'enquête déclarent en faire usage

Figure 3 : Fréquence d'utilisation de la typologie des stations en fonction des organismes



La catégorie « autres gestionnaires de la forêt privée » regroupe les sous catégories « experts », « gardes et techniciens forestiers indépendants » et « investisseurs institutionnels ».

Figure 4 : Fréquence d'utilisation des différentes applications possibles de la typologie des stations



plusieurs fois dans l'année. La majorité d'entre eux en fait une utilisation définie comme fréquente, les autres s'y réfèrent plus ponctuellement. Cette fréquence d'utilisation est très variable entre catégories d'organismes, et parfois même au sein de ces catégories. Celle incluant les experts et techniciens forestiers est par exemple parmi les plus hétérogènes. Malgré cela, les gestionnaires des forêts publiques et privées restent ceux qui ont l'utilisation la plus fréquente de la typologie des stations. La typologie des stations présente

plusieurs domaines d'application. On constate que les habitudes d'utilisation sont étroitement liées à l'activité professionnelle des personnes interrogées. Ainsi, des différences très nettes entre catégories d'organismes sont observées. Notons que les personnels de l'ONF utilisent assez fréquemment l'ensemble des applications possibles de la typologie des stations, du fait de la diversité de leurs missions. Plusieurs exemples d'applications de la typologie des stations ont été proposés dans l'enquête. Ils sont présentés sur la figure 4.

Ces exemples ont tous été cités par les utilisateurs, quand il leur a été demandé de décrire leurs habitudes d'utilisation. Certaines applications jugées pourtant très spécifiques, tel que l'utilisation de la typologie des stations pour reconnaître des zones écologiques fragiles ou sensibles, semblent être entrées dans les usages. En revanche, il n'a pas été surprenant de constater que de toutes les applications possibles, c'est l'utilisation de la typologie des stations pour faire un choix des essences à planter lors d'un projet de boisement ou de reboisement, qui est la plus utilisée.

Les résultats de l'enquête ont permis d'établir qu'il était difficile de distinguer des profils d'utilisateurs. Il en va de même pour recenser les utilisateurs les plus occasionnels. En revanche, quelques-unes de leurs caractéristiques ont pu être mises en évidence. Ces derniers sont souvent des professionnels travaillant sur plusieurs régions administratives. Ils ont une bonne connaissance des programmes de formation qui leur sont proposés, mais n'y participent pas. On peut ainsi en conclure que leur faible utilisation n'est pas liée à un manque d'information. La moitié d'entre eux pratiquerait peu, par manque de temps, mais sont intéressés par la typologie des stations et veulent rester informés. Pour les autres l'intérêt de pratiquer la typologie des stations est remis en question. L'investissement que demande une étude des stations leur paraît démesuré compte tenu de la rareté des demandes émanant des propriétaires.

Comment les actions de la région pilote sont-elles perçues ?

Entre les années 2001 et 2005, la région Champagne-Ardenne a publié

Figure 5 : Degré de satisfaction des utilisateurs pour les différents volets du programme

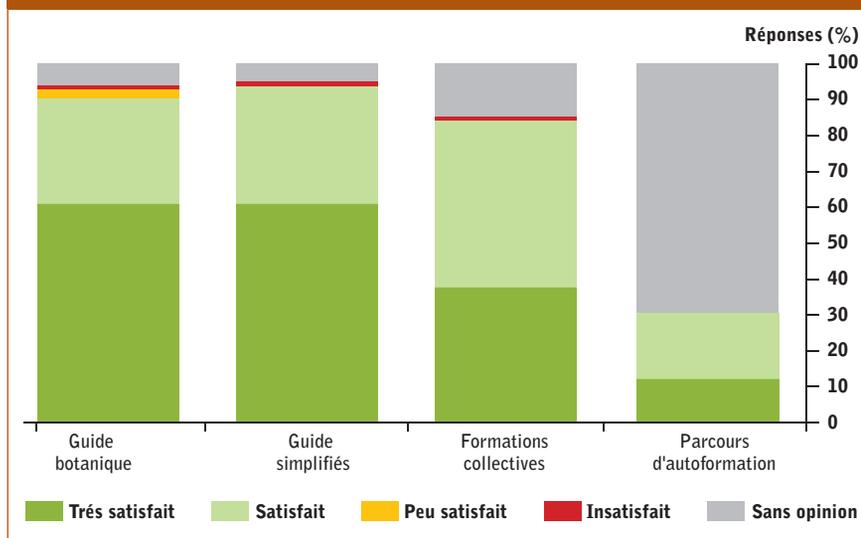
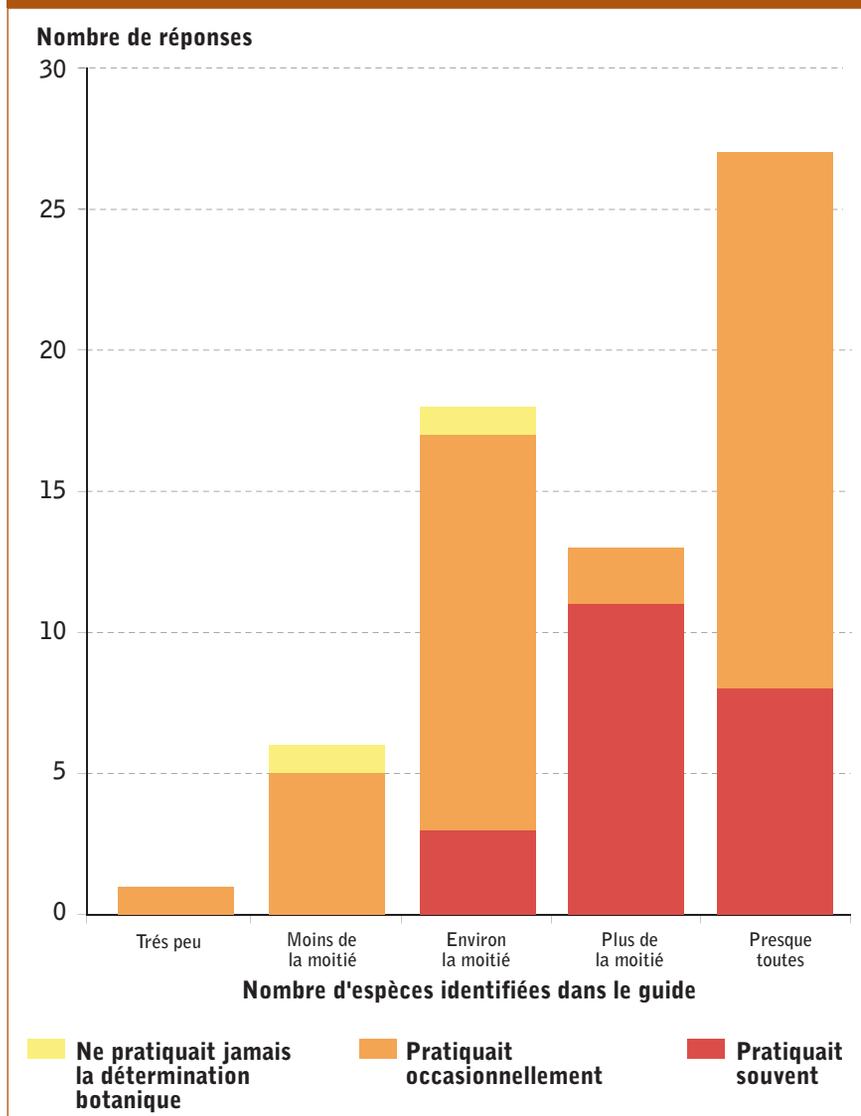


Figure 6 : Comparaison entre la capacité actuelle d'identification des espèces du guide et les pratiques avant la prise en main du guide



trois nouveaux guides de détermination des stations, organisé une vingtaine de formations et mis à disposition des utilisateurs divers outils de vulgarisation et de formation. La plupart de ces initiatives a été mise en œuvre en concertation avec les utilisateurs eux-mêmes pour tenter de répondre au mieux à leurs attentes. Il semble que cette démarche ait porté ses fruits puisque la majorité des personnes ayant répondu à l'enquête s'estime satisfaite des actions entreprises. En ce qui concerne les formations, le niveau de satisfaction des utilisateurs est plus variable. Ils ont en revanche, pour 73 % d'entre eux, le sentiment d'avoir progressé grâce à elles.

Les outils mis à disposition des utilisateurs semblent très appréciés. Les nouveaux guides simplifiés sont considérés comme pratiques, fiables et faciles à utiliser. Ils sont d'ailleurs beaucoup plus employés que les anciens guides et préférés aux catalogues existants. Leur utilisation est en général supérieure à deux fois dans l'année et se fait en toutes saisons, malgré les difficultés que cela peut représenter pour la reconnaissance de la flore.

Le guide d'aide à la reconnaissance des espèces forestières indicatrices, complément des guides simplifiés, est aussi unanimement apprécié par les utilisateurs et consulté régulièrement. Ces derniers soulignent son aspect pratique et sa clarté, mais regrettent qu'il ne soit pas exhaustif. Il joue en fait un rôle de tremplin vers des flores plus complètes. Un grand nombre des utilisateurs interrogés considère avoir progressé grâce à cet outil, ce qui est encourageant.

Ainsi, les résultats de l'enquête permettent d'établir un bilan très complet de la perception par les utilisateurs, des actions conduites sur la région. Ils révèlent un sentiment général de satisfaction, partagé par presque tous les utilisateurs, même les plus occasionnels. Pourtant

des améliorations sont encore possibles pour parvenir à satisfaire à leurs besoins. C'est pourquoi de nouvelles actions prenant en considération ces remarques sont déjà en cours de réalisation. Pour celles déjà mises en place, l'enquête a mis en évidence qu'elles pouvaient être davantage valorisées (formation, communication, conseil...).

Les pratiques des utilisateurs ont-elles évolués ?

Après quelques années, il est apparu nécessaire d'évaluer l'efficacité des actions entreprises pour relancer la typologie des stations. Pour cela, l'évolution des pratiques des utilisateurs a été étudiée. Beaucoup d'entre eux estiment que le programme mis en œuvre les a aidés à progresser. Ils considèrent pour la plupart, avoir acquis plus d'aisance et être davantage indépendants pour déterminer les stations sur le terrain. Mais ces progrès sont aussi directement perceptibles au travers des changements d'habitudes : 46 % des personnes interrogées ont, par exemple, déclaré utiliser depuis 2003, de nouvelles applications de la typologie des stations. D'autres ont précisé qu'ils ne pratiquaient pas la détermination des stations, avant la mise en place des actions visant à relancer l'utilisation de la typologie des

stations. Ainsi, ces évolutions constatées grâce à l'enquête, paraissent être une conséquence positive directe des actions mises en œuvre ces dernières années.

Quelles sont les nouvelles perspectives ?

Plusieurs pistes d'amélioration ont été définies grâce aux observations des utilisateurs, apportées au fil de l'enquête. Certaines ont déjà pu être intégrées dès la fin de l'enquête. La session de formation 2006 a par exemple été modifiée, de manière à prendre en compte le fait que les utilisateurs avaient manifesté dans l'enquête une nette préférence en faveur de l'organisation de formations sur des thèmes nouveaux. Ainsi, deux thèmes de formation leur ont été proposés : *la prise en compte des stations dans la gestion courante et la pratique de la botanique aux limites de la saison de végétation*. Chacune de ces formations a obtenu un très bon taux de participation, justifiant leur organisation.

Ainsi, les utilisateurs ne semblent pas être lassés par les actions qui leur sont proposées. Ils paraissent au contraire attirés par les nouveaux projets. Les utilisateurs les plus occasionnels eux-mêmes tiennent au moins pour la plupart, à rester informés des évolutions et des nouveautés. Les besoins

ayant été clairement identifiés, il reste donc encore de nombreuses possibilités pour apporter aux utilisateurs les moyens de progresser encore dans l'utilisation de la typologie des stations. ■

Remerciements

À toutes les personnes qui ont participé à l'enquête, rendant possible cette analyse de l'utilisation de la typologie des stations en Champagne-Ardenne.

Bibliographie

- **Boisseau (B.), 1999** - *Bilan de la typologie des stations forestières*. Rapport de la convention DERF n°01.30.03/98. Cemagref, document dactylographié. Synthèse, 35 p. ; Analyse par région, 82 p. ; Bilan sur le certificat de spécialisation en typologie des stations forestières, 23 p. + annexes ; Recueil de données sur les catalogues de stations forestières et les guides associés, 172 p. ; Dépouillement des enquêtes, quelques données nationales, 22 p.
- **Bazin (N.) et Gaudin (S.), 2004** - *La cartographie des stations, méthodes et conseils*. Fiches techniques du CRPF de Champagne-Ardenne, 11 fiches.
- **Circulaire DERF/SFB/C 2002-3020 du 18 octobre 2002**. (Direction de l'Espace Rural et de la Forêt)
- **Coulmier (X.), 2004** - *Les principales espèces forestières indicatrices de Champagne-Ardenne et de Bourgogne*. CFPPA de Croigny, 168 pages.
- **Gaudin (S.), 2005** - *Le parcours d'initiation à la typologie des stations : bilan après deux saisons d'utilisation*. CRPF de Champagne-Ardenne, 18 pages + annexes.

Résumé

Après trois années d'actions en faveur de l'utilisation de la typologie des stations en Champagne-Ardenne, un bilan est apparu nécessaire. Une enquête a donc été conduite en 2005, auprès des utilisateurs. Elle a obtenu un bon taux de participation. Les utilisateurs sont satisfaits des actions réalisées et soulignent leur efficacité. Elles semblent avoir contribué à faire évoluer leurs pratiques. Ces derniers sont encore intéressés par les actions qui leur sont proposées mais leurs besoins et leurs compétences ont évolué. Le programme d'action doit donc changer en conséquence.

Mots-clés : Enquête, typologie des stations, utilisateurs.

Les enclos témoins : un projet commun entre chasseurs et forestiers

Patrick Blanchard, ingénieur au CRPF des Pays de la Loire

Avec la généralisation du plan de chasse aux grands gibiers en 1979 les populations de cervidés, et notamment de chevreuils, n'ont cessé d'augmenter en de nombreux lieux – ce qui était un des objectifs de ce dispositif – pour atteindre localement des niveaux difficilement supportables par les sylviculteurs. Mais au-delà de ce qui oppose parfois violemment forestiers et chasseurs, se cachent des disparités d'appréciations et d'intérêts qu'il convient d'aborder objectivement pour mieux comprendre la situation.

Avec une diminution substantielle constante des revenus générés par la vente des produits forestiers, les locations de chasse devraient assurer une compensation indispensable à l'équilibre financier des opérations de gestion forestière. Le forestier se trouve ainsi tiraillé entre sa vocation première de producteur de bois, et notamment de bois d'œuvre, et l'augmentation des populations de grands gibiers, qui, lorsqu'elles sont nombreuses, lui permettent de louer correctement la chasse sur sa forêt. Mais là où le bât blesse, c'est lorsque pour maintenir l'état boisé sur sa propriété, le forestier se trouve contraint de protéger à grands frais – et encore faut-il que cela soit possible – ses jeunes plantations ou régénérations naturelles. Les produits de la location de la chasse peuvent alors être très rapidement engloutis dans des dépenses excessives de protection ; le forestier est alors en droit de se poser la question de l'opportunité d'une population de cervidés aussi abondante.



Installation d'un enclos témoin.

© P. Blanchard

Les bio-indicateurs

Le problème de fond se situe donc là : comment atteindre des populations importantes et des prélèvements élevés tout en étant compatibles avec les impératifs économiques de production forestière ? D'où la notion d'équilibre sylvocynégétique, dont la définition reste sujette à caution, et donne lieu à de nombreux débats. D'un point de vue général, il s'agit

d'adapter les populations de grands animaux aux capacités d'accueil des milieux concernés. Pour les forestiers, il s'agit de niveaux de population compatibles avec des possibilités de renouvellement (plantation et notamment régénération naturelle) ne nécessitant pas de protection particulière. Cette définition n'est pas partagée par tous et continue à nourrir de vives discussions.

Si l'équilibre sylvocynégétique n'est pas facile à définir, il est encore moins facile à atteindre, quelle qu'en soit la

définition. Ceci est d'autant plus vrai que cet équilibre théorique n'est pas stable dans le temps ; il varie avec l'évolution de la forêt et du biotope. Pour appréhender la situation, cela suppose de disposer d'un certain nombre d'outils nécessaires à l'évaluation quantitative et qualitative des populations : ce sont les bio-indicateurs. Si les professionnels disposent d'éléments intéressants, ils restent bien insuffisants au regard des besoins d'une saine gestion.

Les bio-indicateurs sont les seuls outils capables de caractériser une population en relation avec son habitat ; ils réagissent à toute modification d'effectif ou de capacité d'accueil. Ce sont notamment pour le chevreuil :

- l'indice kilométrique d'abondance (IK) ;
- l'indice de fécondité ;
- le poids des individus, par classe de sexe et d'âge ;
- l'indice floristique (ou de pression floristique).

D'autres bio-indicateurs comme la mesure de la mâchoire inférieure des cervidés, ou la mesure d'os longs peuvent participer à la connaissance de l'état d'équilibre (ou de déséquilibre) entre une population et le milieu sur lequel elle vit.

Afin de mieux appréhender les moyens nécessaires à la mise en œuvre de ces outils, le Centre régional de la propriété forestière des Pays de la Loire, en collaboration avec les Fédérations départementales des chasseurs intéressées par le projet, a souhaité initier la mise en place de sites pilotes afin de juger de la pertinence de ces bio-indicateurs et des méthodes de suivi à engager. Le principe consiste à répartir les tâches entre les acteurs de terrain que sont les chasseurs et les forestiers.

→ **Circuits IK** : ils sont matérialisés par les techniciens de Fédérations des chasseurs, de même que la

programmation des parcours et le traitement des données. Un responsable (chasseur, propriétaire forestier, garde forestier...) est nommé pour chaque IK et assure chaque année les parcours programmés.

→ **Données biométriques** : Dans chaque groupe de chasseur, un responsable est nommé et chargé de faire la récolte des données biométriques sur les animaux prélevés (poids, éventuellement comptage des corps jaunes, etc.). La formation de ces responsables est assurée par les techniciens de Fédérations des chasseurs (procédures, utilisation du même matériel et degré de précision des mesures...) de même que le traitement des données.

→ **Indice de pression floristique** : la méthode bien que très intéressante est trop lourde à mettre en œuvre, demandant une technicité et des moyens humains insuffisamment disponibles.

Les enclos témoins

Il ne faut pas perdre de vue que **l'objectif final est bien de disposer d'outils pertinents faciles à mettre en œuvre et ainsi reproductibles quel que soit l'environnement**. Pour caractériser l'impact des animaux sur la végétation, le choix s'est donc reporté sur la mise en place d'enclos témoins « étanches » à toute intrusion. Il s'agit de petits parcs grillagés d'une surface unitaire d'environ 40 m², installés judicieusement. Il suffit alors d'observer ce qui se passe à l'intérieur de l'enclos et comparer avec ce qui se passe à l'extérieur. La prise de vues (photos, film, etc.) au moment de l'installation permet de fixer l'état initial, et de ce fait est vivement recommandée.

Le choix du lieu d'installation est aussi primordial ; il est inutile d'installer un

tel parc dans des boisements âgés et fermés sous lesquels rien ne pousse. Au contraire, il faudra préférer les zones de jeunes régénérations naturelles ou artificielles, les coupes récentes de taillis et tout peuplement accessible à la dent du gibier. Le CRPF des Pays de la Loire accompagne les propriétaires forestiers concernés dans les choix d'implantation.

La répétition de ce type de dispositif est plus importante que la surface individuelle. Mieux vaut installer 10 enclos de 40 m² bien disposés sur un territoire forestier qu'un seul enclos de 400 m² ; les résultats seront plus significatifs.

Les observations recueillies avec ce maillage d'enclos, qui devra être renouvelé régulièrement, n'ont pas le caractère scientifique irréfutable de la méthode de l'indice floristique. Cependant, elles concourent à la prise en compte de la végétation forestière dans la gestion future des populations de cervidés. Sur le département de la Vendée, une aide à l'acquisition de grillage pour un certain nombre d'enclos a été octroyée par l'association des chasseurs de grand gibier. Dans les départements de la Sarthe et du Maine-et-Loire, ce sont les Cetef qui ont accepté de participer financièrement.

Des résultats parfois spectaculaires

En parallèle des sites pilotes qui se mettent en place progressivement sur certains départements, le CRPF des Pays de la Loire a installé depuis quatre ans maintenant plusieurs enclos témoins servant d'appui aux réunions de vulgarisation traitant de l'équilibre sylvo-cynégétique à l'adresse des propriétaires forestiers. Les résultats sont inégaux, mais parfois spectaculaires, mettant en évidence l'impact

des grands animaux sur la végétation forestière et associée. Il espère ainsi que le relais sera pris par les propriétaires forestiers, ce qui localement semble déjà être le cas.

Si les premiers enclos ont été installés en utilisant du matériel robuste et des techniques offrant une grande résistance en fonction des animaux présents sur les massifs (cerf ou chevreuil) l'heure est aujourd'hui à la recherche de l'enclos minimum nécessaire pour répondre aux besoins (hauteur et résistance du grillage, technique permettant une grande rapidité d'exécution, etc.). **L'objectif est la recherche de l'enclos le plus simple, le plus facile à mettre en œuvre et donc le moins onéreux possible.**

Chasseurs et forestiers : des intérêts convergents

Au-delà des avantages que peut apporter le suivi de ces sites pilotes, tout l'intérêt réside dans la mise en place de projets communs avec les Fédérations départementales des chasseurs : c'est en apprenant à travailler ensemble que nous apprendrons à mieux nous connaître et nous respecter. Chasseurs et forestiers ont des intérêts convergents et pourtant ils passent le plus clair de leur temps à s'opposer. Lorsqu'un chasseur parcourt une forêt, il ne regarde ni ne voit les mêmes choses que le forestier ; comment peuvent-ils se comprendre ?

C'est en travaillant ensemble que les choses évolueront dans le « bon sens » (dans tous les sens du terme). ■

Résumé

Le CRPF de Pays de la Loire, en collaboration avec les Fédérations départementales des chasseurs s'étant portées volontaires, a mis en place un dispositif de suivi de la pression du gibier sur la forêt, à la fois démonstratif et peu coûteux à mettre en œuvre. Ces enclos complètent les informations issues des bio-indicateurs, scientifiques mais plus lourds à suivre.

Mots-clés : équilibre sylvo-cynégétique, bio-indicateurs, enclos démonstratifs.

PROMOTION

FORÊT-ENTREPRISE 179 + LE CHÂTAIGNIER : UN ARBRE, UN BOIS

→ 47 € franco de port

Numéro spécial châtaignier n°179

Ce numéro spécial de Forêt-entreprise est entièrement consacré à la sylviculture du châtaignier et présente les dernières connaissances relatives à cette essence (gestion, autécologie, calculs de rentabilité...).

64 pages, format 20,5 x 28,7 cm.

9,50 € (+ 3 € de frais de port)

Le châtaignier, un arbre, un bois

2^e édition revue par C. Bourgeois, E. Sevrin et J. Lemaire

Plus connu pour son fruit, le châtaignier, troisième essence feuillue française, peut produire du bois de qualité rapidement (entre 30 et 45 ans).

Sur les meilleures stations la futaie a toute sa place et se vend au même prix que les chênes... mais en trois fois moins de temps ! Ce livre permet, à l'aube du XXI^e siècle, de faire un point complet et accessible à tous sur cette belle essence qu'est le châtaignier.

352 pages, format 16 x 24 cm.

39 € (+ 7 € de frais de port)

À commander auprès de la librairie IDF, 23 avenue Bosquet, 75007 Paris.
Chèque à l'ordre de « Agent comptable SUF IDF ».



La qualité du bois entre dans le programme de sélection du pin maritime

Annie Raffin * et Guillaume Chantre **⁽¹⁾

L'amélioration génétique des arbres est une œuvre de patience et de précision, car le gain sur un des caractères génétiques peut entraîner une perte sur un autre. La qualité est l'un des caractères sur lequel il n'est pas possible de transiger.

Depuis la sélection des « arbres plus » dans les années 1960, le programme d'amélioration du pin maritime a permis des gains génétiques toujours plus importants (*dossier du Forêt-entreprise n°148*). Aujourd'hui en Aquitaine, 70 % des surfaces reboisées en pin maritime le sont par plantation à partir des plants de vergers de deuxième génération. Pour la troisième génération en cours d'installation, les gains génétiques attendus devraient atteindre 35 à 40 % sur les critères volume et rectitude du tronc. Ces deux caractères restent les principaux objectifs de sélection dans le programme d'amélioration mené par le Groupement d'intérêt scientifique « pin maritime du futur » (GIS PMF). Néanmoins, les gains en volume se traduisent par un raccourcis-

sement des durées de révolution. Lorsque les parcelles issues de graines de vergers seront récoltées, la durée de révolution sera probablement de 35-40 ans, contre 50-60 ans actuellement. Pour maintenir la qualité malgré l'augmentation prévisible de la proportion de bois juvénile, le GIS a mené des études pour pouvoir insérer la qualité parmi les critères de sélection. La qualité du bois est un caractère complexe, avec de multiples composantes, souvent difficiles à mesurer dans un programme de sélection. Il faut pouvoir évaluer de très nombreux arbres à moindre coût et de façon non destructive (les arbres les plus performants doivent ensuite être utilisés comme généteurs). Ceci explique le faible effort consacré jusqu'alors à l'amélioration génétique de la qualité du bois

chez les arbres forestiers. Mais les études en cours et la mise au point de nouveaux outils de mesure laissent espérer un progrès important sur les principaux caractères de la qualité du bois.

Hormis la rectitude du tronc, déjà prise en compte depuis le début du programme de sélection du pin maritime (effet favorable sur les rendements au sciage mais aussi sur la proportion de bois de compression, et donc sur l'homogénéité du bois), ainsi que la branchaison qui fait l'objet d'études particulières (effet sur le nombre, la répartition et la surface des nœuds dans le bois), les caractères qui semblent les plus importants sont pour la qualité mécanique du bois d'œuvre :

- la densité ;
 - la rigidité ;
 - l'angle du fil ;
- et pour la qualité papetière :
- la composition chimique (taux de lignine et de cellulose).



Résistographe pour l'estimation de la densité du bois.

La densité du bois

La plupart des propriétés mécaniques du bois sont assez bien estimées par la densité du bois. On recherche une forte densité pour garantir un bois de bonne qualité. La densité peut être estimée précisément sur des carottes de

petite taille dont le prélèvement ne nuit pas à l'arbre. Ces carottes sont radiographiées aux rayons X : on obtient alors un profil microdensitométrique représentant la variation de la densité au sein de l'arbre mesuré. Cette méthode (**la microdensitométrie**) est longue et coûteuse, mais précise ; elle permet de décrire le plus finement les variations de densité du bois sur un rayon (du cœur vers l'écorce) desquelles on déduit de nombreux paramètres qui décrivent la structure fine des cernes, ainsi que des informations sur l'adaptation de l'arbre aux conditions stationnelles et climatiques.

D'autres outils plus rapides et donc plus adaptés aux mesures de routine d'un programme de sélection ont été testés. Ainsi, le GIS pin maritime du futur a mené une étude à l'aide d'un **résistographe**. Il s'agit d'un appareil de sondage constitué d'une perceuse, d'un long foret et d'un enregistreur mesurant la résistance à l'avancement du foret lors de la pénétration dans le bois. Cette mesure, bien que globale sur le rayon de l'arbre et moins précise que la microdensitométrie, est rapide, peu coûteuse et n'endommage pas l'arbre. Les premiers résultats montrent que le résistographe permet de repérer avec une fiabilité suffisante les familles de bonne densité dans les tests de descendance.

La rigidité

La rigidité du bois est une donnée mécanique fondamentale pour le dimensionnement et la résistance des ouvrages. Fortement corrélée à la densité du bois (à une forte densité correspond une bonne rigidité), elle permet d'apprécier la résistance à la déformation par flexion des poutres utilisées en structure. Conventionnellement, la rigidité du bois ou module d'élasticité



Rigidimètre pour l'estimation de la résistance en flexion de l'arbre: appareil mis au point à l'INRA Orléans.

longitudinale (MOE), est exprimée en mégapascals ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ newton/mm}^2 \approx 100 \text{ g/mm}^2$). Elle se mesure par l'application d'une force de flexion sur l'échantillon de bois.

Actuellement, aucun outil non destructif pour l'arbre n'a donné sur le pin maritime de résultat suffisamment fiable pour une utilisation en sélection. D'autres méthodes restent à tester (méthodes vibratoires sur arbre sur pied, ou sur un échantillon de bois suffisamment petit pour être prélevé sans dommage pour l'arbre). En l'état des connaissances, la meilleure estimation sur pied de la rigidité moyenne des planches est donnée par la densité moyenne du bois, via la microdensitométrie.

L'angle du fil du bois

L'angle du fil est l'estimation de l'orientation longitudinale du fil du bois par rapport à l'axe de croissance



Exemple d'angle du fil très marqué sur pin maritime juvénile.

primaire de l'arbre. Il est essentiel de le connaître dans la mesure où il détermine en bonne partie la tendance au gauchissement (voilement) des planches au séchage. L'angle du fil sous écorce peut être mesuré aisément mais ponctuellement seulement, par l'appareil Spirolyte dont vient de se doter le GIS. Des études sont en cours pour déterminer si les mesures effectuées à une hauteur et à un âge donnés peuvent refléter le comportement global d'un arbre pour ce caractère.

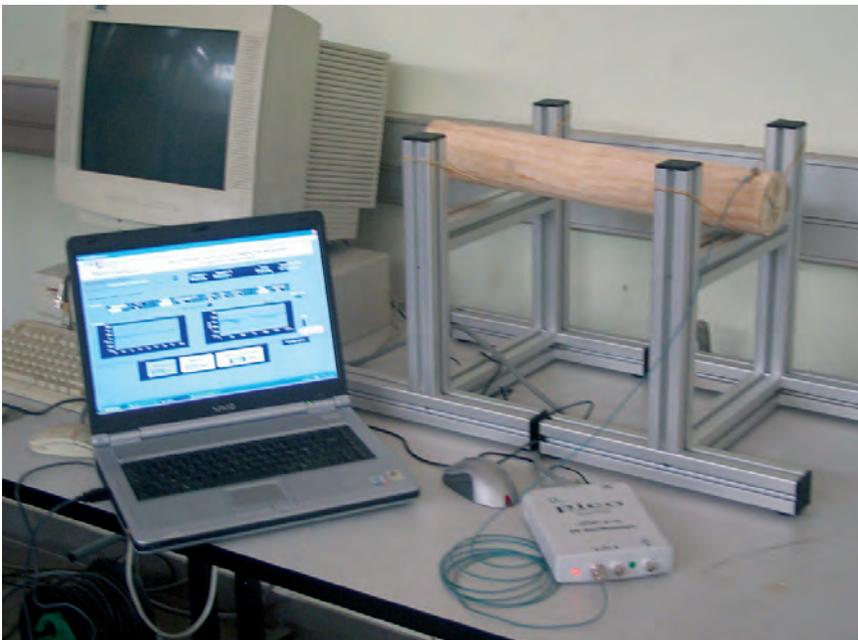
La composition chimique

Le bois est composé de trois polymères majeurs : la lignine, la cellulose et les hémicelluloses. La teneur en lignine est indépendante de la rigidité du bois, contrairement à une idée répandue. Le pin maritime comporte également une forte proportion de composés extractibles, non ligneux, comme les



Spirolyte pour la mesure de l'angle du fil entre 2 aiguilles plantées dans le fil du bois.

© INRA



Vibrapab pour une mesure indirecte de la rigidité du bois par méthode vibratoire sur un échantillon de bois.

© US2B

tanins ou les acides résiniques. La lignine et les composés extractibles sont éliminés au cours de la cuisson papetière. La pâte à papier étant constituée avant tout de cellulose, les variations de ces composés déterminent le comportement du bois à la

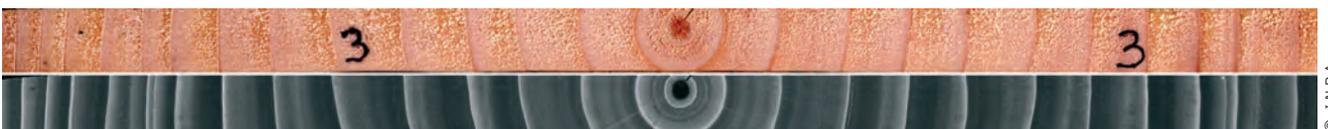
cuisson, ainsi que le rendement industriel. La composition chimique du bois peut être estimée directement par des dosages gravimétriques classiques en laboratoire sur des échantillons de bois. Mais il s'agit là encore d'une détermination longue et coûteuse.

Une méthode basée sur l'analyse spectroscopique proche infrarouge (SPIR) a fait son apparition dans le contrôle de la qualité de certains produits tels que les aliments et plus récemment, le bois. La technique SPIR peut être utilisée pour déterminer la composition chimique (polymères naturels, extraits, etc.) ou l'humidité dans un échantillon de pâte, un composite à base de bois, ou du bois brut. Cette technique permet de doser très rapidement ces éléments avec une précision suffisante pour des examens de routine. Elle repose sur l'absorption de radiations proche infrarouge par les composés chimiques et demande, dans le cas des composés du bois, une calibration par espèce et par constituant à doser. La méthode SPIR a été utilisée avec succès sur le pin maritime, dans le cadre de récents projets européens associant l'AFOCEL et l'INRA : estimations réussies de la composition en lignine du pin maritime, puis des autres composants chimiques (hémicellulose, taux d'extraits, alphacellulose) à partir du prélèvement d'un petit échantillon de bois, non dommageable pour l'arbre.

Des premiers résultats encourageants

Ces projets européens ainsi que des projets régionaux, ont contribué significativement à l'avancement des connaissances sur la qualité du bois, notamment chez le pin maritime. Trois grands chantiers ont été lancés à cette occasion :

→ la mise au point d'outils modernes d'estimation, tels qu'ils ont été



Carotte de bois et sa radiographie aux rayons X, pour l'estimation de la densité par microdensitométrie.

© INRA



La recherche d'arbres plus résistants à la sécheresse

Pour faire face au réchauffement climatique prévu, le GIS « pin maritime du futur » mène actuellement, en parallèle de ces recherches d'amélioration de la qualité du bois, des activités de création variétale sur les critères de résistances à la sécheresse. Il étudie également le comportement d'hybrides entre différents écotypes de pin maritime caractérisés par leur plus ou moins grande sensibilité à une sécheresse édaphique (relative au sol).

évoqués précédemment pour le SPIR ou le résistographe ;

→ la mesure des paramètres génétiques dans des tests de l'AFOCEL et de l'INRA ;

→ la recherche de marqueurs moléculaires et même de gènes jouant un rôle clé dans l'expression de la qualité du bois.

Ainsi, au regard des premières analyses, les critères de qualité du bois apparaissent suffisamment héréditaires et variables pour donner prise à la sélection. De plus, la qualité du bois d'œuvre (densité et rigidité), la qualité du bois de trituration (lignine, fibres) et la vigueur ne semblent pas, ou très peu, liés génétiquement. Ce qui laisse envisager une sélection sur ces nouveaux critères sans pénaliser les performances de croissance et de rectitude.

Enfin, l'analyse détaillée du génome, entreprise à partir des mêmes arbres, met à jour le rôle majeur de certains gènes dans l'expression de la qualité du bois, et ouvre la perspective à assez brève échéance d'une sélection plus précoce et plus efficace sur ces caractères à partir de marqueurs moléculaires.

Des perspectives concrètes en sélection

Les études menées par le GIS pin maritime du futur concernant la qualité du bois visent à mettre en œuvre les outils les plus fiables et utilisables en sélection pour l'évaluation des critères d'intérêt. Des résultats prometteurs ont été obtenus sur certains paramètres de la qualité. Au regard des premiers résultats, le GIS peut se fixer comme ambition de concilier vigueur et qualité du bois dans les nouvelles générations de vergers.

Petit lexique

Bois juvénile/bois adulte : le bois juvénile est formé pendant les 10 à 20 premières années de croissance de l'arbre. Il présente des caractéristiques différentes du bois mature, notamment dans la morphologie des cellules, entraînant par exemple une rigidité plus faible.

Bois de compression : chez les conifères, le bois de compression est formé à la surface inférieure des tiges inclinées. Il présente une couleur brun-rouge, une plus forte teneur en lignine, une densité plus élevée, mais une rigidité plus faible, et un défaut important de retrait longitudinal au séchage.

Paramètres génétiques : variables estimées statistiquement à partir de mesures sur des dispositifs (arbres plantés en test) et permettant de décrire le contrôle génétique et la variabilité d'un caractère ainsi que ses corrélations avec d'autres caractères.

Marqueurs moléculaires : séquences d'ADN pouvant varier selon les individus. Ces variations de séquences peuvent permettre de caractériser un individu (« empreinte génétique ») ou

une population, ou encore être reliées aux variations d'un caractère (ex : un critère de la qualité du bois).

Héritabilité : Paramètre génétique qui estime la part de la variabilité causée par les effets génétiques dans la variabilité totale observée pour un caractère. Mesure le degré de transmission de ce caractère d'un parent à ses descendants. ■

(1) *INRA, Ingénieur de Recherches

**FCBA/AFOCEL Sud Ouest, Directeur

(2) Xyloméca : <http://perso.wanadoo.fr/xylomecal>

Résumé

Les gains génétiques importants sur le volume, attendus pour les variétés issues de vergers à graines de pin maritime, se traduiront progressivement par un raccourcissement des rotations, soit par une augmentation prévisible de la proportion de bois juvénile. La prise en compte de la qualité du bois devient donc un enjeu dans le programme de sélection du pin maritime. Le GIS « pin maritime du futur » teste des méthodes d'évaluation de ces caractères. Certains résultats sont déjà prometteurs.

Mots clés : pin maritime, qualité du bois, amélioration génétique.

Sigles

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

GIS : Groupement d'intérêt scientifique

CHH : Carter holt harvey.

Esem (aujourd'hui Polytech'Orléans) : École supérieure de l'énergie et des matériaux, Orléans.

US2B : Unité Sciences du Bois et des Biopolymères.

Sécher le bois de chauffage ; une réponse rapide à la demande de bois en bûches

Gilles Négrié, FCBA



© FCBA

Le bois de chauffage est victime de son succès... Aux prix actuels du pétrole et du gaz, il constitue en effet une alternative énergétique séduisante, à condition que les producteurs puissent fournir leurs clients en bûches sèches, ce qui n'est plus le cas dès que la demande est forte. La solution passe entre autres par le séchage artificiel qui permet aux producteurs d'être réactifs face aux fluctuations de la demande en produits secs.

La flambée du prix du pétrole depuis 2005, conjuguée aux incitations fiscales à l'acquisition de matériel de chauffage fonctionnant à la biomasse, a généré une demande accrue en bois de chauffage. Cette forte demande s'est traduite par une augmentation du prix de ce combustible et un épuisement rapide des stocks de bois sec. Le séchage du bois de chauffage est pourtant indispensable, car la bonne combustion requiert du bois à une humidité sur brut inférieure à 20 %. Faute de quoi, une partie de la chaleur produite est absorbée par la vaporisation de l'eau contenue dans le matériau et ne contribue donc pas au chauffage des locaux. De plus, une humidité élevée favorise l'encrassement du matériel de combustion. Sur le plan pratique, la maîtrise du taux d'humidité du bois de chauffage permet donc d'améliorer le pouvoir calorifique des bûches, et de réduire leur poids et le volume de bois à approvisionner pour couvrir sa consommation thermique « utile ».

Accélérer la mise en marché

Les producteurs de bois de chauffage font habituellement sécher les bûches lors du stockage en forêt ou sur leur site de production. Cette technique de séchage à l'air présente l'avantage d'être

économe en énergie payante et en investissements matériel. Par contre, elle est lente, donne des résultats aléatoires selon les saisons et nécessite une immobilisation conséquente de bois. De plus, elle ne permet pas d'être réactif face aux fluctuations de la demande en produits secs. Par ailleurs, le séchage à l'air génère des coûts pour financer le stock et les pertes éventuelles,

Figure 1 : Durée du séchage selon le procédé adopté

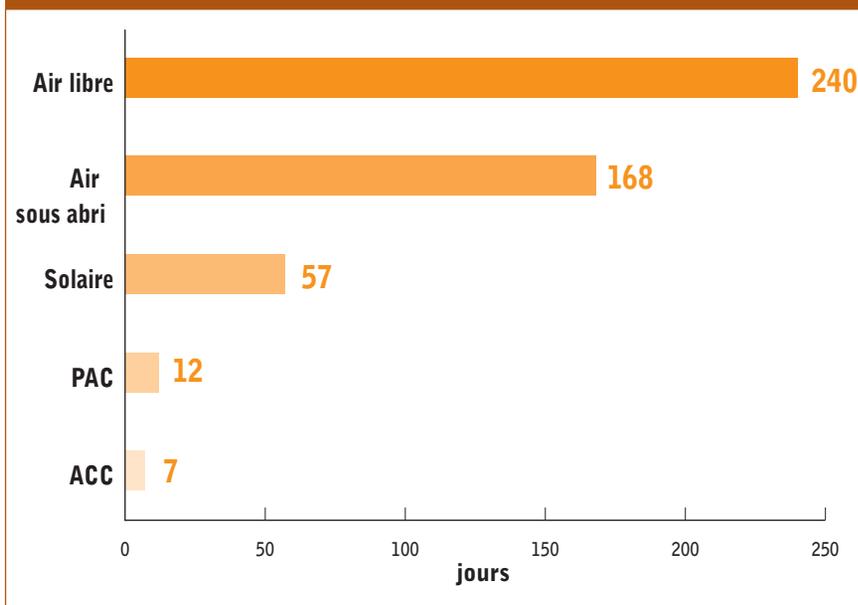
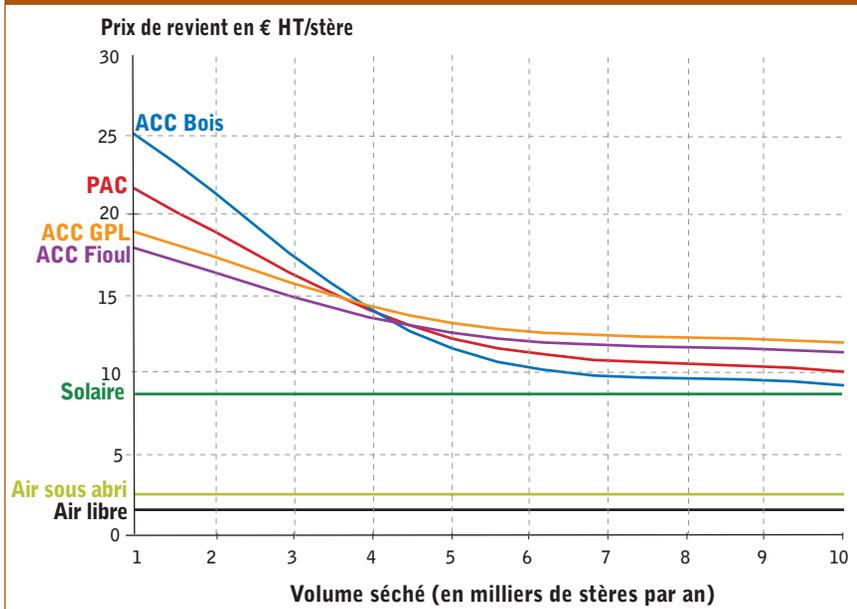


Figure 2 : Prix de revient du séchage selon le procédé et le volume annuel séché (1^{er} semestre 2005)



dégradations biologiques ou vols ; il n'est donc pas gratuit.

L'accélération rapide de la demande contribue à épuiser rapidement les réserves en bois apte à un emploi immédiat et impose aux producteurs de trouver des solutions pour accélérer la mise sur le marché de bois sec. Le recours au séchage artificiel est donc une solution envisageable, à condition qu'il réponde à des critères économiques, techniques et environnementaux adaptés à ce marché. Il faut également qu'il soit adapté aux caractéristiques des entreprises de production de bois

de chauffage qui, pour 80 % d'entre elles, sont de petite taille (inférieure à 5 personnes) et ne disposent pas d'infrastructures capables d'accueillir une installation de séchage.

Pour répondre à l'attente des producteurs intéressés par des solutions opérationnelles pour sécher le bois en bûches, l'ADEME a demandé au CTBA d'évaluer la pertinence du séchage artificiel pour ce produit avec les procédés de séchage actuellement disponibles, et d'étudier la potentialité du séchage solaire pour cette application. Le scénario de production retenu est

le séchage de bûches de chêne, en 50 cm de longueur, séchées de 33 à 20 % d'humidité sur brut, pour trois tailles de productions séchées : 1 000, 5 000 et 10 000 stères/an. Les procédés de séchage évalués sont le séchage à l'air libre ou sous abri, le séchage solaire avec appoint au fioul (SOL), le séchage par pompe à chaleur électrique (PAC), le séchage par air chaud climatisé (ACC) avec chauffage au bois, au fioul ou au GPL.

La durée du séchage

Selon les procédés, la durée des cycles varie dans un rapport de 1 à 33 (figure 1).

Le prix de revient

Les charges considérées dans le prix de revient (figure 2) sont les suivantes :

- Charges fixes : taxe professionnelle, frais financiers, assurance, amortissement séchoir, chaudière et bâtiment,
- Charges variables : personnel, électricité, combustible, chariot élévateur, entretien séchoir et chaudière, immobilisation du bois.

Pour une utilisation du matériel sur toute l'année, le prix de revient du séchage varie, selon les procédés et les volumes séchés, de 1,5 à 25 € HT/stère, aux conditions économiques du premier semestre 2005. La zone de compétitivité des procédés de séchage artificiel se situe vers 4 000 st/an.

Les investissements

Selon les cas, ils varient de 7 000 à 350 000 € HT, en tenant compte du

Investissements (en €) selon le procédé de séchage et le volume annuel séché (1^{er} semestre 2005)

Procédé	Volume séché (stères/an)		
	1 000	5 000	10 000
Air libre	7 400	37 000	75 000
Air libre plus bois	31 000	159 000	318 000
Air abri	18 000	89 000	179 000
Air abri plus bois	34 000	174 000	349 000
Solaire	36 000	192 000	366 000
PAC	73 000	169 000	243 000
ACC Bois	117 000	235 000	351 000
ACC Fioul	50 000	144 000	232 000
ACC GPL	52 000	147 000	237 000



Chargement de bois de chauffage.

© FCBA

coût d'acquisition du stock dans le cas du séchage à l'air.

Au delà de 3 500 stères/an, le séchage à l'air présente des investissements supérieurs à certains procédés de séchage artificiel.

Le temps de retour des investissements

C'est un indicateur de rentabilité et de risque. Il est fonction du prix de vente de la prestation de séchage ; à 12 €/stère, il est rapide pour le séchage à l'air (1 à 3 ans), il est plus élevé et dégressif en fonction du volume de bois séché pour le séchage artificiel (5 à 10 ans).

L'énergie et l'environnement

Selon les procédés de séchage artificiel et aux conditions retenues dans l'étude, la consommation énergétique pour sécher un stère est de 100 à 130 kWh ; les variations dépendent du rendement du générateur thermique. La production de gaz à effet de serre

varie de 0,3 à 32 kg de CO₂ entre le chauffage solaire plus bois et le chauffage au fioul ; les variations dépendent de la nature du combustible utilisé.

QUEL PROCÉDÉ CHOISIR ?

Le séchage à l'air libre ou sous abri présente les prix de revient et les temps de retour des investissements les plus bas. C'est aussi le procédé le plus lent qui nécessite d'anticiper la demande plus d'un an à l'avance. Au delà de 3 500 stères séchés par an, la constitution du stock initial représente un investissement équivalent, voire supérieur à certains procédés de séchage artificiel. Ce procédé s'impose pour les productions jusqu'à 4 500 stères/an et bien sûr pour les entreprises ne disposant pas de site de production en propre. Pour les productions supérieures, il reste un procédé complémentaire appréciable.

Le séchage solaire est envisagé avec un apport énergétique complémentaire pour maintenir une température de fonctionnement du séchoir suffisante, afin de garantir un temps de séchage fixe malgré les aléas climatiques. L'apport solaire, variable selon les sites, représente en moyenne 20 % de la consommation thermique. Il est très dépendant de la surface de

captation, la toiture dans les systèmes les plus simples.

Il présente un prix de revient modéré, mais des investissements et un temps de retour élevés au delà de 5 000 stères/an. Il est donc mieux adapté aux productions moyennes jusqu'à 5 000 stères/an, sous réserve d'évolutions sensibles dans la technologie et le coût des systèmes de captation ou du choix de l'énergie complémentaire, envisagée au fioul dans le cadre de cette étude.

Le séchage par air chaud climatisé présente les durées de cycles les plus courtes, grâce à l'emploi de températures élevées. Ses performances économiques sont liées au choix énergétique. Ainsi, le chauffage au bois sera pénalisé par un investissement initial élevé, mais avantage par un coût de combustible faible. La situation sera inverse pour le chauffage au fioul ou au GPL. Les coûts de combustibles étant proportionnels au volume séché et les investissements étant dégressifs selon le volume séché, la solution bois est d'autant plus compétitive que le volume séché est important. Le seuil de compétitivité de la solution bois par rapport aux solutions fioul et GPL se situe vers 4 500 stères/an. Ce procédé, avec toutes ses variantes énergétiques, présente cependant un prix de revient supérieur au séchage à l'air ou au séchage solaire.

Le séchage par pompe à chaleur présente une durée de cycle supérieure au procédé par air chaud climatisé du fait d'une température de séchage plus basse. L'investissement est légèrement supérieur aux solutions air chaud climatisé fioul et GPL, mais le coût énergétique est plus faible grâce au coefficient de performance de ces machines thermodynamiques. Ce procédé trouve sa place pour les productions vers 4 000 à 6 000 stères/an. De plus, il existe une offre de séchoir



Fendeuse.

mobile en location qui permet d'assurer la prestation de séchage lors de besoins ponctuels.

UNE CONDITION INDISPENSABLE POUR DÉVELOPPER LES VENTES

En final, il ressort que pour les petites productions, le séchage à l'air ou le séchage solaire sont les procédés à privilégier. L'optimisation de la durée peut être envisagée par des aménagements du site, sol, abri, ou des conditions de stockage et d'empilage plus propices à la circulation de l'air.

Pour les moyennes et grosses produc-

tions, le choix du procédé de séchage repose sur les priorités définies par l'entreprise, en fonction de ses produits et de ses marchés. Les solutions bois et pompe à chaleur sont bien placées, mais une étude de faisabilité est souhaitable pour adapter les moyens au contexte de production, car des combinaisons de procédés sont aussi possibles.

Le séchage du bois de chauffage est une condition indispensable au développement du marché du bois en bûches et un facteur différenciateur pour les producteurs. Le séchage et le financement des stocks sont des questions intimement liées. Or aujourd'hui, la création

de stock n'est plus envisageable pour couvrir l'ensemble des besoins.

Avec les moyens disponibles actuellement, l'étude des procédés susceptibles de convenir au séchage du bois de chauffage montre que le séchage artificiel reste hors de portée de nombreuses entreprises.

Il est nécessaire d'explorer de nouvelles voies sur les plans du matériel, de l'organisation et de l'information.

On peut citer entre autres :

→ le développement de matériels spécifiques minimisant les maintenances et la consommation d'énergie,

→ la qualification des performances de nouveaux séchoirs de type solaire,

→ la mutualisation ou le partage des équipements avec d'autres applications,

→ la réalisation de supports d'informations technico-économiques sur les procédés y compris le séchage à l'air, leurs performances, le mode opératoire, à l'usage des producteurs.

L'environnement actuel est propice au développement du marché du bois de chauffage. L'absence de volume suffisant de bois sec sur le marché nécessite de trouver rapidement des solutions opérationnelles et viables. Des investigations complémentaires sont souhaitables pour les définir. ■

Résumé

Pour répondre à une demande accrue de bois de chauffage, une analyse des différentes solutions de séchage possibles en fonction du volume produit et de la rentabilité souhaitée : à l'air libre, par énergie solaire, air chaud climatisé, pompe à chaleur.

Mots clés : bois de chauffage, séchage.

Pour bien sécher votre bois à l'air libre

Le séchage du bois est possible en extérieur, sous une tôle ondulée, une planche inclinée, ou une bâche qui ne recouvre pas les cotés, en pile aérée, sur palettes par exemple, durant un an environ ou sous abri. L'important est d'assurer une bonne ventilation (en ménageant des ouvertures dans la pile en mettant un bloc perpendiculairement), le vent fait sécher le bois, en emportant l'humidité superficielle, et extrait progressivement l'humidité interne. Le bois peut supporter la pluie directe à condition d'être stockée sous abri un mois environ avant l'utilisation.

Les bûches courtes en quartier séchent plus rapidement (17 à 15 mois) que les rondins de 1 mètre (2 ans).

Article paru dans CTBA INFO N°114-janvier 2007.

Des informations complémentaires dans notre dossier : « bois énergie » de Forêt entreprise n°172-janvier 2007.

Les étudiants de La Germinière au cœur de la forêt polonaise

C. Bertrand et T. Bernardie, étudiants de 2^e année en BTS GF au Legta de Rouillon (72)

Dans le cadre de leur formation en BTS agricole « Gestion Forestière » au Legta de Rouillon (72), les étudiants de 2^e année ont participé, en novembre dernier, à un voyage d'études enrichissant en Pologne.

Cette expérience fut une occasion exceptionnelle pour comparer les forêts de notre voisin européen et leur gestion aux nôtres. Certes la sylviculture est similaire, mais le contexte dans lequel elle se situe est sensiblement différent.

La forêt polonaise

Elle représente 9 millions d'hectares, soit 28 % du territoire polonais. 82 % de ces forêts appartiennent à l'État. L'essence principale dans ce pays est le pin sylvestre qui occupe 70 % de la surface forestière totale. 25 à 27 millions de m³ sont récoltés chaque année, contre 37 millions de m³ en France. 90 % de ces bois sont destinés à l'industrie, le reste part en bois de chauffage. La Pologne compte environ 10000 entrepreneurs forestiers dont 47 % sont des sociétés d'un seul employé. L'État encourage la création de sociétés de plus de 5 employés mais elles ne sont actuellement qu'un millier.

Des différences en sylviculture

Lors de la visite dans la forêt d'Hajnowka, les étudiants ont découvert des méthodes de gestion différentes de la gestion forestière française, surtout concernant la régénération des parcelles. Les plants utilisés pour régénérer certaines parcelles de la forêt doivent obligatoirement



La forêt primaire de Bielowieza, à l'état vierge et non touchée par l'intervention des hommes.

provenir de graines issues de cette forêt et non d'un autre massif. Les surfaces de régénération sont très petites (rarement supérieures à 5 ares).

La forêt primaire

La forêt de Bielowieza se situe à la frontière entre la Pologne et la Biélorussie, elle comprend 129000 ha dont 52000 ha sur le territoire polonais. En 1931, le Parc national de Bielowieza a été créé pour préserver 10000 ha de cette forêt à l'état vierge (NDLR: en réalité, préservée de toute exploitation, les 10000 ha de la forêt dite vierge subissent une pression anormale des herbivores bisons, cervidés qui s'y réfugient en période de chasse. La régénération naturelle est très fortement compromise, et l'avenir de cette forêt est mal engagé.). Son objectif principal est la protection

de la biodiversité, les espèces mentionnées sur les listes de Natura 2000 ainsi que d'autres espèces de plantes et de mammifères tels que le mythique bison d'Europe. Elle abrite 11000 espèces de plantes, 5000 espèces de champignons et 33000 espèces d'animaux. En outre, certaines espèces animales et végétales plus ou moins en danger d'extinction ont été recensées uniquement en ce lieu.

Dans cette réserve, l'exploitation est interdite et l'accès des visiteurs est très restreint. Les seules interventions humaines consistent à éliminer les arbres potentiellement dangereux le long des sentiers. Nous avons constaté que, même dans la partie gérée de la forêt de Bielowieza, le facteur environnemental primait toujours sur le facteur production de bois. Nous avons pu observer un bûcheron abattre un arbre en prenant soin de laisser une souche de 50 cm de haut pour les mousses et la microfaune. ■

Remerciements

Nous remercions tous les professionnels de la forêt polonaise qui ont partagé leurs connaissances avec nous, les guides et les traducteurs avec qui nous avons passé d'agréables moments, ainsi que les personnes qui nous ont hébergés dans cet accueillant pays.