

t RenDez-Vous e c h n i q u e s

n° 20 - printemps 2008



Dossier
p.19

Forêt et lutte contre l'effet de serre

Observatoire de l'orpaillage en Guyane



p. 10

patrimoine
sylviculture
progrès

connaissances

économie

forêts et société
environnement

biodiversité

gestion durable

Rendez-Vous techniques

Directeur de la publication

Bernard Gamblin

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Yves Birot, Joseph Behaghel, Jean-Marc Brézard, Léo Castex, Patrice Hirbec, Pierre Leroy, Alain Macaire, Patrice Mengin-Lecreulx, Jérôme Piat, Thierry Sardin, Jacques Valeix, Véronique Vinot, Sandrine Vivier

Maquette, impression et routage

Imprimerie ONF - Fontainebleau

Conception graphique

NAP (Nature Art Planète)

Crédit photographique

page de couverture

En haut : Y. M. Gardette, ONFI

En bas : SPOT 5 / ONF Guyane

Page d'ouverture de dossier : Y. M. Gardette, ONFI ;

D. Bonal, INRA

Périodicité

4 numéros par an, et un hors série

Rendez-vous techniques est disponible au numéro ou par abonnement auprès de la cellule de documentation technique, boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau

Contact : dtech-documentation@onf.fr

ou par fax : 01 64 22 49 73

Prix au numéro (hors frais de port) :

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

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

Dépôt légal : mai 2008

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

sommaire

n° 20 - printemps 2008

3

méthodes

Bilan de l'orpillage en Guyane : une étude fondamentale*par Alain Coppel, Valéry Gond et Sébastien Allo*

10

méthodes

Face à la ruée vers l'or en Guyane : un observatoire de l'activité minière*par Pierre Joubert, Sébastien Linares et Valéry Gond*

15

méthodes

Les structures archéologiques et les peuplements de la forêt domaniale de Haye analysés par laser aéroporté*par Jérôme Bock, Jean-Luc Dupouey, Étienne Dambrine, Murielle Georges-Leroy*

21

dossier thématique**La forêt et la lutte contre le changement climatique**

61

connaissances

Les cloisonnements sylvicoles ont-ils un effet significatif sur la forme des tiges de hêtre ?*par François Conrard et Didier François*

68

pratiques

Les oiseaux face au changement climatique*par Frédéric Archaux*

éditorial

Les hasards du calendrier donnent à ce Rendez-vous du printemps 2008 un souffle particulier puisqu'il traite de phénomènes planétaires, avec le dossier sur « la forêt et la lutte contre le changement climatique », et s'offre par ailleurs une dimension aérienne et même spatiale dans trois articles parlant de télédétection.

Plus modestement, il devenait urgent de faire le point sur la question complexe de la contribution forestière à la lutte contre l'effet de serre dans ses aspects biologiques, bien sûr (et ce n'est déjà pas simple comme en témoigne par exemple l'article de Jean-Luc Peyron), et surtout dans le cadre du processus politique international lancé avec le « protocole de Kyoto ». Ceci dit, le moment de ce dossier est bien choisi car l'actualité 2007 a été particulièrement dense sur le thème de la forêt et du changement climatique, qui a fortement marqué les avancées de la conférence internationale sur le climat en décembre à Bali.

En ce qui concerne la télédétection, le propos n'est pas ici d'en cerner tous les enjeux et développements possibles, mais seulement de présenter deux applications contrastées, assez spectaculaires et surtout très pratiques et pleines de promesses. La première, traitée en deux articles, concerne l'exploitation de l'imagerie satellitaire pour l'appréhension des impacts et le contrôle de l'orpaillage en forêt guyanaise, selon une procédure mise au point par l'ONF en collaboration avec le CIRAD et désormais déployée en « routine ». La seconde montre la performance du laser aéroporté (LIDAR) pour repérer sous couvert forestier les structures archéologiques de massifs anciennement très « habités », avec des prolongements de recherche appliquée en matière écologique et dendrométrique.

Ne négligeons pas pour autant l'importance de la gestion « ordinaire » et du terrain et signalons pour finir un article beaucoup plus terre-à-terre relatif à l'effet possible des cloisonnements sylvicoles sur la forme des tiges de hêtre et la qualité du peuplement futur : les résultats expérimentaux dissipent les inquiétudes.

Le Directeur technique et commercial bois
Bernard GAMBLIN

Bilan de l'impact de l'orpaillage en Guyane : une étude fondamentale

La forêt guyanaise couvre un territoire immense, inaccessible, et où se manifestent des enjeux puissants. La gestion durable y requiert des dispositifs originaux d'observation et de contrôle, dont nous avons donné un aperçu en matière d'exploitation à faible impact (RDVT n° 17). Voyons maintenant le problème critique du contrôle de l'orpaillage, en deux articles complémentaires ; voici d'abord les moyens que l'ONF a su mobiliser pour dresser un bilan dynamique des impacts de la nouvelle « ruée vers l'or ».

La Guyane recèle un potentiel aurifère important. La « découverte » de l'or vers 1850 s'était déjà traduite pendant près d'un siècle par une « ruée vers l'or » et une intense activité d'orpaillage sur une grande partie du territoire. Puis cette « fièvre de l'or » était retombée. Mais depuis le début des années 90, la Guyane connaît une recrudescence de l'activité minière aurifère liée à la hausse du cours de l'or sur le marché international, au développement de nouvelles techniques mécanisées importées du Brésil ainsi qu'à la mise à disposition du public, en 1996, des données de l'Inventaire Minier réalisé par le BRGM sur des fonds publics.

S'agissant presque exclusivement d'exploitations alluvionnaires menées directement dans le lit des cours d'eau (voir encadré page 5), ces activités provoquent d'une part la destruction totale de forêts primaires sur des surfaces non négligeables mais aussi et surtout, lorsqu'elles sont mal conduites (ce qui est tout particulièrement le cas des activités illégales), une perturbation grave des hydrosystèmes

par rejets massifs de boues directement dans les rivières.

À ces impacts s'ajoutent les rejets de produits dangereux tels que le mercure mais aussi les hydrocarbures dont les effets sont très durables, avec des conséquences qui peuvent être dramatiques. Rappelons que l'emploi du mercure est interdit dans le cadre de l'exploitation aurifère en Guyane depuis le 1^{er} janvier 2006, mais il reste très utilisé par les opérateurs illégaux.

Par ailleurs, malgré une capacité forte de la végétation forestière à se régénérer naturellement, la revégétalisation spontanée s'avère très lente, voire impossible sur certains sols triés, lessivés et compactés par le processus d'extraction.

À l'initiative de la DR ONF Guyane, le « Bilan patrimonial de l'activité minière » a pour but d'évaluer, de quantifier et de rendre compte de l'état de l'orpaillage et de sa dynamique en Guyane sur ces 15 dernières années. Cette étude dresse le premier état de l'étendue des impacts en forêt guyanaise depuis le début de la nouvelle « ruée vers

l'or », pour sensibiliser les services de l'État sur son ampleur et celle des atteintes aux milieux naturels afin de provoquer rapidement la mise en œuvre d'une véritable politique minière en Guyane. Avec des mises à jour régulières, ce bilan doit être un outil de décision et de communication au plus haut niveau de l'État en Guyane, aussi bien pour des actions de police que pour l'aménagement du territoire (Lors de son discours du 11 février dernier à Cayenne, le Chef de l'État a d'ailleurs évoqué l'élaboration d'un « schéma départemental d'organisation minière et d'aménagement... définissant des zones ouvertes et des zones interdites à l'exploitation minière »). Il donne en effet à l'ensemble des décideurs locaux concernés par l'aménagement, l'utilisation du territoire et la gestion des patrimoines et des ressources une vue très nette de la situation des activités minières, légales et illégales, et de son évolution. À terme, ce bilan permettra aussi de quantifier l'étendue du passif environnemental de l'orpaillage, et de définir les moyens à mettre en œuvre pour restaurer autant que faire se pourra les espaces naturels dégradés.

L'ONF Guyane et ses partenaires, face à une problématique nouvelle

Dans le cadre du mandat de gestion patrimoniale des forêts publiques confié par l'État, l'ONF Guyane est notamment chargé du contrôle des occupations et des activités concernant ce domaine forestier. C'est pourquoi il a créé en 1996 une Unité Spécialisée Nature, chargée plus particulièrement du suivi des activités minières et de leurs impacts.

Pour ce suivi, l'US travaille en concertation avec les autres administrations locales concernées par l'activité minière à divers titres : la DRIRE dans le cadre de ses missions de police des mines et d'inspection du travail, la gendarmerie pour la lutte contre l'orpaillage clandestin, la DAF dans le cadre de sa mission de police de l'eau, et les Forces Armées de Guyane (FAG) dont les missions dans la « grande verte » en font un partenaire privilégié du renseignement.

Depuis l'origine, chaque mission de surveillance ou opération mise en œuvre sur le terrain a donc fourni, tous services confondus, des informations importantes quant à la situation et l'évolution des activités et de leurs impacts en termes quantitatifs et qualitatifs. Cependant la diversité des outils utilisés se traduit par des données très abondantes mais partielles et hétérogènes sur la situation actuelle et l'évolution des activités depuis ces 15 dernières années. L'ONF, la DRIRE, la Gendarmerie et les FAG effectuent en effet, pour des finalités diverses, des relevés de divers types qu'il est difficile ensuite de traiter de façon homogène sur l'ensemble du territoire. D'autant que la localisation au sein de la forêt amazonienne est en soi problématique, vu la dispersion des sites et les conditions d'accès difficiles de la plupart des secteurs miniers.

Comment restituer quinze ans d'une activité à fort impact ?

Pour l'ONF, en tant que gestionnaire du patrimoine forestier, le but de ce premier bilan est de restituer de la manière la plus exhaustive possible, l'état des occupations liées à l'activité minière, qu'elles soient légales ou illégales. L'idée est donc de faire un point « zéro » correspondant à la situation en 1990, reconstituée d'après les images satellites, puis un point de situation pour 2000 et enfin un bilan précis pour fin 2006 s'appuyant à la fois sur les relevés de l'US Nature et de ses partenaires et sur les données satellites.

Au-delà de la localisation des sites et de la cartographie des zones exploitées, il s'agit également de quantifier les impacts au niveau des bassins versants concernés, sur deux points précis :

- les surfaces déforestées et travaillées en exploitation ;
- le linéaire de cours d'eau soumis à l'impact, soit directement du fait de la destruction totale des écosystèmes aquatiques, soit indirectement, pour les segments situés à l'aval des secteurs travail-

lés et donc plus ou moins touchés par les rejets de boues ou de matières dangereuses issues des chantiers.

Exposé ainsi, le principe de l'étude est fort simple... mais sa réalisation a mis en œuvre des techniques de pointe et donné lieu à des avancées méthodologiques majeures.

Base de départ : le stockage et le traitement des relevés de l'ONF sur SIG

Dans le cadre des missions de suivi des sites et d'accompagnement de l'activité minière légale, l'ONF a collecté depuis 1996 une masse importante de données. Les activités illégales et clandestines ont également fait l'objet de relevés systématiques. Des fiches de relevés en vol (pour les missions hélicoptérées ; voir encadré) ou au sol reprennent les principaux éléments d'observation à prendre en compte, en corrélation avec des champs de saisies créés au niveau du système d'information géographique (SIG). Ceci permet l'harmonisation des données collectées et leur exploitation rationnelle.

Nécessité de la surveillance par hélicoptère

Le suivi des activités minières en Guyane relève d'un paradoxe :

- d'une part, le massif forestier est très largement inaccessible : des routes forestières desservent une partie de la bande des forêts aménagées, mais aucune piste ne pénètre plus à l'intérieur. L'accès terrestre n'est donc en général possible qu'à pied ou en pirogue avec les délais que cela impose au vu des distances (la superficie de la Guyane correspond à celle de 15 départements métropolitains).
- Mais d'autre part, les activités minières — légales ou illégales — se trouvent très dispersées sur la plus grande partie du massif à l'instar des gisements d'or alluvionnaire (à noter par ailleurs que les gros engins de chantiers miniers, hors piste, sont, eux, acheminés à travers la forêt).

L'ONF est donc amené pour le suivi de l'activité minière à recourir largement à des missions hélicoptérées, dans le cadre de marchés passés avec des sociétés privées ; le nombre de missions varie en fonction de l'importance des activités en cours à contrôler mais aussi des moyens disponibles (de l'ordre de 80 k€/an).

L'orpaillage alluvionnaire

Il s'agit d'extraire l'or issu des gisements primaires, qui, par des phénomènes d'altération des roches et d'érosion, se retrouve aujourd'hui dans les dépôts sédimentaires des cours d'eau.

L'exploitation du gisement alluvionnaire va donc se développer dans le lit majeur du cours d'eau concerné, voire dans son lit mineur, après création d'un canal de dérivation. Après un déboisement complet de la vallée alluviale, et un décapage des horizons superficiels, on procède à la découverte du gisement qui consiste parfois à extraire plusieurs mètres de sol avant d'atteindre les couches aurifères.

À partir de là, l'extraction du minerai s'effectue en délitant les couches de terrain au moyen d'un matériel type « lance à incendie » alimenté par une motopompe, avec ou sans l'appui d'une pelle hydraulique pour le foisonnement du matériau. La pulpe hydraulique ainsi obtenue est canalisée vers un point de captage où une nouvelle pompe prend en charge le flux boueux pour l'envoyer vers une laverie gravimétrique.

Cette laverie ou table de lavage, construite sur site à partir de bois débités à la tronçonneuse ou en atelier à partir d'éléments métalliques, est généralement constituée de trois éléments :

- **un piège à pépites** constitué d'une caisse de profondeur variable et de la largeur de la table permet le dépôt des particules d'or les plus lourdes et le reflux de l'eau encore chargée des particules plus fines ;
- **une première table inclinée** composée d'un couloir recouvert de moquettes plastiques et de grilles métalliques. L'inclinaison de cette table est variable, afin de contrôler la vitesse d'écoulement du mélange en fonction du débit de la pompe à gravier et du taux de dilution de la pulpe. La forme des grilles métalliques permet de créer une ondulation verticale du flux de pulpe, favorisant le dépôt des particules en suspension, tandis que les moquettes permettent un piégeage de ces mêmes particules ;
- **une deuxième table inclinée** dont la constitution et les aménagements sont les mêmes que pour la première, mais dont le pendage est inverse. Cette rupture brutale de pente et l'inversion du sens d'écoulement permettent de casser le flux, favorisant le dépôt des dernières particules d'or en suspension, en sachant que la majorité de cet or se dépose sur le premier tronçon de table.

Le rejet des eaux de lavage du minerai se fait de la table vers des bassins de décantation successifs au fur et à mesure de la progression du chantier dans l'axe de la vallée, ce mode de fonctionnement nécessitant évidemment une étanchéité parfaite du système, afin de ne créer aucune pollution du cours d'eau par MES (Matières En Suspension).



US Nature/ONF

Chantier alluvionnaire avec deux pelles hydrauliques au foisonnement du minerai et l'unité de lavage gravimétrique



US Nature/ONF

Après découverte totale du gisement, exploitation de la couche de minerai à la lance à incendie ou « lance monitor »



US Nature/ONF

Table de lavage gravimétrique construite avec les produits du déforestation

Pour chaque site légal visité, plusieurs éléments font l'objet de relevés GPS (par hélicoptère le plus souvent ou au sol) : la position de la base vie et d'autres infrastructures logistiques si celles-ci sont éclatées (drop zone, débarcadère si le site est approvisionné par pirogue, stockages de carburant...), les extrémités aval et amont du chantier qui s'étend presque toujours dans l'axe d'un cours d'eau, la largeur d'emprise du secteur travaillé. À chaque nouvelle visite, les points d'extension du chantier sont relevés afin d'actualiser son étendue.

Pour les sites illégaux, les relevés systématiques concernent la position des campements, le nombre de carbet (structures sommaires en bois ronds couvertes de bâches, servant au couchage des personnels et au stockage des matériels), et celui des « chantiers » (un « chantier » correspond à une paire de motopompes alimentant une table gravimétrique). Sur les secteurs où l'activité clandestine s'est étendue significativement, un relevé périodique des impacts est également effectué.

Au retour de chaque mission, les données relevées sont transférées dans une base informatique spécialisée sous SIG, selon un protocole défini : téléchargement des GPS dans la base complété par un travail de numérisation des surfaces et de renseignement des champs de saisie (date de la mission, caractérisation des éléments levés...). Leur traitement permet notamment de cartographier les zones travaillées et impactées sur les différents secteurs d'activité minière avec, en référence, la période d'exploitation et l'identité de l'opérateur concernés (pour les chantiers légaux bien sûr). Voir figure 1.

Élargir le dispositif SIG de l'ONF aux données des partenaires

Pour compléter le bilan, il a fallu intégrer à cette base de données les informations collectées par les partenaires selon leurs propres méthodes et mises à notre disposition. Ce travail a comporté les phases suivantes :

- la saisie d'un nombre considérable de relevés GPS effectués par d'autres services lors de leurs missions de contrôle (DRIRE, Gendarmerie, FAG), ainsi que d'anciens relevés de missions ONF, afin de les intégrer aux bases de données du SIG-ONF avec leurs éléments d'identification après un travail concerté de dépouillement, d'homogénéisation et de calage des descripteurs ;
- la numérisation du pourtour des secteurs travaillés (en référence aux périodes d'exploitation et opérateurs miniers autorisés pour les sites légaux), tels qu'ils ressortent de l'ensemble des données collectées, en se calant sur les points de relevés et en tenant compte des éléments descriptifs successivement enregistrés pour chaque secteur (largeur d'emprise, pourtour du couvert végétal impacté) ;
- le calage avec les fonds cartographiques utilisés (IGN, BRGM) ; l'« imprécision » avant recalage pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres selon les secteurs et le fond disponible.

L'apport des satellites : sélectionner les sources pertinentes...

Reste que pour appréhender l'évolution de l'activité minière sur le territoire à travers ce bilan patrimonial, il fallait un « point zéro » qui a été calé sur l'année 1990, période de faible activité avant la nouvelle « ruée ». La dif-

ficulté est que nous n'avions quasiment aucun relevé pour cette époque (pas d'accès aux moyens de relevés aériens actuels, photographies aériennes peu disponibles sur l'intérieur du territoire qui est pourtant le plus concerné). Or, parallèlement à nos préoccupations, le CIRAD travaillait à l'analyse de la fragmentation du milieu forestier amazonien en Guyane à partir de l'imagerie satellite. D'où l'idée d'orienter cette analyse sur une des causes de la fragmentation, à savoir l'orpillage alluvionnaire. De là, est née en 2005 une convention entre le CIRAD et l'ONF pour développer une méthodologie basée sur l'utilisation des données satellites pour détecter et cartographier les sites d'orpillage en Guyane.

Les données satellites utilisées dans le cadre de cette expertise CIRAD-ONF ont donc servi à la fois à analyser l'activité minière autour de l'année 1990 et à compléter les observations faites entre 1999 et 2001. Elles sont relatives aux gammes spectrales visibles et infrarouge. Ces longueurs d'ondes sont particulièrement indiquées pour analyser les mécanismes fonctionnels de la végétation (activité chlorophyllienne et état sanitaire principalement).

Les instruments de mesure les plus pertinents pour ce genre d'opération sont le capteur Thematic Mapper et le capteur Enhanced Thematic Mapper +, embarqués respectivement à bord des plateformes LANDSAT5 et LANDSAT7. Les données sont disponibles sur un site internet en libre accès [Université du Maryland (USA) GLCF (Global Land Cover Facility)]. Après exploration des diverses bases de données images, deux couvertures totales de la Guyane étaient accessibles pour les périodes qui nous intéressaient (autour de

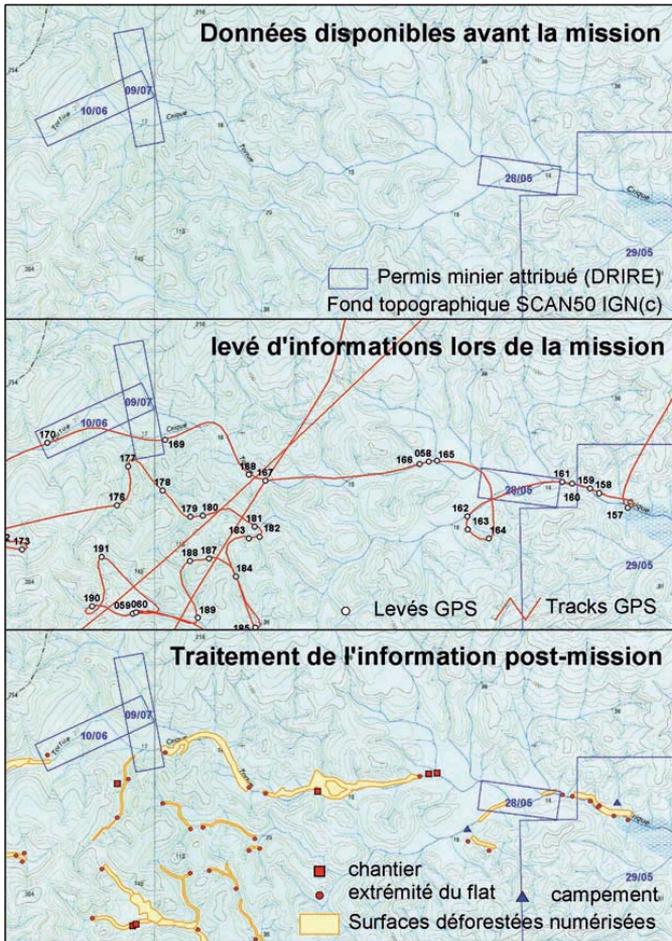


Fig. 1 : collecte d'informations lors des missions hélicoptérées



Site minier alluvionnaire avec le chantier et la base vie

1990 et autour de 2000). La résolution spatiale de 30 m était largement suffisante dans le cadre de l'étude (pour mémoire, des outils plus récents offrant de meilleures résolutions (5 m et 10 m), comme sur le satellite SPOT5, sont également tout à fait adaptés à la méthode et pourraient être immédiatement opérationnels pour de futurs développements).

Les données sont toutes corrigées radiométriquement et géométriquement. La projection est réalisée en UTM fuseau 22 (géoïde WGS84). La précision au sol y est de 90 m environ, d'après nos estimations. Les bandes spectrales exploitées sont le rouge (Canal 3, sensible à l'absorption chlorophyllienne des feuilles), le proche infrarouge (Canal 4 sensible à la structure des feuilles) et le moyen infrarouge (Canal 5 sensible à l'eau des feuilles).

...et mettre au point une méthode d'analyse adaptée au problème

On constate que les sites d'orpillage sur lesquels on utilise la technique actuelle de décapage du sol ont une « signature spectrale » très particulière. Le principe général de la méthode mise au point avec le CIRAD est donc fondé sur l'utilisation des contrastes entre l'objet observé et son environnement (Gond et al., 2004). Ces contrastes sont amplifiés par des méthodes de calcul pour isoler proprement les objets étudiés et mieux les identifier. Une fois identifiés, ils sont extraits des images sous forme de données vectorisées (figure 2) qui peuvent alors alimenter un système expert en données géoréférencées tel que le SIG-ONF.

La validation de cette analyse a nécessité la comparaison de l'ensemble des secteurs identifiés par cette méthode de télédétection,

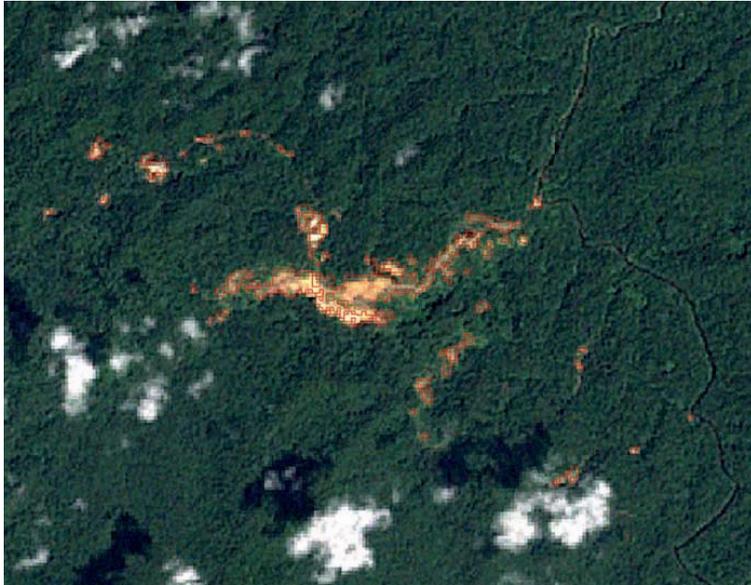


Fig. 2 : traitements LANDSAT

tiellement obtenu grâce aux travaux de télédétection du CIRAD (images LANDSAT5 prises entre 1986 et 1992).

Le bilan des surfaces travaillées en 2000, soit 4 028 ha, a été établi à partir des résultats de la télédétection sur des images LANDSAT7 prises entre 1999 et 2001, validés et corrigés grâce aux données relevées par l'US Nature entre 1996 et 2000. Outre l'extension significative de tous les secteurs déjà identifiés comme en activité en 1990 (exception faite de celui de Ouanary qui reste stationnaire), de nouvelles zones d'activité apparaissent.

Le bilan des surfaces travaillées au 31-12-2006, soit 12 011 ha, vient uniquement du traitement des relevés réalisés par l'US Nature entre 2000 et fin 2005. Outre la poursuite de l'extension significative des secteurs identifiés comme en activité en 1990 et 2000, de nouveaux secteurs apparaissent encore.

Enfin le traitement des relevés réalisés par l'ONF a permis de dresser le **bilan cumulé au 31-12-2006 des linéaires de cours d'eau impactés** (figure 4), en distinguant :

à savoir 18 zones d'orpaillage pour l'année de référence 1990 et 22 pour l'année de référence 2000, avec le résultat du traitement des données intégrées au SIG-ONF sur ce thème. Cela a permis d'écarter certains points identifiés à tort comme de l'activité minière (des glissements naturels de terrain ou des zones d'habitats particuliers, déjà connues et parfois cartographiées).

Ce premier bilan révèle « l'explosion » de l'orpaillage... et de ses impacts

Les résultats de cette expertise sont présentés sous la forme de cinq restitutions cartographiques (figures 3 et 4).

Le « point zéro » des surfaces en cours ou récemment travaillées fin 1990, soit 212 ha, a été essen-

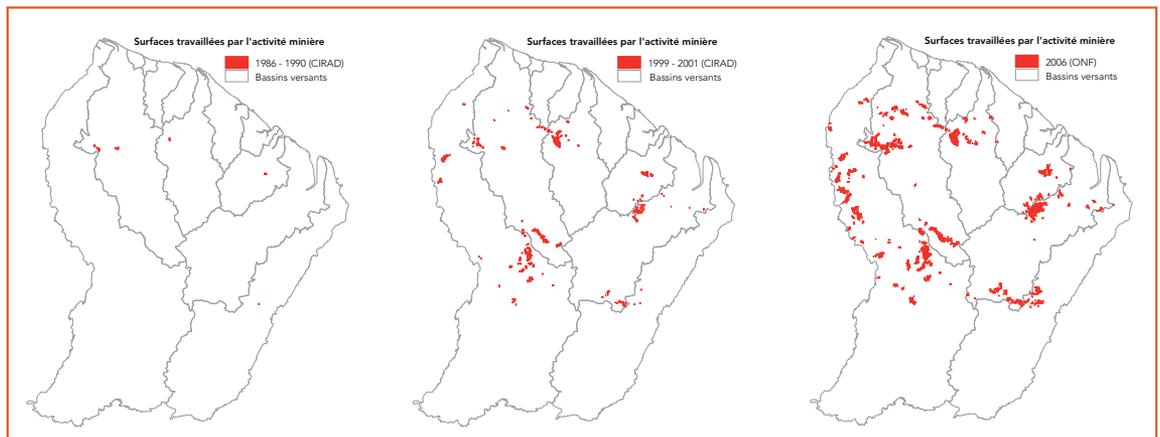


Fig. 3 : « point zéro » de l'orpaillage en 1990 et bilan des surfaces travaillées en 2000 et 2006

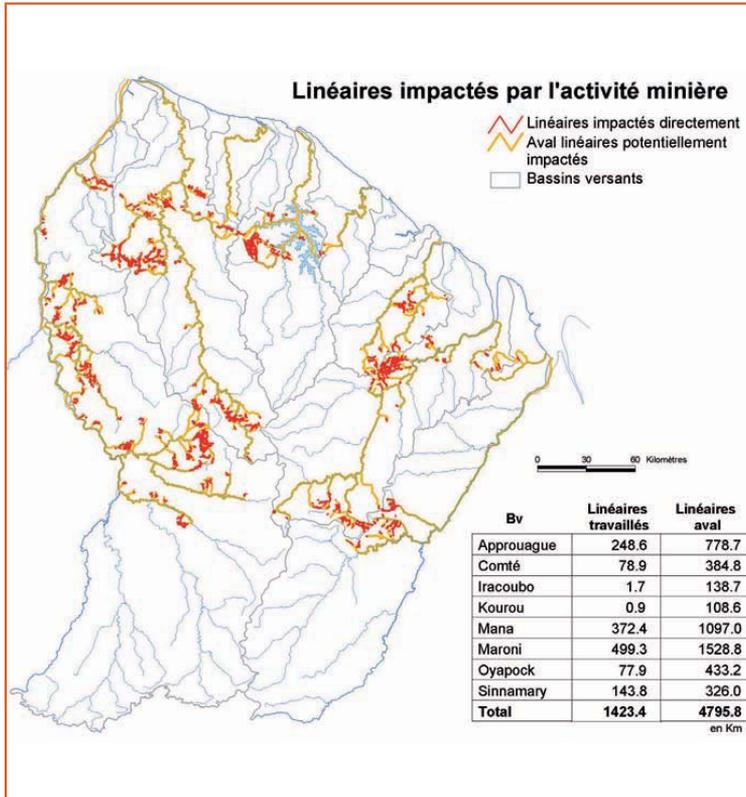


Fig. 4 : bilan de l'impact de l'orpaillage sur les cours d'eau en 2006

- les segments directement et fortement impactés, au droit des zones en exploitation, soit 1 423 km ;
- les linéaires indirectement impactés, soit 4 796 km, situés à l'aval des segments précédents. Ils sont concernés par l'ensemble des rejets polluants issus des chantiers (matières en suspension (MES), mercure sous forme méthyl-mercure, hydrocarbures...). Dans l'attente des résultats d'études menées actuellement sur ces impacts, notamment par les MES (étude des niveaux d'impact « résiduels » en fonction de la distance à la source de pollution et de la capacité du milieu naturel à « absorber » ces impacts), on a pris en compte, en première approche, la totalité des

linéaires situés en aval des chantiers travaillés.

L'ONF, pilote d'un observatoire de l'espace forestier guyanais

Ce premier bilan patrimonial de l'orpaillage en Guyane réalisé par l'ONF permet de valoriser près de 15 années de relevés effectués sur cette activité par l'US Nature et les services de l'État partenaires. À partir de ces données stockées et traitées grâce au Système d'Information Géographique de l'ONF, ce bilan a montré la faisabilité et la fiabilité de la technique de télédétection pour le suivi de la dynamique minière en forêt tropicale humide. La télédétection, parti-

culièrement économe en moyens humains et matériels, peut donc jouer un rôle important dans ce domaine en facilitant et en orientant les contrôles.

En outre cette étude aura permis d'identifier des méthodes et des outils qui doivent permettre, au-delà de la réalisation de bilans et d'expertises diverses, une observation en quasi continu de ces activités à fort impact environnemental potentiel à des fins de meilleure connaissance mais aussi d'organisation des contrôles de l'orpaillage légal et de lutte contre les activités clandestines. En ce sens, le travail réalisé permet de préfigurer ce que pourrait être un véritable **observatoire de l'activité minière**, en croisant des approches par télédétection avec l'inévitable poursuite - mais à un niveau et donc un coût moindre - de missions de reconnaissance aérienne et terrestre. C'est l'objet d'un second article sur ce sujet très sensible.

Alain COPPEL

ONF, DR Guyane

Chef de l'Unité Spécialisée Nature

Alain.coppel@onf.fr

Valéry GOND

CIRAD-Forêt

Chercheur en télédétection spatiale

Valery.gond@cirad.fr

Sébastien ALLO

ONF, DR Guyane

Unité Spécialisée Nature

Sebastien.allo@onf.fr

Bibliographie

GOND V., BROGNOLI C., 2005. Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane française. Bois et forêt des tropiques, n° 286, pp. 5-13

Face à la ruée vers l'or en Guyane : un observatoire de l'activité minière

Le bilan de l'orpaillage réalisé par l'ONF a montré que l'imagerie satellitaire était une source d'information pertinente et complémentaire aux levés de terrain pour le suivi et la compréhension de la dynamique minière en Guyane. L'expertise développée à cette occasion a abouti aujourd'hui à la mise au point par l'ONF d'un système efficace d'alerte et de suivi intégrant l'analyse périodique des images SPOT5 à un véritable système d'information territorial.

L'information géographique, un secteur stratégique pour la lutte contre l'orpaillage illégal

Sur un territoire grand comme le Portugal et recouvert par une forêt tropicale dense et difficile d'accès, l'information géographique est un domaine stratégique : la « ruée vers l'or » que connaît la Guyane depuis une quinzaine d'années a donné l'occasion d'en faire la démonstration.

Depuis 10 ans, l'ONF s'est organisé pour restituer sur SIG l'ensemble des informations relevées dans le cadre de son mandat de gestion des forêts publiques, et assurer le suivi dynamique du développement de l'orpaillage. De là est née l'idée de valoriser cet outil, en y intégrant les données relevées par les autres services concernés, pour établir un bilan sur 15 ans qui permette de connaître précisément et d'appréhender dans l'espace et dans le temps ce phénomène complexe et explosif. La nécessité de rendre compte avec précision de situations déjà anciennes a conduit à exploiter l'imagerie satellite, avec le concours d'un chercheur du CIRAD (Centre international de recherche en agronomie pour le développement), spécialiste de la télédétection appliquée au milieu

forestier tropical. L'utilisation nouvelle de la télédétection dans ce contexte s'est avérée particulièrement pertinente.

Fort de ses compétences environnementales et de l'expertise en géomatique développée à l'occasion du « bilan patrimonial de l'activité minière », l'ONF se positionne désormais comme un acteur majeur de la mise en place d'un Observatoire de l'Activité Minière en Guyane : l'accès à une information fiable, complète et régulièrement mise à jour est en effet une nécessité stratégique, pour contrôler un secteur d'activité en croissance exponentielle où les opérateurs illégaux sont actuellement au moins aussi nombreux et actifs que les opérateurs légaux.

L'Observatoire, un véritable système d'information territorial

Dans un premier temps, l'ONF a proposé à la préfecture de Guyane la mise en place d'une plate-forme d'information géographique qui permette de mettre en commun les données recueillies par les différents services de l'État dans le cadre de leurs missions respectives.

Soutenu dès lors par une demande forte du préfet, qui a impliqué les services de l'État dans la

démarche, l'ONF a engagé les premières consultations, déposé les demandes de financements (FIDOM) et organisé les premiers comités de pilotage pour la mise en œuvre de cet observatoire.

Ainsi la DAF (mission de police de l'eau), la DIREN, la DRIRE, la gendarmerie et les Forces Armées de Guyane (FAG) vont nourrir une plate-forme d'information (en fait un serveur FTP sécurisé) et auront un accès aux données fournies par les partenaires.

Le rôle du service cartographique de la direction régionale ONF Guyane est ici multiple : définition de l'architecture du système d'information mutualisé (structuration des bases de données, modalités d'échange), mais surtout accompagnement de chacun des services partenaires du programme dans la mise en œuvre opérationnelle de ces données dans leurs SIG respectifs.

Qu'il s'agisse des aspects matériels, logiciels, des référentiels géographiques acquis ou des méthodes, des procédures et ressources humaines disponibles, le problème est de pallier les défaillances des systèmes actuellement en place : manque de personnels spécialisés, de procédures pour la création de données, de formalisa-

tion des systèmes. Pilote de l'opération, l'ONF doit donc assurer un cadrage et un appui technique conséquents, pour permettre à tous de tirer bénéfice de cette mise en commun. Ainsi, la mise en place de cet observatoire « tirera vers le haut » les SIG des partenaires.

Les satellites : une précieuse source d'information

Le travail en collaboration avec le CIRAD, initié lors du « bilan patrimonial », a été l'occasion d'un transfert technologique et de compétences vers l'opérateur SIG de l'ONF à Cayenne.

La deuxième étape a donc été de lancer, à l'initiative de la DIREN et en collaboration avec le CIRAD et l'ONF, une étude méthodologique destinée évaluer les apports potentiels des nouveaux outils de télédétection pour l'observation de l'activité minière en « routine ».

Depuis la mise en place en 2006 du programme SEAS (Surveillance de l'Espace Amazonien par Satellite), conduit par l'IRD en coopération avec l'État, la Région et les partenaires concernés dont la société SPOT IMAGE, il est possible d'accéder gratuitement aux données issues du satellite SPOT5 sur deux secteurs d'étude particulièrement actifs : **la réserve naturelle des Nouragues et la forêt aménagée de Roche Fendée** d'une part et **le secteur de la rivière Sikini dans la zone cœur du Parc national de Guyane** d'autre part (figure 1).

Les images SPOT5 ont une meilleure résolution spatiale que les images LANDSAT utilisées précédemment. Avec une précision de 10 m en couleur (XS) et de 5 m en noir et blanc (panchromatique) les objets visibles sont plus fins. Chaque image couvre une zone de 60 km de côté. La résolution spectrale est aussi intéressante avec 4 canaux allant du bleu (Canal 1 :

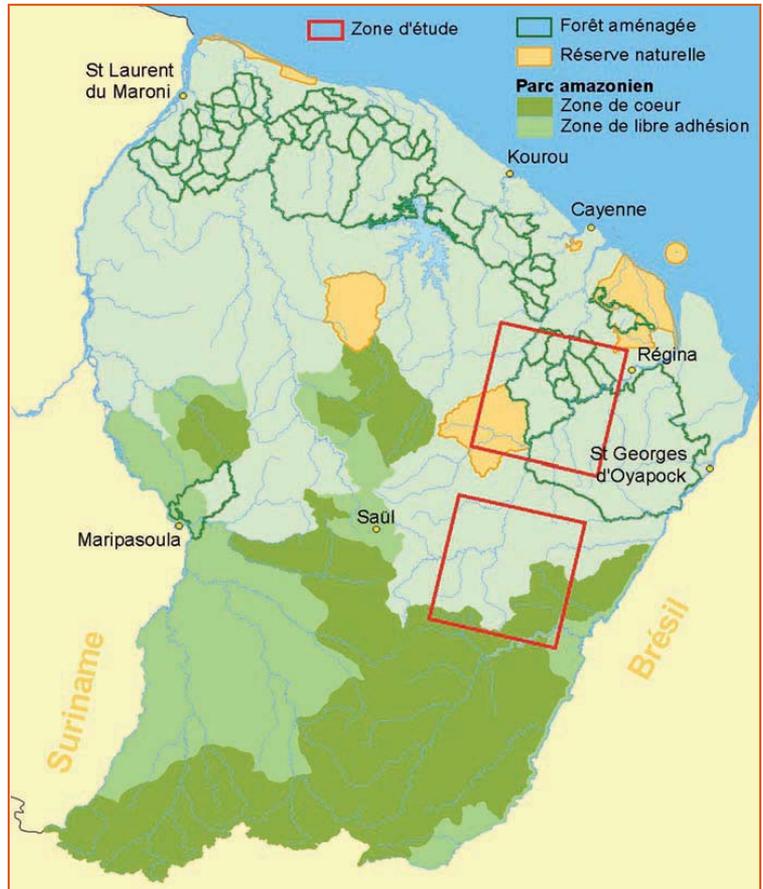


Fig. 1 : localisation des zones d'étude

[0.50 – 0.59]) au moyen infrarouge (Canal 4 : [1.58 – 1.75]) en passant par le rouge (Canal 2 : [0.615 – 0.68]) et le proche infrarouge (Canal 3 : [0.79 – 0.89]). Voir aussi « Les principes de la télédétection spatiale », RDVT n° 17, p 18.

L'étude a porté sur la caractérisation des « objets » suivants, observables sur les données satellites.

Les déforestations : nettement visibles (figure 2), elles permettent de reconnaître précisément les secteurs travaillés. La signature spectrale des déforestations n'est, par contre, pas discriminante ; au vu de la forte nébulosité, les franges nuageuses et «nuages

vapeux» peuvent avoir la même réponse aux traitements automatisés. On analyse donc ces objets « sol nu » par photo-interprétation classique en numérisant leurs limites directement à l'écran.

Les pollutions des eaux : elles donnent un excellent indicateur de l'activité, car l'exploitation aurifère illégale telle qu'elle est pratiquée en Guyane, par lessivage des sols, rejette une quantité impressionnante de matières en suspension dans les cours d'eau guyanais. Les eaux turbides ont une signature spectrale très particulière et beaucoup plus discriminante (figure 2). Un traitement automatisé est alors possible.



S. Linares

La crique Kwata (à droite), très turbide, se jette dans l'Approague (au centre)

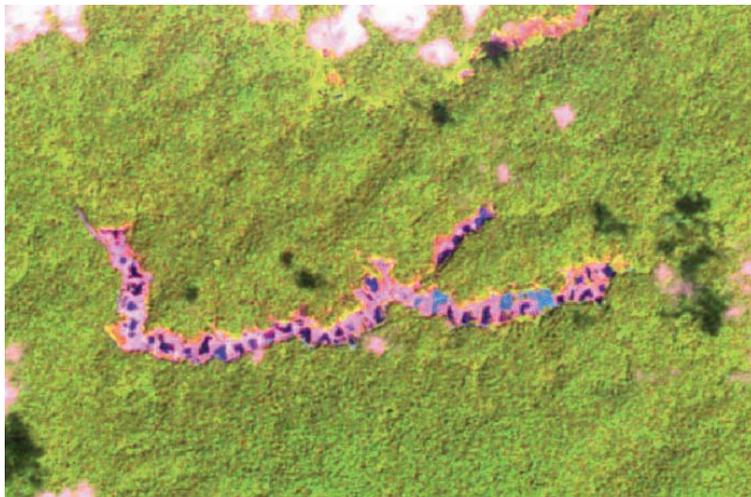


Fig. 2 : extrait d'une image (en fausse couleur) SPOT5 : en rose les surfaces déforestées, en bleu nuit les eaux non turbides, en bleu électrique les eaux chargées de matières en suspension

Alerte et suivi : deux dispositifs opérationnels

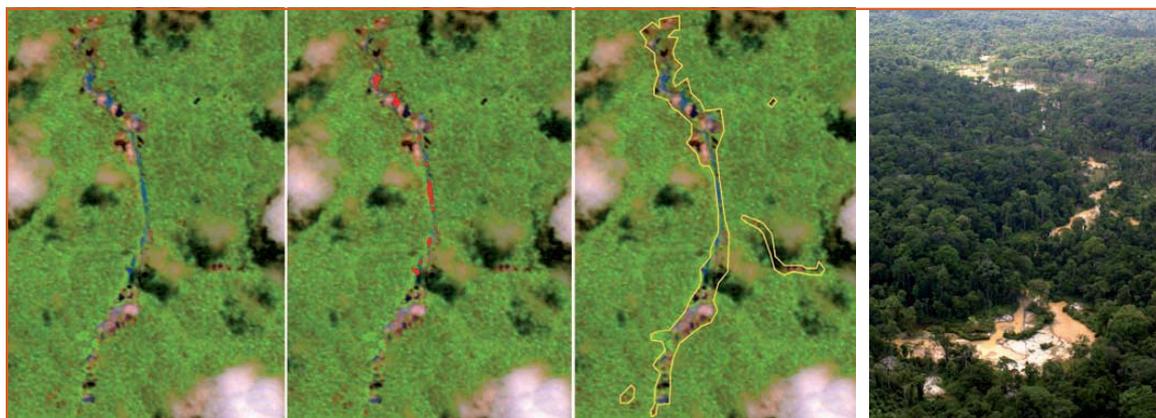
À partir des résultats de cette étude, l'ONF a formalisé deux dispositifs de traitement des images satellites.

Le dispositif d'alerte (figure 3) cible les pollutions des eaux de surface, indicateur précieux qui permet aux services opérationnels de localiser les secteurs actifs. Ce dispositif se décompose en 6 opérations :

- 1. calibration des images SPOT** : les différences d'ensoleillement et d'angles de prise de vue sont corrigées ;
- 2. calcul des indices** d'eau (NDWI) de végétation (NDVI) et de turbidité (NDCI). Ces indices sont construits à partir des canaux fournis par SPOT4 ou 5.
- 3. application des algorithmes de traitement** : il s'agit là de filtres qui vont, pour les 4 canaux et pour les 3 indices,

ne conserver que les pixels répondant aux caractéristiques spectrales de l'objet recherché.

- 4. recomposition du signal** : on ne garde que les pixels communs aux 7 filtres élaborés.
- 5. validation** et nettoyage des artefacts manuellement.
- 6. vectorisation** du résultat pour intégration dans le SIG et transmission aux services partenaires via la plate-forme d'information.



S. Linares

Fig. 3 : le secteur Kwata, traitement de l'image satellite (et vue d'hélicoptère)

À gauche l'image brute, au centre en rouge la mise en évidence des eaux turbides grâce au dispositif d'alerte, à droite en jaune la numérisation des zones déforestées avec le dispositif de suivi.

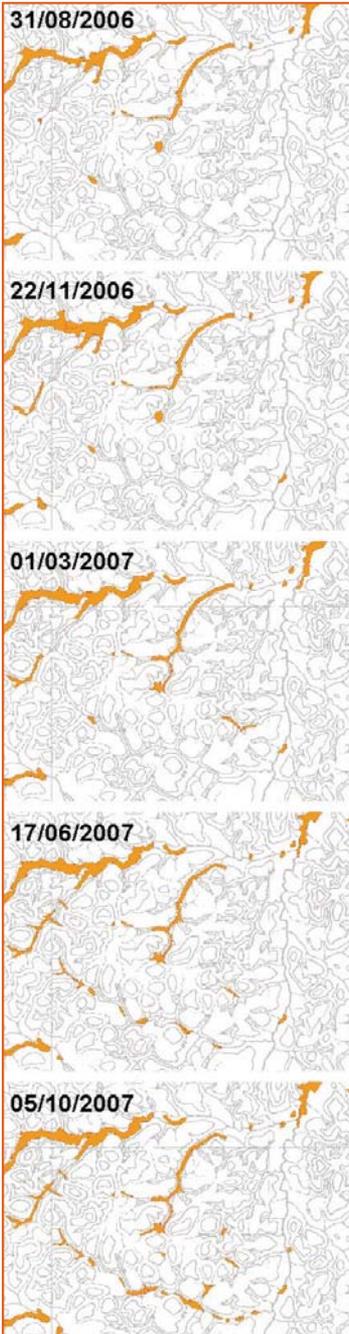


Fig. 4 : observation de la dynamique minière grâce au dispositif de suivi

On voit les dégâts s'étendre et un nouveau front minier s'ouvrir au sud.

Ce traitement a été en partie automatisé grâce au travail fourni par deux jeunes chercheurs de l'université Laval à Québec : Bakary Bafétégué Koné et Serge Olivier Kotchi sous la direction de Valéry Gond.

Le dispositif de suivi (figure 4) cible les déforestations. Le traitement est opéré manuellement et est guidé par les observations faites grâce au dispositif d'alerte. Ce dispositif permet de révéler l'ouverture de nouveaux secteurs.

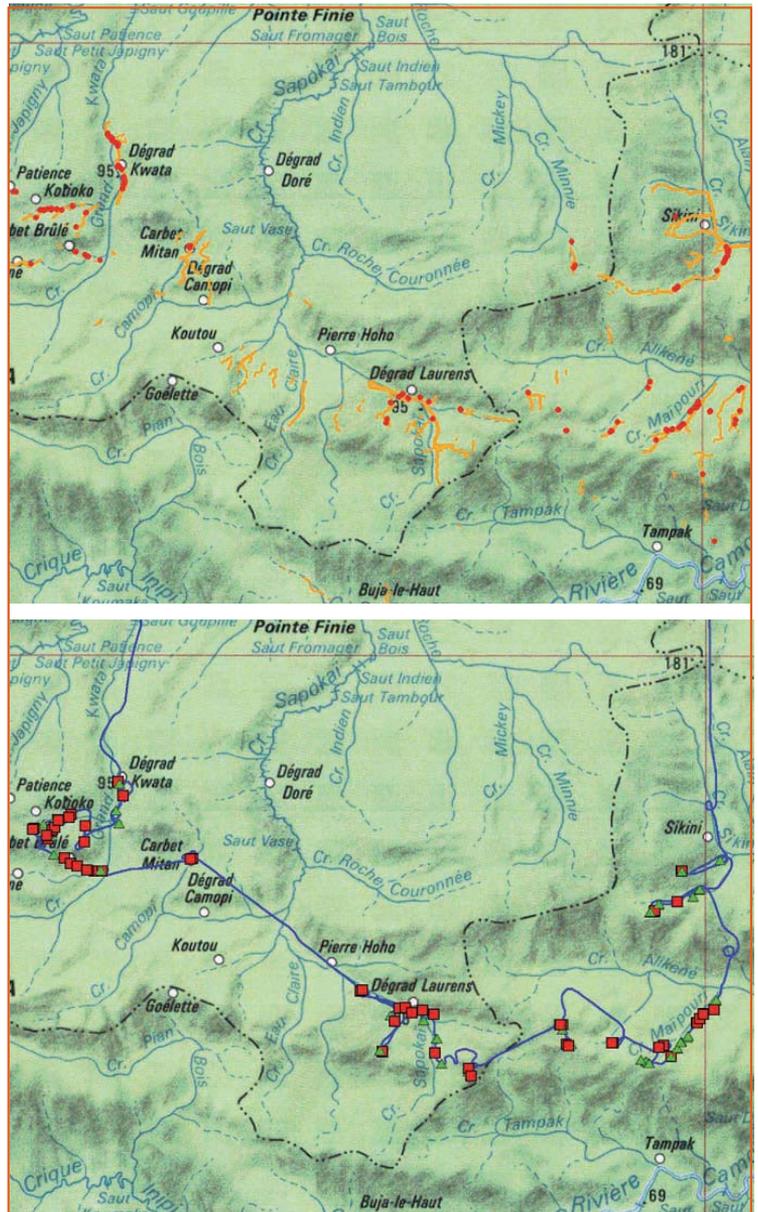


Fig. 5 : validation des détections lors d'une mission hélicoptérée

En haut : résultat des détections réalisées sur 2 images obtenues en septembre et octobre 2007 (orange pour les déforestations, rouge pour les pollutions par matières en suspension).

En bas : résultat des relevés effectués lors d'une mission hélicoptérée de vérification/validation (trajet en bleu) en octobre 2007 : chaque carré rouge est un chantier actif, chaque triangle vert un campement clandestin.

La numérisation se fait à partir des données existantes (issues du « bilan patrimonial » ou des traitements précédents) et s'affine en fonction de l'observation des nouvelles zones déforestées ou en cours de revégétalisation.

Ces deux chaînes de traitement sont désormais parfaitement opérationnelles. La validation a eu lieu à deux reprises lors de missions hélicoptérées qui ont été l'occasion de constater l'efficacité du dispositif mis en place (figure 5). La couverture satellite du département assure une surveillance régulière des secteurs miniers : en 2007 chaque zone a été couverte par SPOT5 en moyenne une quinzaine de fois avec une nébulosité inférieure à 60 %, ce qui assure un renouvellement quasi mensuel des images. C'est pour ce volume de données que nous avons dimensionné nos procédures, sachant que chacune des 24 « scènes » (nom donné aux images SPOT) de 60 km par 60 km, qui assurent la couverture de ces secteurs, nécessite 1 à 2 heures de traitement chaque fois.

L'Observatoire de l'activité minière, un outil de pointe pour agir efficacement

La synergie des partenaires et les capacités d'expertise géomatique de l'ONF reconnues en Guyane ont joué pleinement dans l'aboutissement de cette étude méthodologique.

Aujourd'hui, la Préfecture de Guyane porte ce projet dont elle attend beaucoup et qui est, depuis mars 2008, appliqué à l'ensemble du territoire. L'ONF assure le traitement des images satellite et la mise en œuvre opérationnelle de cet Observatoire de l'activité minière en Guyane. Les effets escomptés ne seront palpables qu'après quelques mois de mise en service effective, mais il est d'ores et déjà certain que les missions de renseigne-



S. Linares

Comme une balafre dans le continuum végétal : un ancien chantier légal dans le secteur Sapokaïa

ment aéroportées cibleront plus sûrement et plus rapidement les sites clandestins ou les confirmeront *a minima*. Cette réactivité nouvelle devrait être particulièrement « payante » dans le traitement des fronts pionniers, des nouveaux secteurs qui s'ouvrent...

Pour autant, tout n'est pas résolu : les enjeux de l'orpaillage sont énormes, complexes et imbriqués. Mais notre ambition est que cet observatoire conserve toutes ses capacités d'adaptation face aux mutations probables de la

dynamique minière dans les années à venir.

Pierre JOUBERT

ONF, DR Guyane

Pôle technique

pierre.joubert@onf.fr

Sébastien LINARES

DIREN Guyane

Cellule SIG

sebastien.linares@guyane.ecologie.gouv.fr

Valéry GOND

CIRAD-Forêt

Chercheur en télédétection spatiale
valery.gond@cirad.fr

Les structures archéologiques et les peuplements de la forêt domaniale de Haye analysés par laser aéroporté

En mars 2007, un avion a survolé la forêt de Haye pour en percevoir, avec une technique révolutionnaire de télédétection laser (LIDAR), les secrets archéologiques et forestiers. L'opération, la plus importante du genre en forêt française, devait aboutir à la réalisation de « la carte du plus grand cadastre gallo-romain connu en Europe » et à des évaluations en matière dendrométrique et de biodiversité. En voici les premiers enseignements, très prometteurs.

L'inventaire des vestiges archéologiques en forêt présente un intérêt patrimonial majeur ne serait-ce que par l'ampleur des surfaces concernées. L'analyse de leur répartition fournit d'autre part une des clés de compréhension du fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers car les anciens usages de ces forêts influencent encore leur fertilité et leur biodiversité actuelles (Dupouey et al., 2002 et 2007).

En Lorraine, un des plus grands parcellaires gallo-romains connus en Europe a été patiemment levé dans la forêt de Haye grâce à une collaboration de longue haleine entre l'INRA, l'ONF et le Service régional de l'archéologie de Lorraine (DRAC). Des campagnes de terrain ont permis d'inventorier les vestiges des parcellaires fossiles sur plus de 6 700 ha. Ils correspondent à des structures agraires (limites de parcelles, terrasses, tas d'épierrement, etc.) mais aussi à des voies, chemins, enclos et habitations, marqués par des dénivelés de quelques dizaines de centimètres. Ils se présentent sur le terrain sous forme de pierriers qui nous restituent un véritable paysage fossilisé (Georges-Leroy et al., 2007).

Mais, fin 2006, ce travail fastidieux de cartographie sur le terrain était encore loin d'être achevé. Certaines parties du massif restaient mal connues car peu accessibles, en particulier les zones endommagées par la tempête de 1999. La précision des levés était moyenne, puisque les sites ont été positionnés à l'aide de techniques classiques (topofil et boussole ou GPS). C'est pourquoi l'ONF, l'INRA et la DRAC se sont associés dans un projet de recherche commun utilisant une nouvelle technique de télédétection par laser aéroporté (LIDAR, voir encadré pour le principe de fonctionnement), avec trois objectifs principaux :

- apprécier les capacités du LIDAR à identifier précisément des structures archéologiques sous forêt et obtenir ainsi une cartographie de l'utilisation ancienne des sols ;
- tester la possibilité d'utiliser le LIDAR pour la mesure de certains paramètres dendrométriques des peuplements, en particulier la hauteur ;
- étudier l'impact de l'utilisation ancienne des sols à l'époque gallo-romaine sur le fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers (selon les résultats des deux premiers objectifs).

Une nouvelle méthode pour scruter les forêts

En décembre 2004, lors du colloque « Forêt, archéologie et environnement », les résultats présentés par Benoît Sittler à partir de données LIDAR laissaient envisager des perspectives de recherche prometteuses. Cette technique avait permis de mettre en évidence des structures agraires (champs bombés) sous une forêt séculaire en Pays de Bade et les clichés publiés montraient clairement des séries de crêtes et de creux parallèles, organisés en parcelles agricoles, invisibles en photographie aérienne (Sittler et Hauger, 2007). En mars 2007, les fonds nécessaires ayant été réunis, un avion équipé d'un LIDAR a survolé la forêt de Haye à basse altitude pendant 2 jours afin de cartographier précisément l'ensemble des vestiges archéologiques et la végétation qui les recouvre (voir encadré).

La zone d'étude correspond aux 112 km² du massif forestier de Haye localisé dans une boucle de la Moselle située en bordure ouest de Nancy (Meurthe-et-Moselle). Le massif est composé essentiellement de feuillus (hêtre-chêne-charmaie principalement). Les

La technique LIDAR

Le laser ou LIDAR (pour Light Detection and Ranging) aéroporté est une technique de télédétection qui permet de modéliser la topographie du sol et de la végétation sous forme d'un nuage de points en 3 dimensions avec une précision d'une dizaine de centimètres.

Le matériel utilisé pour ce projet, de type Leica ALS 20 II, cadencé à 120 kHz, permet d'envoyer 5 à 10 impulsions laser par mètre carré de sol, selon les paramètres du vol. Une partie de ces rayons laser (environ 40 à 75 % selon les caractéristiques du couvert) est interceptée par la végétation (branches, tronc, feuilles, queue d'écureuil...). Le reste atteint le sol. À chaque impact, une partie du signal est réfléctée vers l'avion. L'altitude de chacun de ces impacts peut être déduite du temps de retour du signal et l'intensité de ce signal donne des indications sur les propriétés physiques de l'objet rencontré.

Les données GPS (provenant de stations au sol et de l'avion) et une centrale inertielle embarquée permettent, après trajectographie, de géoréférencer précisément l'ensemble du semis de points.

Un traitement informatique permet de générer, après classification des points, deux modèles numériques, l'un pour la surface du sol (MNT) et l'autre pour la canopée, la différence entre les deux correspondant à la hauteur de la couche de végétation.

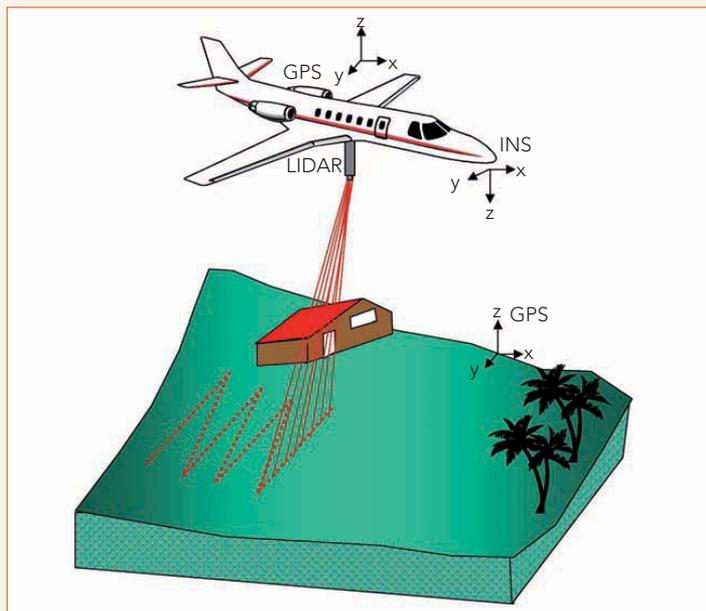


Schéma de la technique LIDAR

Les premiers résultats : des images fascinantes...

Les données nous ont été livrées en septembre 2007 et mars 2008 et déjà les premiers résultats laissent entrevoir des recherches et des applications très prometteuses. Outre des structures déjà connues comme celle du site de hauteur fortifié du 5^e s. av. J.-C., appelé Camp d'Affrique (figure 1), de nouvelles structures inconnues ont été découvertes (figure 2) en particulier dans les zones qui étaient (ou sont encore actuellement) inexploitées en raison d'une régénération dense, d'un terrain accidenté par la tempête, etc.

Assez rapidement, après un gros travail d'interprétation et de vectorisation qui sera réalisé par la DRAC début 2008, nous pourrons établir une cartographie très précise de l'ensemble des vestiges archéologiques présents en forêt de Haye. Un important travail de validation sur le terrain et de classification des structures archéologiques, selon leur usage le plus probable, sera également nécessaire avant de pouvoir disposer d'une cartographie de l'utilisation ancienne des sols à l'époque gallo-romaine.

Grâce à cette cartographie, l'ensemble de ces sites pourra alors être mieux protégé et mis en valeur. La méthode pourra ensuite être transposée pour l'aménagement et la gestion patrimoniale d'autres massifs riches en structures anciennes.

...et des perspectives originales

L'extraction des paramètres forestiers

Le deuxième volet de ce projet, en cours de réalisation, consiste à relier le nuage de points en trois dimensions issu du LIDAR avec les paramètres dendrométriques provenant de différents jeux de données : dispositifs de recherche suivis par l'ONF ou l'INRA, placettes

types de peuplements qu'on y rencontre sont très variés : futaies régulières homogènes (du stade de la régénération au stade de futaies âgées, en passant par les jeunes perchis), anciens taillis-sous-futaie plus ou moins irréguliers, peuplements mités ou complètement rasés par la tempête de 1999, certaines zones restant encore non exploitées à ce jour, dont une réserve biologique intégrale.

La campagne LIDAR a eu lieu en période non feuillée, en mars 2007, afin d'optimiser la pénétration du laser sous couvert et d'obtenir ainsi un modèle numérique de terrain (MNT) précis. En pratique, cette technique permet d'obtenir une image du sol en relief comme si on avait coupé virtuellement tous les arbres de la forêt.

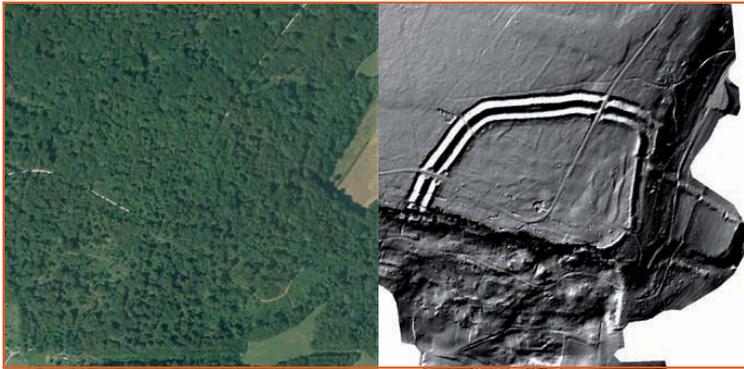


Fig. 1 : photo aérienne (BDOrtho IGN ©) et image issue des données laser révélant le Camp d'Afrique (5^e s. av. J.-C.)

Camp fortifié par un double mur au nord et à l'ouest et protégé par une falaise au sud. Ce vestige, traversé par une route forestière, est situé en forêt de Haye et recouvert d'une forêt dense de hêtres, de charmes et de chênes. Données LIDAR ONF/INRA/DRAC.

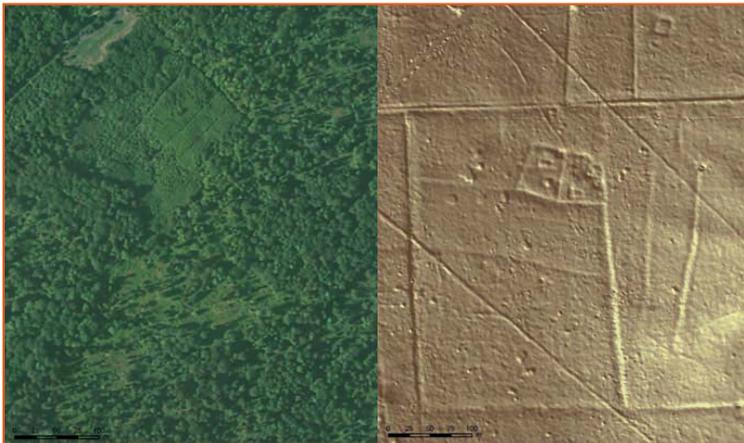


Fig. 2 : photo aérienne (BDOrtho IGN ©) et image issue des données laser révélant les limites d'une ferme gallo-romaine inconnue jusqu'ici

On constate, autour des bâtiments, un double enclos et un réseau de parcelles délimitées par des tas de pierres. Les lignes obliques représentent les limites de parcelle. Données LIDAR ONF/INRA/DRAC.

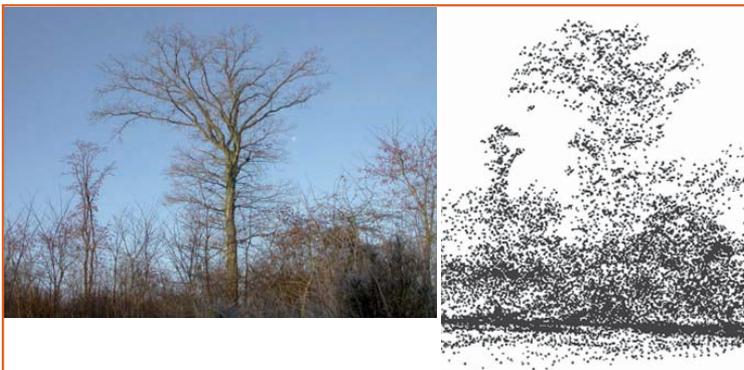


Fig. 3 : chêne isolé, rescapé de la tempête et semis de points 3D provenant des impacts du laser dans la végétation

On distingue le sommet de l'arbre, la structure des branches charpentières, les gourmands, ainsi que la présence d'un sous-étage et d'une strate arbustive dense. Données LIDAR ONF/INRA/DRAC.

d'inventaire relascopique (790 points, soit environ 0,5 point/ha) ou placettes permanentes (290 placettes) installées lors de l'inventaire pour le nouvel aménagement de 2004. Les principales caractéristiques des peuplements y sont connues précisément : hauteur (uniquement pour les dispositifs de recherche), densité, surface terrière, composition, type de peuplement...

Grâce à une analyse spécifique des impacts du laser dans la végétation, on devrait pouvoir disposer d'une cartographie des hauteurs des peuplements sur l'ensemble du massif, une fois pris en compte les effets microtopographiques à l'aide d'algorithmes appropriés. La validation de ces cartes aura lieu en 2008 dans le cadre d'un stage de la Formation Ingénieur Forestier.

Par ailleurs, des collaborations en cours avec l'IGN ou des laboratoires spécialisés dans le traitement physique du signal pourraient permettre d'aboutir à la délimitation automatique des houppiers, et donc au calcul de densité, voire de surface terrière. Même s'il existe des biais (les meilleurs algorithmes n'arrivent pour l'instant à reconnaître qu'environ trois quarts des tiges), les données calculées pourraient être suffisantes pour estimer la surface terrière par grandes catégories de bois et déterminer les types de peuplement. Les premières images sur les arbres isolés, rescapés de la tempête, sont déjà très prometteuses (figure 3).

Un nouveau regard sur l'écologie forestière

Le troisième volet de cette étude, qui débutera fin 2008 si les premiers résultats sont concluants, consistera à étudier l'impact des pratiques agricoles de l'époque gallo-romaine sur le fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers du massif de Haye. Il s'agira d'apprécier dans quelle mesure les activités anthropiques gallo-romaines influencent, 1 600 ans après leur arrêt, la diversité et la fertilité actuelles des écosystèmes forestiers.

Pour cela, une analyse spatiale du modèle numérique de terrain (MNT) indiquant l'utilisation ancienne des sols sera réalisée en relation avec la répartition actuelle de la biodiversité et des potentialités forestières.

L'impact sur la flore sera analysé grâce aux 700 relevés de végétation réalisés par l'INRA dans le cadre de la typologie des stations des Plateaux Calcaires de Lorraine (Becker *et al.*, 1980). Une analyse palynologique, couplée à des datations au carbone 14 de carottes de sédiments prélevées dans le même massif, devrait permettre de reconstruire l'histoire des changements de la végétation ligneuse.

L'effet sur la diversité entomologique actuelle sera analysé en comparant les espèces d'insectes présentes dans l'enclos d'anciennes villas gallo-romaines avec celles présentes dans les zones présumées « anciennement forestières ».

Le croisement entre les cartes de station forestière, de hauteur et d'âge (aménagement) des peuplements devrait permettre d'aboutir à une cartographie de la fertilité des sols du massif de Haye et de l'analyser au regard de l'occupation ancienne des sols.

Conclusion

Cette nouvelle technique de télédétection, qui s'avère d'ores et déjà très puissante pour la cartographie des structures archéologiques sous forêt, pourrait être appliquée à l'ensemble des côtes de Meuse et de Moselle, sur lesquelles les structures sont très abondantes. On pourrait ainsi faire apparaître l'organisation rurale gallo-romaine à une échelle régionale, par une approche profondément originale. Ailleurs en France, des massifs de première importance archéologique pourraient bénéficier de l'apport du laser aéroporté : Tronçais, Brotonne, Rambouillet, Arc-en-Barrois, forêts du Châtillonnais ou sommets vos-

giens, forêt tropicale guyanaise... Sur le plan sylvicole, la mesure automatisée de la hauteur des peuplements, dans des massifs forestiers bien connus en terme d'âge, comme les chênaies du Centre-Ouest par exemple, pourrait permettre d'établir sur de grandes surfaces des cartes précises de fertilité.

Le LIDAR est un outil extraordinaire qui peut nous aider à mieux discerner le passé et l'avenir de nos forêts. Le forestier de terrain doit-il s'effrayer de l'introduction d'une telle technique ? Même si le coût d'acquisition des données peut paraître attrayant au premier abord (5 €/ha dans notre cas), nous pensons que le LIDAR restera complémentaire du travail qualitatif réalisé sur le terrain lors des inventaires. En effet, l'extraction de paramètres forestiers n'est pas triviale et restera encore longtemps du domaine de la recherche. D'autre part, le laser aéroporté qui différencie le chêne sessile du pédonculé, voire du hêtre, ou le chêne de qualité merain ou industrielle n'existe pas encore.

Jérôme BOCK

Pôle R & D

ONF – DT Lorraine

jerome.bock@onf.fr

Jean-Luc DUPOUEY

Équipe Phytoécologie,
INRA-Nancy, Champenoux

Étienne DAMBRINE

Cycles Biogéochimiques
INRA-Nancy, Champenoux

Murielle GEORGES-LEROY

Service régional de l'Archéologie
de Lorraine

Remerciements

Ce projet original, fruit de la rencontre entre forestiers, chercheurs en écologie et archéologues, n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien financier de l'ONF (Département

recherche, DEDD, DT Lorraine), de la DRAC Lorraine, de l'INRA, de la Région Lorraine et de l'Union européenne. Un grand merci également à P. Loué (ONF) et P. Behr (INRA) qui ont patiemment relevé les vestiges archéologiques jusqu'en 2006.

Bibliographie

BECKER M., LE TACON F., TIMBAL J., 1980. Les plateaux calcaires de Lorraine : types de stations et potentialités forestières. Nancy : ENGREF. 268 p.

DUPOUEY J.L., SCIAMA D., LAFITE J.D., GEORGES-LEROY M., DAMBRINE E., 2007. Impact des usages agricoles antiques sur la végétation en forêt de Saint Amont : interaction avec le traitement sylvicole actuel. *In* La mémoire des forêts : actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement », 14-16 décembre 2004. ONF-INRA-DRAC Lorraine, pp. 181-189

DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., LAFITE J.D., MOARES C. 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, vol. 83, n° 11, pp. 2978-2984

GEORGES-LEROY M., LAFFITE J.D., MEYER N., HECKENBENNER D., 2007. L'occupation agricole ancienne dans les forêts lorraines. *In* La mémoire des forêts : actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement », 14-16 décembre 2004. ONF-INRA-DRAC Lorraine, pp. 121-131

SITTLER, B., HAUGER, K. 2007. Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcelles anciens fossilisés par la forêt : l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade. *In* La mémoire des forêts : actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement », 14-16 décembre 2004. ONF-INRA-DRAC Lorraine, pp. 155-161

Dossier



La forêt et la lutte contre le changement climatique

Parlons gaz à effet de serre, changement climatique, séquestration du carbone et rôle de la forêt...

Le « protocole de Kyoto » marque le premier pas d'une véritable gouvernance à l'échelle mondiale de la lutte contre le réchauffement climatique : comment cela fonctionne-t-il ? Quelle est la place du secteur forestier dans le dispositif actuel ? Et dans les négociations en cours ? En quoi la gestion forestière durable contribue-t-elle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Marianne Rubio a coordonné un dossier qui éclaire ces questions complexes mais fondamentales.

- p. 20 Lexique
 - p.21 La lutte contre le réchauffement climatique, du protocole de Kyoto au « facteur 4 »
par Pascal Blanquet et Marianne Rubio
- p. 27 2007 : la forêt au cœur des discussions sur le changement climatique par Marianne Rubio
 - p. 30 Forêt et cycle du carbone par Marianne Rubio
- p. 35 Les forêts, des pompes à carbone efficaces ? par Jean-Luc Peyron
 - p. 41 Forêt, bois énergie, bois matériau et carbone par Clément Chenost et Marianne Rubio
- p. 44 Forêt et carbone : les forestiers s'impliquent par Olivier Picard, Nicolas Robert, Marianne Rubio et Éric Toppan
 - p. 48 ONFI , engagé dans la lutte contre l'effet de serre par Yves-Marie Gardette et Martin Perrier
- p. 52 Les marchés du carbone forestier par Yves-Marie Gardette et Bruno Locatelli

Lexique

Adaptation. Politiques, stratégies, mesures, activités et pratiques adaptatives visant à réduire notre vulnérabilité aux impacts possibles du changement climatique. Les mesures d'adaptation sont les activités qui réduisent au minimum les impacts négatifs du changement climatique ou qui permettent de tirer profit du changement ; elles ne préviennent pas le changement climatique. Ces mesures peuvent être prises avant l'observation d'impacts (mesures préventives), ou après leur apparition (mesures correctives).

Atténuation. Politiques, stratégies, mesures, activités et pratiques visant à atténuer les changements climatiques. Des mesures d'atténuation sont nécessaires pour réduire le rythme et l'ampleur du changement climatique à l'échelle planétaire. Le dernier rapport du GIEC présente aux décideurs les différentes options possibles de réduction d'émissions dans les principaux secteurs économiques, à court, moyen et long termes, et précise leurs impacts et leurs coûts.

CCNUCC. La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (**UNFCCC** en anglais : *United Nations Framework Convention on Climate Change*) adoptée à Rio en juin 1992 avait été arrêtée le 9 mai 1992 à New York. L'objectif de la **Convention**, dite aussi **convention Climat**, est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute « perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (art. 2). Les membres de la convention se réunissent lors des COP (*Conference Of the Parties*).

CITEPA. Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique, le CITEPA a été créé en 1961 avec un statut d'association (loi 1901). Il réalise sous contrat avec le ministère de l'Environnement un inventaire annuel des émissions de gaz à effet de serre en France.

eqCO₂. Le CO₂ n'est pas le seul gaz à contribuer à l'effet de serre, mais c'est le principal ; les autres gaz sont donc exprimés en « équivalent CO₂ » selon leur pouvoir réchauffant.

COP/MOP. L'organe suprême du protocole de Kyoto est la réunion des Parties (MOP). Par souci de simplification, les conférences des parties à la convention UNFCCC (COP) serviront également de réunion des Parties au Protocole (MOP), sous le nom de COP/MOP.

GES. Les Gaz à Effet de Serre absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, d'où augmentation de la chaleur. Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le GIEC parmi lesquels figurent : la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ozone (O₃), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

GIEC. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (**IPPC** en anglais) est composé d'environ 2 500 scientifiques travaillant sur la question des changements climatiques et publie de nombreuses études démontrant, notamment, qu'il y a une influence perceptible de l'activité humaine sur le climat global.

Gt ; Mt. Gt = Giga tonnes (milliard de tonnes) de carbone (GtC) ou de CO₂ (GtCO₂) ou d'équivalent CO₂ (Gt eqCO₂) ; Mt = Méga tonnes (million de tonnes).

MDP. Le Mécanisme de Développement Propre permet à un pays industrialisé de financer des projets permettant de réduire dans un pays du Sud ses émissions de GES. En contrepartie, l'investisseur obtient des crédits d'émissions.

MIES. Créée en 1992, la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre est désormais placée sous l'autorité du Ministre de l'Écologie et du Développement Durable. Son rôle est essentiellement de préparer les positions que la France doit défendre au niveau international, de présenter ses positions dans les réunions d'experts gouvernementaux, d'identifier les mesures propres à permettre à notre pays d'atteindre ses objectifs et de suivre de leur mise en œuvre.

MOC. Le système de Mise en Œuvre Conjointe est très similaire à celui du MDP. Il s'applique aux pays développés ayant pris des objectifs chiffrés dans le cadre du protocole de Kyoto (pays industrialisés).

Partie. Un État (ou une organisation d'intégration économique régionale, comme la Communauté économique européenne) qui accepte d'être lié par un traité et pour lequel ce traité est en vigueur.

Protocole de Kyoto. En décembre 1997, à l'issue de la troisième réunion des Parties (COP 3) à la convention de Rio, 38 pays industrialisés se sont engagés à réduire les émissions de six gaz à effet de serre : CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. Ils se sont engagés sur une réduction de leurs émissions des six principaux gaz à effet de serre de 5,2 % en moyenne entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990.

PNAQ. Le Plan National d'Allocation des Quotas est la quantité de tonnes de CO₂ que sont autorisées à émettre les entreprises de chaque état membre de l'Union européenne.

Ratification. Après qu'un pays a signé, soit la Convention, soit le Protocole, il doit le ratifier, souvent avec l'approbation de son parlement ou d'un autre organe législatif. L'instrument de ratification doit être déposé auprès du dépositaire (dans le cas présent, le Secrétaire général des Nations Unies) afin que démarre le compte à rebours des 90 jours qui feront de lui une Partie.

UE. L'Union Européenne, en tant qu'organisation d'intégration économique régionale, peut être (est effectivement) Partie à la Convention, sans disposer d'un droit de vote distinct de celui de chacun de ses États membres. Elle peut également être Partie au Protocole. Puisqu'elle a signé la Convention alors qu'elle était encore la Communauté économique européenne (CEE), cette dénomination reste utilisée officiellement pour tous les aspects formels de la Convention. Elle compte 15 États membres (ceux de 1992).

UTCf. Utilisation des Terres, Changement d'affectation des terres et Foresterie (**LULUCF** en anglais – *Land Use, Land Use Change and Forestry*) : on désigne ainsi le secteur de l'utilisation des terres, incluant notamment la forêt, dans le cadre de la convention Climat et dans les guides du GIEC.

La lutte contre le réchauffement climatique, du protocole de Kyoto au « facteur 4 »

Le protocole de Kyoto marque le premier pas d'une véritable gouvernance à l'échelle mondiale de la lutte contre le réchauffement climatique. Signé en 1997, mais ratifié seulement en 2005, il repose sur des engagements juridiquement contraignants de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour 39 pays développés ou en transition, sur la période 2008-2012. Sous l'impulsion de la Commission, l'Union européenne a innové pour atteindre les objectifs fixés par le protocole de Kyoto, en mettant en place, dès 2005, un système européen d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre.

De nombreux événements météorologiques récents relatés par l'Organisation météorologique mondiale ont malheureusement illustré la pertinence des prévisions données par le GIEC (Groupe d'experts Inter gouvernemental sur l'Évolution du Climat). La question n'est plus de savoir s'il y aura ou pas réchauffement de la planète, mais d'évaluer son intensité. Afin de limiter l'aggravation de ces phénomènes et les efforts d'adaptation, notamment dans les pays en développement, les émissions globales de gaz à effet de serre (GES) doivent être réduites de façon importante dans les décennies à venir.

Le problème étant posé, reste à y apporter les réponses à l'échelle adéquate. Une étape importante a été franchie en 1997 avec la mise en place du protocole de Kyoto sur la limitation des émissions de gaz à effet de serre.

De Rio à Kyoto

En 1992, lors du Sommet de la Terre à Rio, 150 États ont signé la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques

(CCNUCC) dont l'article 2 stipule que les signataires s'engagent à « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».

L'article 3 de la Convention contient les prémices de ce qui a été décidé par la suite à la Conférence de Kyoto : « [...] Les politiques et mesures qu'appellent les changements climatiques requièrent un bon rapport coût efficacité, de manière à garantir des avantages globaux au coût le plus bas possible. Pour atteindre ce but, il convient que ces politiques et mesures [...] s'étendent à toutes les sources et à tous les puits et réservoirs de gaz à effet de serre qu'il conviendra [...] ».

Cette convention trouvera son application cinq ans plus tard avec la signature du protocole de Kyoto, premier instrument multilatéral basé sur une approche économique, puis son entrée en vigueur le 16 février 2005 après sa ratification par 55 pays industrialisés représentant au moins 55 % des émissions de CO₂. Les

États-Unis, jusqu'à présent premier émetteur mondial de gaz à effet de serre, ont cependant refusé de ratifier le protocole de Kyoto.

Les pays développés et en transition signataires du protocole de Kyoto se sont mis d'accord sur la réduction globale de 5,2 % des émissions des six principaux GES entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990 (tableau 1). En 2004, les émissions de ces pays, listés à l'annexe B du protocole de Kyoto, étaient inférieures de 3,3 % au niveau de 1990 (4,9 % en tenant compte du changement d'utilisation des terres et de la forêt). Cette évolution (figure 1) n'est toutefois pas totalement imputable à la mise en œuvre du protocole de Kyoto : elle provient notamment de l'effondrement des émissions des pays d'Europe de l'Est à la suite des restructurations industrielles du début des années 1990.

Les États membres de l'Union européenne se sont réparti l'effort par un accord interne dit « accord de bulle ». Selon les termes de cet accord, la France a un objectif de stabilisation (+0%) de ses émissions entre 1990 et la période 2008-2012.

Parties	Engagement de réduction d'émissions de GES	Part des émissions dans les pays de l'annexe B du protocole de Kyoto
Union européenne	- 8 %	24 %
Japon	- 6 %	8,5 %
Canada	- 6 %	3 %
Russie	- 0 %	17 %
USA (n'ayant pas ratifié)	- 7 %	36 %
Total	- 5,2 %	

Tab. 1 : engagement de réduction des émissions de gaz à effet de serre des pays signataires au protocole de Kyoto

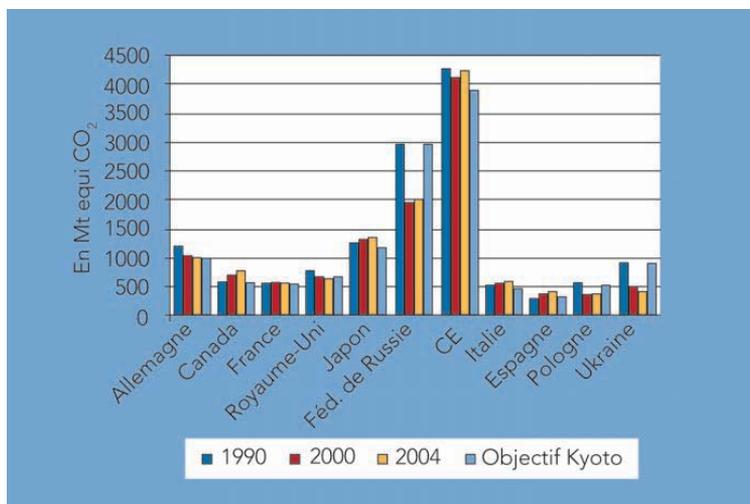


Fig. 1 : évolution des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2004

Les trois mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto

Afin d'atteindre l'objectif de réduction des gaz à effet de serre, le protocole de Kyoto prévoit pour les pays industrialisés qui ont une obligation de résultats, des mécanismes dits de « flexibilité » applicables à partir de 2008. Ils ne se substituent pas aux mesures que les États doivent prendre pour respecter leurs engagements, mais ils sont destinés à en faciliter la réalisation. Trois instruments sont prévus dans le protocole :

Les permis d'émission : ils permettent de vendre ou d'acheter sur un marché des droits à émettre entre pays industrialisés.

La mise en œuvre conjointe (MOC) : ce mécanisme permet à des pays industrialisés d'obtenir des crédits carbone en investissant dans des projets de réduction d'émission ou de séquestration dans d'autres pays industrialisés.

Le mécanisme pour le développement propre (MDP) : ce mécanisme permet à des pays industrialisés qui financent des projets de réduction d'émission ou de séquestration de GES dans des pays en développement d'obtenir des crédits carbone.

L'engagement de Kyoto est assorti d'un certain nombre de règles comptables et juridiques déterminant une allocation initiale de quotas d'émissions entre les pays de l'annexe B et mettant en place un marché mondial d'échanges de quotas entre États et entre acteurs privés. Parmi ces règles figurent notamment les mécanismes de flexibilité (voir encadré). L'atmosphère étant pareillement impactée quel que soit le lieu des émissions ou des absorptions, le protocole prévoit ces mécanismes pour gagner en souplesse et optimiser les coûts des actions menées, en particulier via la réalisation de projets de compensation d'émissions, qui peuvent se tenir dans les pays de l'annexe B ou dans les pays en voie de développement (voir figure 2).

La forêt dans le protocole de Kyoto et les limites du système actuel

La forêt participe dans des proportions très significatives au bilan des échanges GES au niveau planétaire : bien qu'il subsiste de nombreuses incertitudes scientifiques, il est admis qu'elle fixerait autour de 0,7 Gt de carbone par an. Malgré cela, la prise en compte de la forêt dans le protocole de Kyoto est limitée. En effet, la solution retenue à Kyoto pour traiter ce secteur est avant tout le résultat d'une négociation politique qui s'est déroulée dans un contexte difficile où certains pays annexe B cherchaient à relever le plafond national d'émission qui leur avait été fixé dans le protocole grâce à l'inclusion de la forêt. Certains pays forestiers se sont prononcés contre l'inclusion de la forêt pour des raisons d'indépendance nationale : ils craignaient l'apparition d'un droit d'ingérence dans leurs politiques d'usage des sols. Le résultat final de ces discussions a abouti à un système complexe, différencié entre pays industrialisés et pays en développement signataires du protocole (voir encadré).

Les règles établies pour la forêt par les pays signataires limitent la mise

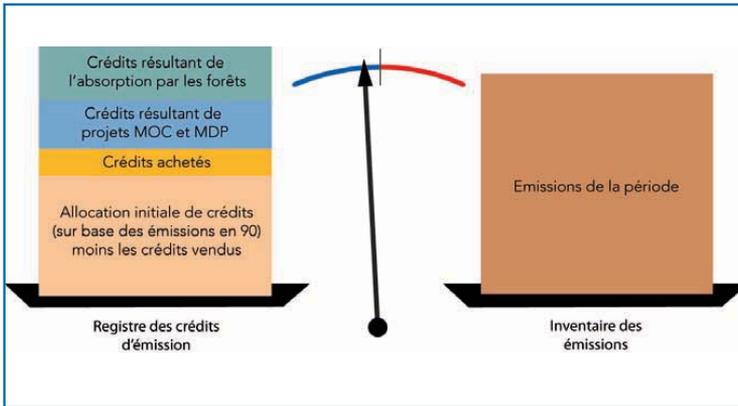
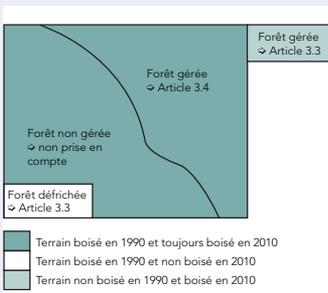


Fig. 2 : balance entre le résultat de l'inventaire GES et les crédits inscrits dans le registre national

La prise en compte de la forêt dans le protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto reconnaît l'importance de la forêt dans la lutte contre le changement climatique, tant via le processus de séquestration (dans la biomasse et dans les sols) que de substitution (neutralité de l'énergie bois vis-à-vis de l'atmosphère).

La forêt est traitée en tant que « secteur », au même titre que l'énergie, l'industrie, les transports... Les pays industrialisés doivent comptabiliser au travers de l'article 3.3 du protocole de Kyoto les émissions et les absorptions de gaz à effet de serre (GES) résultant de « changements d'utilisation des terres » (défrichements de terres forestières ou boisements de terres non forestières, l'année de référence étant dans les deux cas 1990).



Les pays industrialisés peuvent inclure dans le champ d'application du protocole de Kyoto article 3.4 l'activité « gestion forestière », c'est-à-dire le résultat d'opérations sylvicoles menées sur les terres forestières n'ayant pas changé d'usage depuis 1990, et considérées comme étant des forêts gérées. Si le bilan net des flux de GES sur les forêts gérées correspond à une absorption nette, le pays concerné peut alors disposer de l'équivalent en crédits carbone des tonnes de CO₂ fixées, à concurrence d'un plafond maximal (15 % des absorptions totales estimées pour les forêts gérées) qui, pour la France, a été fixé à 3,2 Mt eqCO₂ par an.

Les pays en voie de développement ne sont pas contraints par le protocole de Kyoto à réaliser un inventaire GES pour le secteur forestier comme pour tous les autres secteurs.

Les pays en voie de développement ne sont pas contraints par le protocole de Kyoto à réaliser un inventaire GES pour le secteur forestier comme pour tous les autres secteurs.

en œuvre de projets concrets. Ainsi, seuls les projets de boisement/reboisement sont autorisés au titre du MDP dans les pays en développement pour l'instant. Par ailleurs, le système actuel présente des lacunes importantes. Il ne permet pas de prendre en compte l'effet de séquestration du carbone dans les matériaux bois (filière aval) et ne traite pas de la question de la lutte contre la déforestation, source de 20 % des émissions de GES dans le monde. Ces questions sont en cours de discussion dans le cadre de l'élaboration du système international qui sera mis en place en 2012, soit après la première période d'engagement « Kyoto ».

Préparer l'après 2012

Le protocole de Kyoto connaît deux limites majeures : les objectifs qu'il fixe ne s'appliquent pour l'instant qu'à la période 2008-2012 (ce qui est trop court pour influencer durablement sur les choix d'investissement) et les engagements contraignants du protocole ne portent aujourd'hui que sur un tiers environ des émissions mondiales de GES¹. En effet, la Chine, le Brésil, l'Inde et l'Afrique du Sud (24 % des émissions mondiales) ont certes ratifié le protocole, mais n'ont pas pris d'engagements de maîtrise de leurs émissions dans ce cadre.

Lors de la Conférence de Montréal sur le climat, fin 2005, les pays ayant ratifié le Protocole ont décidé de négocier son prolongement au-delà de 2012. L'objectif est de rallier, dans le cadre de ce système post 2012, des pays tels que les États-Unis qui n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto, bien qu'ils soient un important émetteur de CO₂. Les membres du G8 – qui représentent à eux seuls 40 % des émissions totales de GES de la planète – réunis à Heiligendamm en juin 2007 ont reconnu que leurs émissions devaient « cesser d'augmenter et ensuite être réduites de façon substantielle ».

¹ Source : DGTPE, Direction générale du Trésor et de la politique économique, au ministère de l'Économie et des Finances - reconstitution à partir des statistiques du World Resources Institute. Année 2003, seul CO₂, secteur forêt exclu.

Selon l'Union européenne, pour maîtriser l'effet de serre de manière à limiter l'élévation des températures à 2 °C, il conviendrait de diviser par plus de deux les émissions globales. Cela se traduit, compte tenu des écarts dans les émissions par habitant, par une division par 3 à 5 des émissions des pays industrialisés d'ici la moitié de ce siècle. Étant donné la croissance prévisible des demandes énergétiques dans les pays en développement, les seules substitutions énergétiques ne permettraient sans doute que de stabiliser les émissions mondiales au niveau actuel. La priorité doit porter sur la réduction des émissions des GES, mais toutes les voies de réduction et de stockage doivent être explorées. Le rapport Stern, publié fin 2006, estime que les écosystèmes terrestres, via notamment la réduction des émissions dues à la déforestation, pourraient fournir 15 % à 30 % des réductions d'émissions nécessaires pour contenir d'ici 2050 une hausse de température sous un seuil de + 3 °C.

L'UE se veut exemplaire pour appliquer le protocole de Kyoto

L'Union Européenne cherche à occuper un rôle moteur dans la lutte contre le réchauffement climatique. Exemplaire par les objectifs de réduction d'émissions qu'elle s'est assignés, elle a fait preuve d'innovation en mettant en place un système d'échange de droits d'émission de CO₂ dès le 1^{er} janvier 2005, soit trois ans avant la date prévue par le protocole de Kyoto pour l'ensemble des pays qui l'ont ratifié.

Le protocole de Kyoto engage quinze pays de l'Union européenne à réduire collectivement leurs émissions de GES de 8 % en 2012 par rapport à 1990 (il s'agit des pays de l'UE à 15, avant l'élargissement de 2004). En 2004, ces pays ont émis près de 4,3 Gt eqCO₂, en baisse de 0,9 % seulement par rapport à 1990. Le chemin à parcourir reste impor-

tant. Une telle réduction serait d'autant plus dure pour d'autres pays comme les États-Unis qui, pour l'instant, n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto, et ont vu leurs émissions augmenter de 15,8 % depuis 1990 (soit plus de 7 Gt en 2004).

Le volontarisme de l'Union européenne – et principalement de la Commission – ne s'arrête pas là : l'UE a pris début mars 2007 l'engagement de réduire les émissions de GES d'au moins 20 % d'ici à 2020. Suivant le résultat des négociations internationales, cet objectif pourrait être porté à 30 %. L'UE souhaite en effet, via ces objectifs, maîtriser l'augmentation de la température moyenne globale en dessous de 2 °C.

La création d'un marché européen d'échange de crédits d'émission

Depuis 2005, chaque État européen établit un plan national de quotas (PNAQ) à affecter aux exploitants concernés, notamment : producteurs d'énergie, raffineries de pétrole, sidérurgie, cimentiers, papetiers, producteurs de verre... Une fois ces quotas crédités, les bénéficiaires, en fonction de leur utilisation, peuvent en vendre ou en acheter à d'autres exploitants (cf. directive 2003/87 sur le système d'échange de quotas d'émissions de GES). Actuellement, 12 000 entreprises européennes sont soumises au système des droits d'émission.

Cependant, les secteurs agricole et forestier ne sont pas inclus dans le système d'échange de quotas européens. La directive n°2004/101/CE dite « Linking Directive » exclut ces secteurs des mécanismes de projet (MDP et MOC) sur le marché européen. De ce fait, les entreprises européennes qui participent au système d'échange de quotas ne peuvent pas obtenir des « crédits puits de carbone » grâce, par exemple, à des projets de boisement dans les pays en voie de développement.

Un prix de la tonne de carbone stabilisé après un effondrement en 2006

En plafonnant les droits d'émission, l'Union européenne espérait créer un marché d'échange de quotas à un prix suffisamment élevé pour encourager les entreprises à investir dans des technologies plus performantes ou à recourir à des sources d'énergie rejetant moins de CO₂. Pour la période 2005-2008, les États ont eu tendance à surévaluer les besoins des entreprises et le cours du CO₂, qui avait atteint 30 € la tonne au printemps 2006, est tombé à moins de 1 € en 2007, perdant tout effet dissuasif (figure 3). La Commission, tirant les leçons de cette première expérience, a demandé aux États de resserrer leur plan national d'allocation des quotas pour 2008-2012, période où entrera en vigueur un système semblable d'échange entre les pays ayant ratifié le protocole de Kyoto.

Malgré ses imperfections, le dispositif communautaire aura eu le mérite d'ouvrir la voie et d'apporter les premiers enseignements nécessaires à la réalisation des objectifs de Kyoto.

La France face au défi du changement climatique : le « facteur 4 »

La France s'est engagée, au travers du protocole de Kyoto, à stabiliser son niveau d'émission de gaz à effet de serre par rapport à celui de 1990, soit 564 millions de tonnes équivalent CO₂/an, sur la période 2008-2012 (répartition adoptée lors du Conseil des ministres de l'environnement de l'Union européenne du 18 juin 1998).

Sur le plus long terme, l'objectif de stabilisation des températures sur le plan mondial implique un effort très conséquent de la part des pays industrialisés. En France, la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique du 13 juillet 2005 détermine comme

L'atout forêts

Le secteur de la forêt est un atout supplémentaire de l'Union européenne pour atteindre ses objectifs : la superficie forestière de l'UE a atteint 140 millions d'hectares en 2005 (37,8 % du territoire), avec une augmentation de 700 000 ha/an (en France : +40 000 ha/an). Les forêts européennes fixent annuellement autour de 400 Mt eqCO₂. Le plan d'action de l'UE pour les forêts présenté en juin 2006 ne manque pas de souligner la nécessité d'utiliser les ressources forestières pour la production d'énergie et le rôle des forêts dans la séquestration de carbone. La consommation d'énergie est en effet responsable à elle seule de 80 % des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE.

La forêt française est un stock de près de 2,5 Gt de carbone en métro-



Fig. 3 : évolution du prix de la tonne de CO₂ sur le marché européen

(Source : Point Carbon)

Prix spot = prix de la tonne de CO₂ sur le marché européen au moment considéré

Prix futurs déc 08 = prix payé pour de la tonne de CO₂ qui sera disponible réellement sur le marché européen en décembre 2008

objectif la division par 4 des émissions nationales. Le rapport du Groupe « Facteur 4 » (voir encadré), paru en août 2006, souligne le fait que « si le défi est difficile, il n'en est pas moins atteignable, à condition de se mobiliser à tous les niveaux ».

Par rapport aux mesures déjà prises avant la conférence de Kyoto et qui se limitaient à l'horizon 2000, les engagements du Protocole exigent de nouvelles mesures sur le territoire français. Le Plan climat, réactualisé en 2006, vise à permettre le respect par la France de ses engagements dans le cadre du protocole de Kyoto. Il regroupe des actions dans tous les secteurs de l'économie et de la vie quotidienne des Français. Les évolutions des émissions par secteur d'activité sont variables : alors que les émissions liées au transport augmentent (+23% entre 1990 et 2005), les émissions industrielles diminuent (figure 4). Dans le domaine de la forêt, sont inscrites dans le Plan climat certaines orientations concernant la promotion du bois-énergie (ADEME), du bois-construction (affichage de la part de bois utilisée dans les nouvelles constructions, accord cadre bois construction environnement 2001...) et la mise en

place de projets domestiques puits de carbone.

Le Facteur 4

Extrait du Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 » sous la présidence de Christian de Boissieu – Août 2006 :

« Le Facteur 4 est un concept introduit par Ernst Ulrich von Weizsäcker (fondateur de l'Institut Wuppertal pour le Climat, l'Environnement et l'Énergie), Amory B. Hunter et L. Hunter Lovins (de l'Institut Rocky Mountain) dans un rapport au Club de Rome, publié en 1997. Il préconise de multiplier par deux le bien-être en divisant par deux l'utilisation des ressources naturelles. À l'origine il s'agit donc d'un concept qui s'applique à un champ plus large que les émissions de GES et qui concerne un objectif relatif (contenu du PIB en ressources naturelles). L'expression a été ensuite reprise dans le cas des émissions de GES. En retenant des hypothèses simplifiées et en se limitant au CO₂, le raisonnement est le suivant :

- selon le GIEC rapport 2001, pour une stabilisation de la concentration atmosphérique en CO₂ à 450 ppm, la croissance de la température s'établirait dans une fourchette comprise entre 1,5 et 3,9 °C. Autrement dit, la probabilité pour qu'on reste en dessous de 2 °C pour une concentration de 450 ppm est largement inférieure à 50 %. Cet objectif de 450 ppm est sans doute le plus bas qu'on puisse se fixer puisque nous sommes aujourd'hui à 382 ppm avec une croissance proche de 2 ppm par an qui ne s'atténuerait que progressivement, même si nous supprimions toute émission ;

- pour stabiliser à 450 ppm, il faut avoir réduit les émissions annuelles en 2050 à 4 Gt de carbone, soit, pour une population actuelle de 6,5 milliards d'habitants, 0,6 t de carbone par habitant et par an. La France, avec 61 millions d'habitants, à 38 Mt de carbone, c'est-à-dire une division par quatre par rapport à ses émissions actuelles (140 Mt C). »

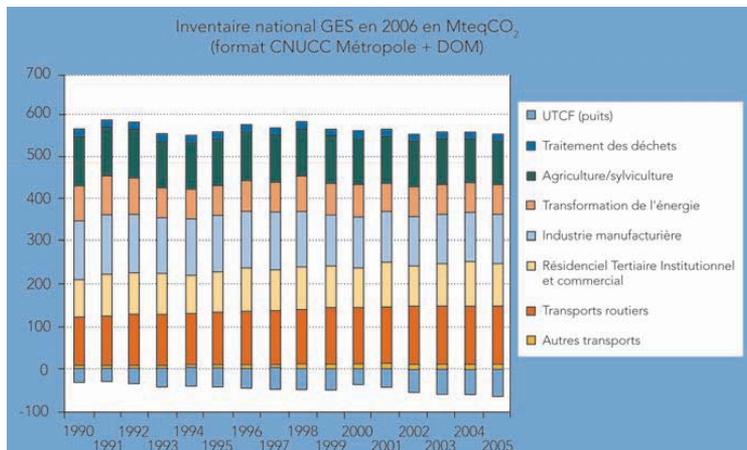


Fig. 4 : répartition par secteur d'activité des émissions de gaz à effet de serre nationales

(Source MIES - http://www.effet-de-serre.gouv.fr/part_et_evolution_des_secteurs)

pole, soit presque 9 Gt eqCO₂. Elle fixe environ 65 Mt eqCO₂ par an d'après l'inventaire réalisé par le CITEPA en 2005, soit environ 12 % des émissions nationales. Elle représente de ce fait un puits de carbone majeur à l'échelle nationale.

Bien que la forêt subisse en première ligne l'impact des changements climatiques (sécheresse, incendie, insectes ravageurs...), son rôle important dans le cadre de la lutte contre le changement climatique n'a pas manqué d'être souligné dans l'article 43 de la loi d'orientation agricole du 5 janvier 2006 : « La gestion forestière et la valorisation des produits forestiers contribuent à la réduction des émissions nationales de gaz à effet de serre et au développement des énergies renouvelables. À ce titre, elles ont vocation à participer aux mécanismes de marché destinés à honorer les engagements internationaux en la matière ».

Pour conclure

La prise en compte tardive de la forêt dans le dispositif de lutte contre le réchauffement climatique s'est révélée être complexe. Cependant des avancées conséquentes se sont pro-

duites depuis 1997, tant au niveau de l'appréhension scientifique des phénomènes, des méthodologies de comptabilisation des flux de carbone, que de l'invention de solutions techniques pour prendre en compte les spécificités de la séquestration biologique dans le marché du carbone. Le stockage du carbone par la forêt et les produits bois sont devenus progressivement l'un des grands enjeux des négociations internationales sur la lutte contre le changement climatique.

Pascal BLANQUET

Chargé de mission puits forêt et océan
D4E – Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement durable

Marianne RUBIO

Chargée de mission effet de serre
ONF — DEDD

Bibliographie

Nations Unies, 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. <en ligne : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>>

Nations Unies, 1997. Protocole de Kyoto à la convention-cadre des

Nations Unies sur les changements climatiques. <en ligne : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>>

Nations Unies, 2001. Accords de Marrakech <en ligne : <http://unfccc.int/resource/docs/frnch/cop7/cp713a01f.pdf>>

IPCC, 2007. IPCC Fourth assessment report : climate change 2007. <en ligne : <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>>

GIEC, 2000. Rapport Spécial sur l'utilisation des terres, les changements d'utilisation des terres et la foresterie <Résumé à l'intention des décideurs en ligne : <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-fr.pdf>>

MIES, 2006. Face au changement climatique, agissons ensemble : Actualisation 2006 du Plan Climat 2004-2012. 68 p. <en ligne : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Panclimataactualise.pdf>>

PIGNARD et al., 2006. Estimation des stocks et des flux de carbone dans la biomasse des forêts françaises à partir des données de l'IFN. In Loustau D. et al. (eds.), Rapport final du projet Carbofor « Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France : quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles », pp. 62-73 <en ligne : <http://medias.obs-mip.fr/gicc/interface/projet.php?%2F01>>

ONF, 2002. Forêt et changement climatique : l'essentiel en 20 pages. Paris : ONF. 20 p.

VON WEIZSÄCKER E., HUNTER A.B., LOVINS L.H., 1997. Factor 4: Doubling wealth, halving resource use: A report to the Club of Rome. Londres : Earthscan. 224 p.

2007 : la forêt au cœur des discussions sur le changement climatique

L'actualité 2007 a été particulièrement dense sur le thème de la forêt et du changement climatique : la forêt a été en effet l'un des points forts des conclusions du rapport 2007 du GIEC, puis a occupé le devant de la scène lors de la conférence internationale sur le climat en décembre à Bali.

Les conclusions sans appel du GIEC

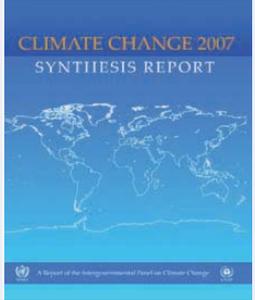
Après six années de travail, auxquelles ont participé plus de 2 500 scientifiques internationaux, le quatrième rapport de synthèse du GIEC (Groupe d'experts Inter gouvernemental sur l'Évolution du Climat) a été validé le 16 novembre 2007 (encadré ; voir aussi figure 1). Le GIEC, en reconnaissance des travaux effectués, a partagé en octobre le prix Nobel de la paix 2007 avec l'Américain Al Gore.

Ce quatrième rapport du GIEC insiste sur le fait que ni l'adaptation seule ni l'atténuation seule ne permettront d'éviter la totalité des impacts du changement climatique. Cependant, elles peuvent se compléter et réduire significativement, ensemble, les risques associés au changement climatique. Il souligne aussi que le développement durable et la réduction de la pauvreté peuvent aider les sociétés à réduire leur vulnérabilité, même si le changement climatique lui-même peut devenir un obstacle au développement.

Pour contenir l'augmentation de température autour de 2 degrés d'ici la fin du siècle, les experts estiment que les émissions mondiales passeraient par un maximum vers 2015 pour décroître ensuite (réduction entre 50 et 85 % d'ici 2050). Les impacts du changement climatique entraîneront des coûts annuels nets croissants avec le temps au fur et à mesure que la

En bref les points clés du quatrième rapport du GIEC

- Augmentation de 70 % entre 1970 et 2004 des émissions globales de gaz à effet de serre (GES)
- Concentration de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère : 379 ppm en 2005 contre 280 ppm avant l'ère industrielle
- Augmentation de température : + 0,74 °C en moyenne globale sur 100 ans
- Nécessité de combiner adaptation et atténuation
- Nécessité de combiner les différents secteurs d'activité
- Les efforts et investissements au cours des deux ou trois prochaines décennies sont décisifs



CLIMATE CHANGE 2007
SYNTHESIS REPORT
A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

température globale augmentera. Les niveaux de stabilisation prévus pourraient être atteints par le déploiement d'un éventail de technologies. Dans plusieurs secteurs, les options de réponses au changement climatique peuvent être mises en œuvre de façon à réaliser des synergies et à éviter des

conflits avec d'autres dimensions du développement durable.

Les experts du GIEC ont mis en avant le fait que « les activités d'atténuation dans le secteur forestier peuvent réduire considérablement les émissions des sources et augmenter l'absorption du CO₂ par les puits pour

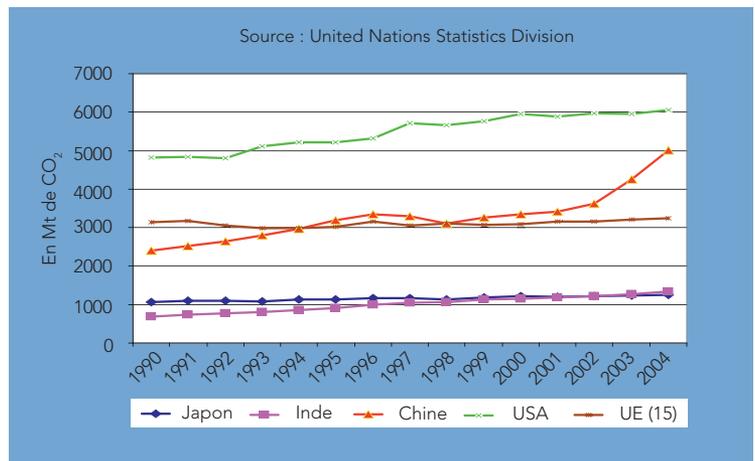


Fig. 1 : évolution des émissions de CO₂ entre 1990 et 2005

Pratiques et technologies d'atténuation disponibles et commercialisées	Politiques, mesures et instruments démontrés comme efficaces du point de vue environnemental	Contraintes et opportunités importantes
<p>Actuellement : afforestation, reforestation, gestion forestière ; réduction de la déforestation ; gestion des produits issus de la récolte du bois ; utilisation des produits forestiers pour la bioénergie pour remplacer l'usage des combustibles fossiles.</p> <p>En projet à l'horizon 2030 : amélioration des essences d'arbres pour améliorer la productivité et le captage du carbone. Amélioration des techniques de détection pour l'analyse des potentiels de séquestration de la végétation et des sols et pour la localisation des changements d'usage des sols.</p>	<p>Incitations financières (nationales et internationales) pour accroître la surface forestière, réduire la déforestation, maintenir et gérer les forêts existantes.</p> <p>Régulations d'usage des terres et mise en application de ces réglementations</p>	<p>Les contraintes incluent le manque de capital pour investir et les problèmes de propriété des terres.</p> <p>Opportunité : peut contribuer à la réduction de la pauvreté.</p>

Tab. 1 : contribution du secteur forestier à la lutte contre l'effet de serre (Source GIEC 2007)

des coûts faibles en synergie avec l'adaptation et la gestion durable ». « Sur le long terme, une stratégie de gestion durable des forêts visant à maintenir ou à augmenter le stock de carbone en forêt tout en approvisionnant la filière bois (grume, fibre et énergie) à un niveau de prélèvement durable, générera les bénéfices d'atténuation maximum. » (tableau 1). « Cependant, le contexte institutionnel actuel et le manque de volonté politique ne permettent pas d'exploiter tout le potentiel d'atténuation que détient le secteur forestier. ».

Bali 2007 : conférence des parties au protocole de Kyoto et à la convention Climat (CNUCC)

Le changement climatique n'est aujourd'hui plus contesté par la communauté scientifique internationale, il est devenu une préoccupation majeure qui amène les pays à construire des mécanismes permettant de développer des pratiques en faveur de la réduction des émissions de GES. La poursuite de la hausse des températures expose l'économie mondiale à des pertes de richesse potentiellement importantes, de l'ordre de 5 à 20 % du PIB par tête en valeur actualisée au cours des deux prochains siècles.

Les représentants de 187 pays se sont réunis à Bali en décembre 2007 pour avancer sur un programme commun de lutte contre le change-

ment climatique. La conférence s'est ouverte sur l'annonce faite par l'Australie de ratifier le protocole de Kyoto, laissant ainsi les USA seul pays industrialisé en dehors du protocole. Le sujet principal de la conférence concernait la suite à donner au protocole de Kyoto qui s'achève en 2012. Malgré de nombreux incidents, la communauté internationale a su s'accorder sur une feuille de route pour entamer ces négociations, mais aucun objectif chiffré de réduction des émissions n'a pu être annoncé. Jusqu'aux élections de fin 2008, les États-Unis s'opposent très probablement à tout engagement ferme de réduction de leurs émissions dans un cadre multilatéral. Par ailleurs la prudence et l'attentisme de pays développés comme le Canada, le Japon et la Russie n'a pas aidé à la fixation d'objectifs ambitieux.

La forêt a occupé une place importante dans les débats, les pays se sont formellement accordés sur le fait que la déforestation était une source majeure de GES (~20 % des émis-



ITTO

Feu de forêt en Indonésie

sions globales) et qu'il fallait agir rapidement (photo). La Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière (REDD) pourrait être partie prenante du prochain dispositif de lutte contre le changement climatique à partir de 2012, et la décision prise à Bali sur cette question encourage tous les acteurs à se lancer dès maintenant dans des dispositifs pilotes. La France s'est impliquée de façon importante dans ces négociations, notamment du fait de ses partenaires de longue date avec les pays d'Afrique. Elle a ainsi soutenu de façon active la prise en compte de la dégradation des forêts dans le cadre de la décision prise sur la lutte contre la déforestation.

L'UE : des engagements ambitieux sur le long terme, mais un marché fermé aux crédits forestiers

Le Conseil européen, des 8 et 9 mars 2007, a fixé pour l'Europe des 27 un objectif de réduction d'émissions de GES de 20 % d'ici 2020 (30 % si d'autres pays s'engagent), et un objectif de 20 % d'énergies renouvelables d'ici 2020 (nucléaire inclus). Dans ce cadre et afin de soutenir le marché du carbone, la Commission européenne a révisé à la baisse 15 des 18 plans nationaux d'allocation des quotas (PNAQ 2008-2012) qui lui ont été soumis. Pour la France, le PNAQ a été fixé à 132,8 MteqCO₂, soit près

de 11 % de moins que la demande initiale (149 MteqCO₂), mais il reste supérieur aux émissions enregistrées en 2006 (118 MteqCO₂).

Reste que l'inclusion des crédits issus de projets forestiers n'est pas autorisée dans le marché européen, bien que les forêts participent à la régulation du cycle du carbone. Les Conseils européens de printemps et d'été 2007 ainsi que le Conseil environnement du 28 juin 2007 ont demandé à la Commission européenne d'examiner la possibilité d'inclure les crédits « puits de carbone » dans le marché européen.

Le Grenelle de l'Environnement : la forêt en tant que « pompe à carbone »

Pour la France, les conclusions du Grenelle de l'environnement ont confirmé la nécessité de s'inscrire dans le « facteur 4 », c'est-à-dire de diviser par 4 nos émissions d'ici 2050. Cet objectif s'appuie sur une évolution des modes de production d'énergie (dépasser 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020). La forêt, en tant que ressource de biomasse (matériau et bois énergie) sera mise à contribution, dans le cadre d'un programme de mobilisation durable, s'appuyant sur le principe de dynamisation de la filière forêt-bois tout en protégeant la biodiversité forestière ordinaire et remarquable (avec notamment l'accord passé le 4 septembre 2007 entre FNE/ONF/FNCOFOR/Forêt privée). Plus de 20 millions de m³ de bois supplémentaires devraient ainsi être mobilisés à horizon 2020.

Les conclusions du Grenelle de l'environnement, reprises dans le cadre des Assises de la forêt, ont également mis en lumière les besoins suivants :

- identifier les scénarios qui optimisent le bilan carbone dans les forêts et les surfaces agricoles prairies, champs, zones humides... afin d'éta-

blir des méthodologies de mise en place de « puits » de carbone biologique sur le territoire ;

- favoriser l'intégration de la bonne gestion forestière et agricole dans le protocole de Kyoto en levant les obstacles juridiques et réglementaires actuels, en octroyant des crédits carbone aux exploitations agricoles et aux propriétaires forestiers gestionnaires ou en mettant en œuvre les mécanismes de développement propre.

2007 : lancement des projets domestiques

Les pays étant libres des moyens qu'ils mettent en œuvre sur leurs territoires pour réduire leurs émissions, plusieurs pays ont mis en place un système reprenant la logique des projets définis par le protocole de Kyoto mais sur le territoire national : les projets domestiques.

L'État français a souligné son intention, au travers de l'arrêté du 7 mars 2007, pris pour l'application des articles 3 à 5 du décret n° 2006-622 du 29 mai 2006 et relatif à l'agrément des activités de projet relevant des articles 6 et 12 du protocole de Kyoto, d'utiliser une partie de ses actifs carbone pour promouvoir des investissements entrepris par des opérateurs français sur le territoire national. Il s'agit de mettre en œuvre des projets domestiques permettant de réduire les émissions de GES ou bien de les séquestrer. Le principe des projets domestiques est de rémunérer les acteurs non concernés par le système européen d'échange de quotas, c'est-à-dire des secteurs tels que le transport, l'agriculture, la forêt, le bâtiment ou le traitement des déchets. Les conditions d'éligibilité du secteur forestier pour entrer dans la démarche « projet domestique » devraient être précisées dans un prochain arrêté.

En conclusion

Le débat qui s'est tenu à la conférence climat de décembre 2007 sur la

déforestation tropicale sera probablement la porte d'entrée à la discussion sur le rôle des forêts dans le régime Kyoto post 2012, notamment via la promotion de la gestion durable des forêts. Les négociations et décisions qui seront prises, au niveau international, européen et français devraient traduire de façon explicite et positive le fait qu'une forêt gérée de façon durable est un outil de lutte efficace contre le changement climatique, comme l'a souligné le GIEC dans son dernier rapport.

Marianne RUBIO

Chargée de mission effet de serre
ONF — DEDD

Bibliographie

Nations Unies, 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. <en ligne : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>>

IPCC, 2007. IPCC Fourth assessment report : climate change 2007. <en ligne : <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>>

GIEC, 2000. Rapport Spécial sur l'utilisation des terres, les changements d'utilisation des terres et la foresterie <Résumé à l'intention des décideurs en ligne : <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-fr.pdf>>

MIES, 2006. Face au changement climatique, agissons ensemble : Actualisation 2006 du Plan Climat 2004-2012. 68 p. <en ligne : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Panclimatactualise.pdf>>

Voir aussi les sites dédiés au Grenelle de l'Environnement (www.legrenelle-environnement.gouv.fr) et aux Assises de la forêt (<http://agriculture.gouv.fr/sections/magazine/focus/assises-foret-du-bois/groupe-climat-energie>)

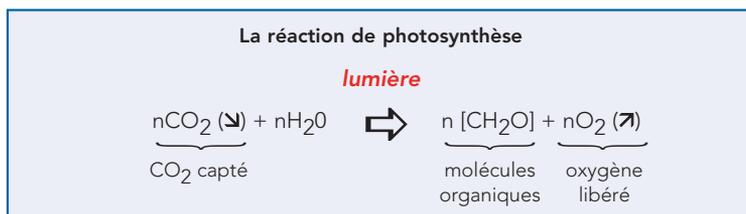
Forêt et cycle du carbone

En 2005, les forêts couvraient 3,95 milliards d'ha, soit 30 % de la surface terrestre, et renfermaient (biomasse, matières organiques en décomposition et sol) plus de la moitié du carbone accumulé par les écosystèmes terrestres. Les écosystèmes forestiers ont un mode de fonctionnement dynamique : ils recyclent le carbone. Les processus de photosynthèse, de respiration, de transpiration, de décomposition et de combustion entretiennent la circulation naturelle du carbone entre les écosystèmes et l'atmosphère et conditionnent le « puits de carbone ».

La photosynthèse : le point de départ de la séquestration biologique

Sans les forêts, on estime avec beaucoup d'incertitude que la vitesse d'augmentation de l'effet de serre (voir encadré) et le changement climatique associé seraient 1,5 fois plus rapides. L'impact majeur des forêts sur l'effet de serre est lié à leur rôle dans le cycle du carbone. Deux tiers de la photosynthèse globale s'effectue dans les écosystèmes forestiers. La photosynthèse des forêts recycle annuellement 5 % du CO₂ atmosphérique.

La forêt est un donc élément clé du cycle du carbone. La photosynthèse permet aux arbres de capter le CO₂ de l'atmosphère et de le transformer en molécules organiques grâce à l'énergie solaire. Ce carbone est stocké dans les racines, le tronc et le houppier des arbres. Les arbres contiennent une demi-tonne de carbone par tonne de bois sec. Les sols forestiers contiennent en général au moins autant de carbone que la biomasse des arbres qu'ils supportent. Une partie du carbone retourne au sol par la chute des feuilles et le bois mort. Lors de la décomposition de la litière, du CO₂ retourne dans l'at-



mosphère. Le reste est transformé en composés organiques immobilisés dans l'humus ou transférés dans le sol.

Toutes les forêts sont des réservoirs de carbone, elles renferment 53 % du carbone accumulé

dans les écosystèmes terrestres, qui se répartit en 26 % dans les forêts boréales, 20 % dans les forêts tropicales et 7 % dans les forêts tempérées (figure 1). Ce stock de carbone forestier est contenu à 65 % dans le sol, et à 35 % dans la biomasse.

Zoom sur l'effet de serre

Qu'est-ce que l'effet de serre naturel ?

La terre reçoit de l'énergie venant du soleil. Seule une partie de cette énergie est absorbée par la terre et l'atmosphère, le reste est renvoyé vers l'espace. Avec cette énergie et grâce à la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la terre se réchauffe. Les gaz à effet de serre empêchent en effet les rayonnements infrarouges d'être renvoyés de la terre vers l'espace. L'effet de serre, phénomène naturel, est donc la condition indispensable à la vie sur terre. Sans lui, la température de notre planète serait alors de -18 °C, contre une moyenne actuelle de 15 °C.

Pourquoi cet effet de serre se renforce ?

L'accroissement de la concentration de gaz à effet de serre (N₂O, CH₄, CO₂...), dont certains sont très efficaces en petite quantité retient dans l'atmosphère davantage de rayonnement infrarouge. Ce surplus artificiel d'effet de serre provoque un réchauffement du climat. Les gaz dits à effet de serre, émis par les activités humaines, intensifient ce phénomène depuis deux siècles.

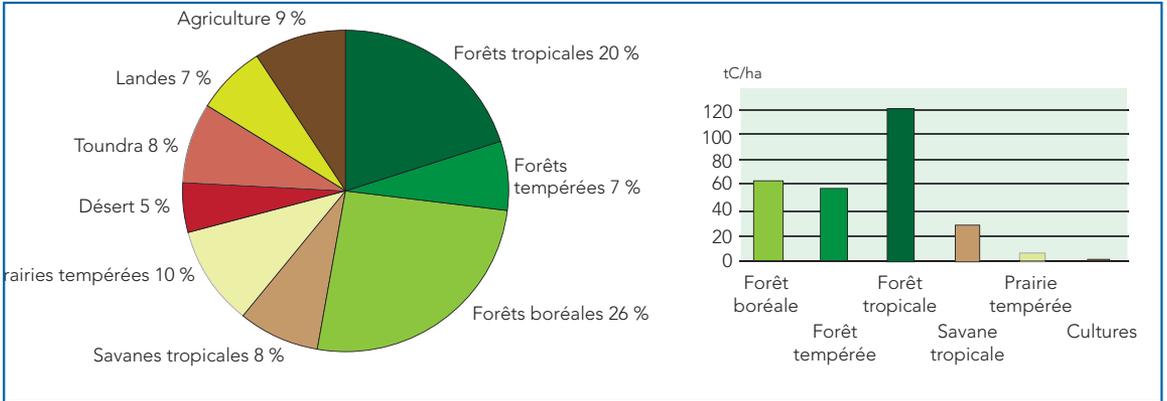


Fig. 1 : distribution du carbone biosphérique terrestre entre les grands types d'écosystèmes géographiques ; à gauche : biomasse totale ; à droite : biomasse aérienne (Source : FAO)

La forêt : un rôle dynamique dans le cycle du carbone

Le flux de fixation de carbone par une forêt suit son cycle de vie (figure 2). Il dépend de son régime de perturbation, de la fertilité du site, du climat : les surfaces forestières perturbées récemment par un incendie, une coupe rase, une tempête sont d'abord des sources de carbone de 1 à 5 tC/ha/an, une forêt en pleine croissance peut emmagasiner de 3 à 10 tC/ha/an (Kowalski *et al.*, 2003, 2004), les forêts âgées sont supposées proches de l'équilibre mais elles pourraient en fait être des puits de carbone de faible activité (Grace *et al.*, 2001). La forêt française représente un stock de carbone estimé à environ 2,5 Gt de carbone, soit 8,9 Gt eqCO₂ (Pignard *et al.*, 2006), répartis entre les différents compartiments du sol et de la biomasse (figure 3).

Un écosystème forestier a donc un rôle dynamique dans le cycle du carbone : il absorbe, stocke et relâche cet élément de manière totale ou partielle. Le bilan de ces échanges aboutit à un flux net d'absorption estimé à 65 Mt eqCO₂ par an dans les forêts françaises (d'après l'inventaire 2005 réalisé par le CITEPA), répartis de façon non homogène entre les différents départements (figure 4).

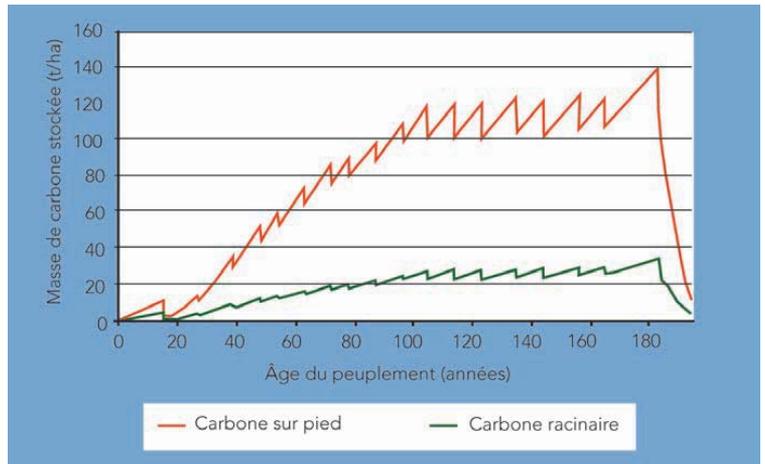


Fig. 2 : évolution du stockage de carbone dans un peuplement de chêne sessile (Source : INRA 2008)

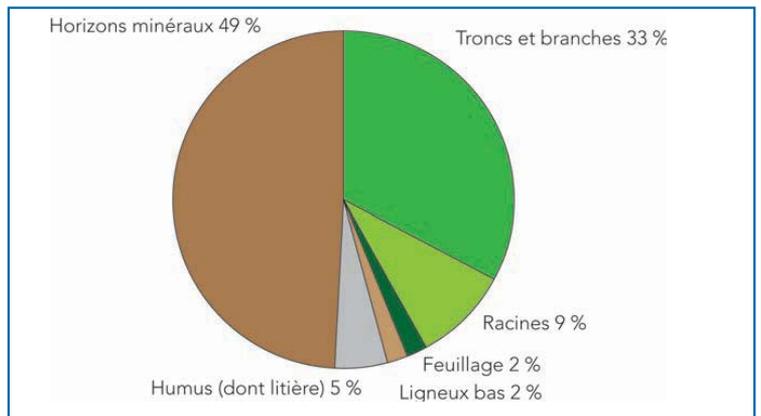


Fig. 3 : stock de carbone et importance relative des différents éléments des écosystèmes forestiers en France

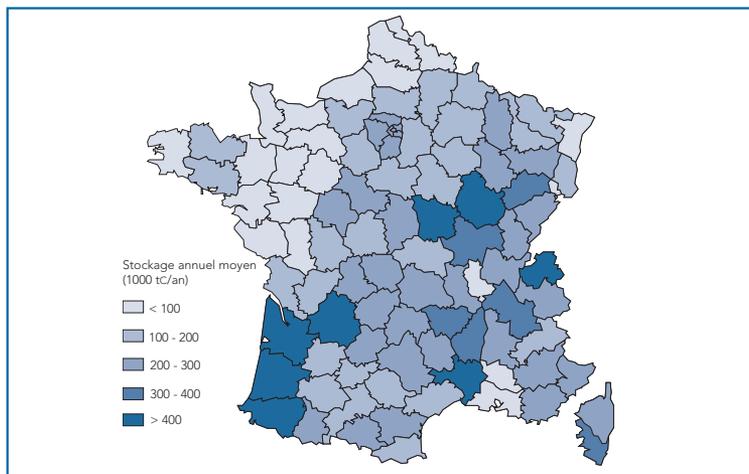


Fig. 4 : variation annuelle du stock de carbone dans la biomasse forestière, par département – Période 1984-1996
(Source : Pignard et al., 2004/L'IF n°7, mars 2005)

Les chiffres clés du carbone

- 1 tonne Carbone = 3,667 tonnes CO₂
- 1 m³ de bois exploité = 1 tonne CO₂
- 1 tonne de bois sec = 0,5 tonne de Carbone

Stocks de carbone par hectare en France (CARBOFOR, 2004) :

71 tC/ha dans la biomasse :

- feuillus : 76 tC/ha - résineux : 62 tC/ha
- futaie et TSF : 80 tC/ha - taillis simple : 39 tC/ha

Le poids de la déforestation dans les pays du sud

Certaines perturbations de l'écosystème peuvent diminuer le stock de carbone en forêt et entraîner des sources de carbone. Ces perturbations peuvent être liées aux activités humaines (déforestation, exploitation) ou naturelles (incendie, tempête, attaque phytosanitaire). Des quantités considérables de carbone ont été libérées en raison du déboisement opéré depuis des siècles aux latitudes moyennes et dans la dernière partie du 20^e siècle dans les régions tropicales. La déforestation tropicale induit chaque année l'émission de 6 Gt de CO₂ d'après le rapport 2007 du GIEC, soit de l'ordre de 20 % des émissions mondiales annuelles de

CO₂. Elle est ainsi responsable de près d'un tiers des émissions cumulées depuis 150 ans.

La forêt : un puits de carbone

Les écosystèmes terrestres, à l'échelle globale, absorbent du carbone : ils se comportent comme des « puits de carbone ». Cet effet puits a été déterminé empiriquement par les climatologues. La localisation de ce puits de carbone terrestre fait débat. Plusieurs travaux suggèrent actuellement que la biomasse des forêts tempérées ainsi que le compartiment détritique des forêts boréales (litière, gros débris morts, humus) sont en accroissement, ce qui expliquerait une bonne partie de l'effet puits observé. Ceci étant,

la distribution de ce puits de carbone de l'hémisphère Nord entre l'Amérique du Nord et l'Eurasie (Russie notamment) ne fait pas l'objet d'un consensus dans la communauté scientifique.

Le rôle des forêts tropicales est encore débattu : elles sont sources d'émissions de GES (du fait de la déforestation) mais il est difficile d'évaluer la mesure dans laquelle elles absorbent du CO₂ de façon significative. On a longtemps considéré que les forêts primaires étaient des réservoirs de carbone en équilibre, leur bilan global de carbone était considéré comme neutre sur le long terme. Cette conception a été remise en cause ces dernières années par certaines études, dont celle présentée dans un récent article de la revue *Science* qui revoit à la baisse l'absorption réalisée dans les forêts de l'hémisphère nord tandis que les forêts tropicales seraient des sources moins importantes que prévu (Stephens et al., 2007). S'il redistribue les cartes entre écosystèmes tempérés et tropicaux, cet article ne remet pas en cause l'existence du puits forestier.

Les causes de l'effet « puits » de la forêt

Les écosystèmes terrestres sont influencés par un certain nombre de facteurs d'origine anthropique directe, anthropique indirecte ou naturelle. L'accroissement de la production primaire nette des forêts de l'hémisphère Nord a des causes directes comme le déficit de récolte des forêts européennes et russo-sibériennes, l'amélioration des pratiques sylvicoles, l'extension des surfaces boisées ou le vieillissement des peuplements. Des causes indirectes comme les dépôts azotés, l'allongement de la saison de végétation dû au réchauffement ou le rôle dopant du CO₂ atmosphérique sont également à prendre en compte.

interview

Étienne Mathias,

CITEPA, chargé de l'inventaire national gaz à effet de serre (GES) pour les secteurs Forêt et Agriculture

À partir de quelles données travaillez-vous pour établir l'inventaire « forêt » GES de la France ?

L'inventaire « forêt » s'inscrit dans un secteur appelé UTCF pour utilisation des terres, leurs changements et la forêt. Nous devons donc évaluer les surfaces actuelles de forêts ainsi que les zones défrichées ou boisées récemment. Nous utilisons pour cela la base TERLUTI de suivi d'occupation des terres élaborée par le SCEES (service statistique du ministère chargé de l'Agriculture) ; cette statistique est construite à partir d'un échantillonnage de placettes sur lesquelles un enquêteur définit annuellement l'occupation physique et l'utilisation fonctionnelle du sol.

De là, pour quantifier le carbone relâché ou stocké en forêt, nous utilisons des données transmises par l'IFN pour la biomasse, et les données de l'INRA pour le compartiment sol. Dans le cas d'un boisement par exemple, on considère que du carbone est progressivement stocké sur 20 ans dans le sol.

Ensuite pour quantifier le carbone stocké ou émis en forêt nous estimons les volumes de différents « réservoirs » de carbone (figure 5) que sont la biomasse vivante, le bois mort, la litière et le sol ainsi que les flux de carbone qui rentrent en jeu (ces données sont fournies essentiellement par l'IFN et par l'INRA).

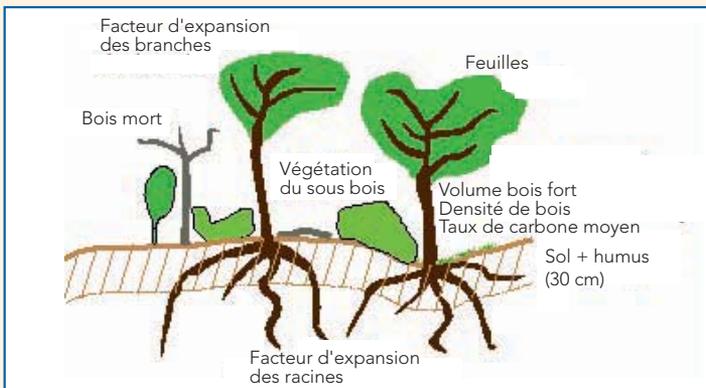


Fig. 5 : les compartiments à prendre en compte pour estimer le carbone forestier (Source IFN)

Et spécifiquement pour les forêts qui n'ont subi ni déboisement, ni boisement récent, comment travaillez-vous ?

Le bilan carbone de ces forêts est calculé par soustraction de deux paramètres principaux que sont l'accroissement et le prélèvement. L'accroissement est donc estimé à partir des données de l'IFN, des facteurs d'expansion étant utilisés pour avoir accès à toute la biomasse de l'arbre (houppier, racines). Les données de prélèvements de bois sont disponibles annuellement grâce aux statistiques de récolte de grumes et de trituration du service statistique du ministère chargé de l'Agriculture (SCEES, AGRESTE). La récolte non commerciale de bois (bois de feu) est également prise en compte via les statistiques énergétiques. En application des règles qui ont été fixées au niveau international, la totalité du carbone contenu dans la biomasse récoltée est considérée comme étant émise l'année de la coupe.

Comment se traduit en chiffre l'effet puits de la forêt française ?

En 2005, en métropole, la forêt a fixé 71 Mt de CO₂, dont 11 Mt sont issus de boisements âgés de moins de 20 ans, et les défrichements ont libéré autour de 6 Mt, soit un résultat total de 64,7 Mt de CO₂ fixées en métropole (source CITEPA/CORALIE format CCNUCC mise à jour décembre 2006).

Les facteurs d'accroissement utilisés dépendent de l'âge et de la composition des peuplements : de 1,8 tonne de CO₂/ha/an pour des peuplements résineux de moins de 20 ans à 11,1 tonnes CO₂/ha/an pour des peuplements feuillus de plus de 20 ans.

Néanmoins, il reste difficile de faire la part des choses entre ces différents facteurs. Une étude menée par Magnani *et al.* a démontré, dans un article publié en 2007 dans la revue *Nature*, que 92 % de la production nette des écosystèmes tempérés et boréaux du réseau CARBOEUROPE était due à la relative « jeunesse » de ces forêts. Selon eux, les 8 % restant sont à attribuer principalement à la fertilisation azotée. Les émissions massives d'azote de nos sociétés industrielles (agriculture, transport, industrie...) arrivent en effet sous forme de gaz diffus avec les pluies et les aérosols aux feuilles des arbres, qui les assimilent alors de manière très efficace. En dissociant l'effet « gestion » de l'effet « perturbations naturelles », l'étude menée par Magnani *et al.* a ainsi démontré que c'était avant tout l'homme qui influençait par sa gestion le bilan carbone de l'écosystème.

Il ne fait aucun doute que l'accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui s'observe depuis le début de l'ère industrielle, peut augmenter l'assimilation de carbone par les plantes (efficacité de la photosynthèse), et par là même augmenter le puits de carbone terrestre, mais la distribution spatiale de ces impacts est encore débattue. Il est admis cependant que cet effet n'est pas uniforme dans les écosystèmes mondiaux, et qu'il est surtout important au niveau des tropiques où les disponibilités en eau et en nutriments sont importantes (Ciais *et al.*, 2005).

Par ailleurs, la reconquête forestière « naturelle » de terres principalement agricoles abandonnées est une des causes expliquant le puits de carbone terrestre dans l'hémisphère nord (USA et Europe). En effet, un écosystème forestier représente, dans la majorité des cas, un stock de carbone plus important qu'une terre agricole ou qu'une prairie.

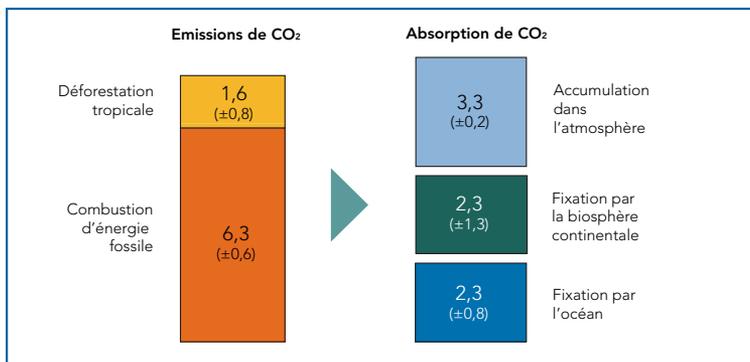


Fig. 6 : bilan des flux atmosphérique de CO₂ sur la décennie 90, en milliards de tonnes de carbone (Source GIEC)

Cependant, l'établissement de nouvelles plantations n'a pas encore d'impact significatif à l'échelle mondiale sur le puits de carbone terrestre. Des puits régionaux ont été toutefois largement renforcés par des programmes de plantation, en Chine par exemple, où les nouvelles plantations ont stocké 0,45 GtC depuis le milieu des années 1990. À l'échelle mondiale, le potentiel pour ce type de programme reste important.

Pour conclure

Les émissions mondiales de GES, majoritairement liées à l'utilisation de combustibles fossiles, sont partiellement compensées par deux puits : les forêts et les océans (figure 6). Les émissions liées à la respiration de la biomasse vivante (60 GtC/an), à la décomposition du bois mort (50 GtC/an) et à l'ensemble des perturbations de type incendie, récolte... (9 GtC/an) viennent se déduire de la quantité de carbone stockée par photosynthèse (autour de 120 GtC/an). Ainsi, malgré l'ampleur de la déforestation dans les pays tropicaux, la forêt mondiale est un puits de carbone dynamique, fixant annuellement environ 2,5 Gt eqCO₂, soit 0,7 Gt C/an.

Cet équilibre reste fragile, le 4^e rapport du GIEC publié en 2007 souligne en effet le fait que la

résilience de nombreux écosystèmes pourrait être affectée du fait du changement climatique.

Marianne RUBIO

Chargée de mission effet de serre
ONF — DEDD

Bibliographie

CLAIS P. *et al.*, 2005. The potential for rising CO₂ to account for the observed uptake of carbon by tropical, temperate, and boreal forest biomes. *In* Griffiths H., Jarvis P.G. (eds.), *The carbon balance of forest biomes*, Oxford, UK : Taylor & Francis

FANG J.Y., CHEN A.P., PENG C.H., ZHAO S.Q., CI L., 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, vol. 292, n° 5525, pp. 2320-2322

GRACE J., MALHI Y., HIGUCHI N., MEIR P., 2001. Productivity of tropical rain forests. *In* Roy J., Saugier B. et Mooney H.A. (eds), *Terrestrial global productivity*, San Diego, USA :Academic press, pp. 400-422

IPCC, 2001. *Climate Change 2001: the scientific basis: contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.

JANSSENS I.A. *et al.*, 2005. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale: a European case study. *Biogeosciences*, vol. 2, n° 1, pp. 15-26

KOWALSKI A.S., LOUSTAU D. *et al.*, 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology*, vol. 10, n° 10, pp. 1707-1723

MAGNANI F. *et al.*, 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, vol. 447, n° 7146, pp. 849-851

PACALA S.W. *et al.*, 2001. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, vol. 292, n° 5525, pp. 2316-2320

PERSSON T., 2000. Soil nitrogen turnover: mineralization, nitrification and denitrification *in* European forest soils. *In* Schulze E.D. (ed), *Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems*, Berlin : Springer, pp. 297-331

PIGNARD G. *et al.*, 2006. Estimating carbon stocks and fluxes in French forest biomass, based on national inventory data. *In* Loustau D. *et al.* (Eds), *Final Report of the Carbofor Project*.

SMITH P., *et al.*, 2000. Meeting Europe's climate change commitments : quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change BIOLOGY*, VOL. 6, N° 5, PP. 525-539

STEPHENS *et al.*, 2007. Carbon uptake reconsidered. *Science*, vol. 316, n° 5832, p. 1665

WATSON R.T. *et al.*, 2000. *Land use, land use change and forestry. Rapport spécial du GIEC*. Cambridge, UK : Cambridge university press. 377 p.

Les forêts, des pompes à carbone efficaces ?

La contribution des forêts à la lutte contre l'effet de serre a fait récemment l'objet de débats scientifiques, dont la presse s'est parfois fait l'écho sur un mode franchement polémique. Jean-Luc Peyron revient sur ces critiques, qui prennent ici de plus justes proportions.

La lutte contre le changement climatique représente un enjeu majeur pour le devenir de notre planète. Les écosystèmes forestiers, en séquestrant le CO₂ de l'atmosphère, en sont un élément incontournable. Si les agressions dont ils sont l'objet, essentiellement en zone tropicale, sont une des principales sources d'émission de gaz à effet de serre, à l'inverse, leur développement est reconnu comme un élément important des politiques climatiques, tant par la Convention cadre sur le changement climatique, son protocole de Kyoto et l'ensemble des travaux qui en découlent, que par les résultats du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), dont le quatrième rapport d'évaluation vient d'être publié en 2007. Cependant, le rôle globalement favorable de la végétation vis-à-vis de l'effet de serre et du climat est parfois remis en question pour différents motifs : sa pérennité ne serait pas assurée, d'une part, et, d'autre part, certaines conséquences défavorables ne devraient pas être ignorées. Cet article analyse donc certaines de ces critiques avant d'en tirer quelques conclusions, notamment pour l'action.

Forêt et méthane

En janvier 2006, la reprise par la presse d'un article de la revue scientifique *Nature* a secoué le

monde forestier. Selon des chercheurs de l'Institut Max Planck d'Heidelberg à l'origine de l'article en question, la végétation émettrait, en conditions aérobies (c'est-à-dire à l'air libre), des quantités importantes de méthane, un puissant gaz à effet de serre (Keppler et al., 2006). On savait jusque là que le méthane était produit en quantités importantes dans les terrains marécageux par exemple, donc en conditions anaérobies, mais on était loin d'imaginer qu'il puisse également émaner de la végétation en croissance. Cette découverte résultait de travaux réalisés en laboratoire, sous atmosphère contrôlée et sur de jeunes plants ou semis d'une vingtaine d'espèces ligneuses ou non. En dépit de ces conditions expérimentales très particulières, les chercheurs ajoutaient des extrapolations pour estimer la portée de leurs résultats au niveau planétaire.

La presse a alors fait le lien avec le rôle dévolu à la végétation, et notamment la forêt, en tant que puits de carbone dans la lutte contre l'effet de serre. C'est ainsi que certains articles ont indiqué que « la végétation [...] contribuerait au réchauffement climatique » ou que cela pouvait remettre « en question l'intérêt des projets de reforestation, ces « puits de carbone » destinés à piéger le CO₂ ».

Cet « emballement » médiatique a conduit l'Institut Max Planck à publier une mise au point sur les limites de l'interprétation à donner à sa découverte, en indiquant que celle-ci ne remettait pas en cause le bilan global de la forêt vis-à-vis de l'effet de serre. En effet, selon les auteurs eux-mêmes, si l'on compare à long terme la fixation de dioxyde de carbone aux émissions de méthane, l'effet méthane ne réduirait que de 1 à 4 % l'effet bénéfique du carbone fixé annuellement par les végétaux. De son côté, la communauté scientifique et forestière française a confirmé qu'« il existe bien un vrai bénéfice à stocker du carbone dans les arbres et les sols forestiers, ainsi qu'à utiliser des énergies renouvelables comme la biomasse plutôt que des combustibles fossiles » (Peyron, 2006).

Cependant, au début du printemps 2007, une autre publication est venue contredire l'émission de méthane par les forêts. Il s'agit d'un rapport publié dans la revue scientifique spécialisée *New Phytologist*, dont le titre constitue à lui seul le résumé : il n'y a pas d'évidence pour une émission substantielle de méthane par les plantes terrestres en conditions aérobies (Dueck et al., 2007). Depuis, il semble bien que les choses soient rentrées dans l'ordre et que l'étonnante découverte soit maintenant enterrée !

Influence de la concentration en ozone sur la croissance des végétaux

L'ozone, comme tout agresseur, est susceptible de réduire la productivité des forêts lorsqu'il est présent en fortes concentrations (Ollinger et al., 1997 ; Ulrich, 2005). En limitant ainsi le puits de carbone de la végétation, il ajoute une conséquence indirecte sur le climat à celle résultant de sa seule présence dans l'atmosphère. C'est sur la base de ce double effet et d'une estimation de sa mesure que, durant l'été 2007, un article de la revue *Nature* est venu attirer l'attention sur l'importance, plus grande qu'il ne pourrait paraître, de l'ozone vis-à-vis de l'effet de serre (Sitch et al., 2007). Il faut rappeler que ce gaz ne fait pas partie des six gaz à effet de serre pris en compte par le protocole de Kyoto.

Que nous enseigne précisément l'article ? Sur la base d'un modèle de végétation planétaire spatialisé et de données expérimentales, la productivité de la végétation a été étudiée au niveau mondial sur la période 1901-2100, pour deux niveaux de sensibilité des plantes à l'ozone et dans l'éventualité du scénario A2 du GIEC (qui correspond grossièrement, sur la période étudiée, à un triplement de la concentration atmosphérique en CO₂ et à une augmentation de la température moyenne de la planète de l'ordre de 5 °C). Les résultats montrent que l'effet dépressif de l'ozone sur la croissance représenterait une réduction en 2100 du puits de carbone forestier de 17 à 31% par rapport à ce qu'il serait en négligeant l'effet de l'ozone.

Cette recherche est fondée sur des hypothèses, méthodes et données qui méritent d'être discutées. En particulier, la représentativité des deux scénarios de faible et forte sensibilité de la végétation à l'ozone n'est pas discutée alors



Usine de production d'électricité à partir de lignite en Pologne

JL Peyron, ECOFOR

que les résultats s'appliquent à l'échelle planétaire. Or il semblerait que l'image ainsi fournie tende à surestimer l'effet de l'ozone sur la productivité. Par ailleurs, comme seul le scénario socioéconomique A2 est testé, tous les ordres de grandeur sont relatifs à un réchauffement intense.

Cependant, la véritable cible de l'article qu'était l'ozone a rapidement été détournée pour « montrer du doigt » le puits de carbone forestier dont l'efficacité se trouvait battue en brèche par les agressions de l'ozone. Or celles-ci sont

connues de longue date et leur analyse ne constituait pas en tant que telle une nouveauté à publier. Pourtant, l'un des membres de l'équipe éditoriale de *Nature* introduit l'article par un texte intitulé : « *Carbon sinks threatened by increasing ozone* » (Les puits de carbone menacés par un accroissement de l'ozone).

En réalité, la contribution forestière à la lutte contre l'effet de serre doit s'envisager dans un cadre intégré qui prenne en compte l'ensemble des phénomènes en cause venant se surajouter au fonctionnement

naturel de la biosphère. Cette intégration englobe des facteurs avantageux mais aussi, évidemment, des évolutions néfastes comme celle mise en évidence ici pour l'ozone. Dans le cas présent et comme le mentionne directement l'article analysé ici, même en prenant en compte l'impact de l'accroissement de la concentration en ozone, le puits de carbone forestier est destiné à perdurer et à se développer.

Forêt et effet d'albédo

En matière d'atténuation du changement climatique, l'habitude a été prise de s'intéresser essentiellement au renforcement de l'effet de serre et encore plus à la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Cependant, il ne faut pas oublier que l'état de surface de la planète agit directement sur le climat, selon sa plus ou moins grande aptitude à réfléchir le rayonnement solaire que l'on mesure par l'albédo. Par leur apparence sombre, les forêts réfléchissent peu le rayonnement solaire et ont donc un albédo faible relativement aux cultures, prairies, landes et plus encore aux surfaces enneigées, ce qui apparaît important en zone boréale. Leur propriété vis-à-vis de la lumière varie évidemment d'un type d'écosystème forestier à l'autre, entre conifères et feuillus par exemple, ou encore entre une forêt adulte fermée et une jeune régénération après coupe rase, incendie ou chablis. Les échanges d'énergie entre un couvert forestier et l'atmosphère et leur répartition en chaleur, rayonnement ou évapotranspiration jouent un rôle important sur le plan climatique.

Ainsi, lors de la conversion d'une terre agricole en forêt, deux phénomènes ont lieu, avec des conséquences inverses sur le climat qui vont dans le sens, pour l'un, et à l'encontre, pour l'autre, de l'effet « puits de carbone » :

- une diminution de l'albédo, particulièrement prononcée aux hautes latitudes en raison d'une couverture neigeuse moins totale en zone boisée ; elle induit un réchauffement, au moins localement (Betts, 2000 ; Oleson et al., 2004) ;

- une hausse de l'évapotranspiration, notamment sous les tropiques, due à une capture plus efficace des précipitations par la canopée, qui entraîne un refroidissement local (Nosetto et al., 2005).

Une étude coordonnée par Bala a récemment tenté d'évaluer l'importance de ces deux effets sur le climat en analysant les conséquences, sur 150 ans, d'une suppression totale des forêts mondiales en 2006 (Bala et al., 2007). Selon cette étude, une telle déforestation « mondiale » entraînerait un léger refroidissement net de la planète (estimé à 0,3 °C en 2100), grâce à l'effet d'albédo (réchauffement au niveau des tropiques contrebalancé par un refroidissement plus important en zones tempérée et boréale), remettant ainsi en cause le rôle de la forêt dans la lutte contre le changement climatique.

Mais le travail scientifique proprement dit n'est pas exempt de critiques. Dans un rapport de synthèse de 2005, deux chercheurs de l'INRA, Loustau et Dupouey, soulignent le rôle important des écosystèmes forestiers sur le climat régional et local mais considèrent que l'albédo constitue « un impact climatique de deuxième ordre des forêts ». En réalité, l'étude de Bala et al. (2007) exclut de l'analyse de nombreux autres phénomènes tels que ceux qui concernent le cycle de l'eau, et aucune incertitude n'est affichée sur les résultats du modèle utilisé.

Par ailleurs, le raisonnement se construit sur un seul scénario socio-économique de référence (le scénario A2 du GIEC) et des utilisations très tranchées du territoire (du type

présence ou absence de forêt), sans aucun compromis possible alors même que les auteurs confirment la possibilité de phénomènes non linéaires, donc tels que l'analyse de cas extrêmes ne peut décrire correctement des situations médianes. De manière encore plus cruciale, des travaux de Bala et al. ne prennent pas en compte l'intégralité de la réduction des émissions qui est liée à la présence de la forêt (effet de stockage du carbone dans le sol, effet de substitution liée à l'utilisation de bois énergie ou bois matériau, prolongement de la durée de stockage du carbone dans les produits en bois).

Ainsi, si l'effet des forêts sur l'albédo, et donc le climat, est bien réel, son importance par rapport au problème global du rôle de filière forêt-bois sur le changement climatique reste à évaluer ; il ne remet en tout cas pas en cause les effets bénéfiques liés au stockage dans la biomasse, à l'évapotranspiration et aux produits en bois.

Impact de la sécheresse sur le puits de carbone forestier

L'idée du puits de carbone forestier s'est largement développée du fait que l'on constatait une augmentation de productivité dans de nombreuses forêts d'Europe ou d'Amérique du Nord. Cependant, les études portaient essentiellement sur l'évolution tendancielle à l'œuvre, sans prendre en compte, finalement, les événements extrêmes. La sécheresse et la canicule de 2003 sont venues rappeler que de telles conditions pourraient fortement porter atteinte à la productivité forestière.

En particulier, un article publié dans la revue *Nature* en septembre 2005 exploite les mesures effectuées sur des sites expérimentaux lourdement instrumentés agricoles et forestiers (Ciais et al., 2005). Il en ressort que la productivité primaire brute a été réduite de 30% à

l'échelle de l'Europe en 2003 par rapport à 2002. Pendant ce temps, la respiration des plantes et animaux n'a pas autant été affectée si bien que la végétation, au lieu d'être un puits, a finalement été une source. Ainsi, en 2003, les conditions climatiques exceptionnelles ont compensé, par leur ampleur, quatre années de puits. Même si ce phénomène semble avoir été sans précédent au cours du dernier siècle, l'hypothèse selon laquelle les sécheresses pourraient devenir plus fréquentes dans le cadre du changement climatique laisse augurer une efficacité diminuée du puits forestier dans le futur.

Les communiqués de presse diffusés à l'occasion de la parution de cet article insistaient sur le fait que l'augmentation de température n'avait pas que du bon et pouvait altérer la croissance de la végétation. Ceci n'était évidemment pas une surprise et venait utilement rappeler la nécessité d'analyser les événements extrêmes aussi bien que les tendances, de manière à avoir un résultat intégré. Clairement, un réchauffement important risque d'altérer considérablement le puits de carbone forestier par la fréquence accrue des épisodes de sécheresse qu'il ne manquera pas de provoquer. Cependant, ce résultat ne remet pas automatiquement en cause l'intérêt de renforcer, par plantation, les puits de carbone forestier. En effet, une partie de l'inversion du puits en source à l'occasion de la sécheresse provient de la diminution du stock de carbone du sol qui se produira probablement dans tous les cas, quelle que soit l'affectation du sol au moment d'un épisode climatique extrême. Si cette diminution peut donc être compensée, durant les bonnes années, par un effet puits plus important pour un sol boisé que pour un sol non boisé, alors il sera bien préférable de constituer ou de gérer de la forêt. Par ailleurs, il faut analyser



D. Bonal, INRA

Tour à flux mesurant notamment les flux de CO₂ entre l'atmosphère et la forêt guyanaise

tous les autres avantages des espaces boisés, y compris dans l'utilisation du bois en tant que matériau économe en énergie et que source d'énergie à l'état brut ou à partir de produits en fin de vie.

Le principal résultat de cette analyse des conséquences de la sécheresse n'est donc pas de décourager la constitution de puits de carbone de forestiers mais plutôt de faire prendre conscience du fait qu'il ne faut pas aveuglément compter sur une telle solution au risque de négliger l'indispensable réduction des émissions de gaz à effet de serre à laquelle il faut s'attaquer par ailleurs.

Impact du réchauffement automnal sur l'effet puits de carbone des forêts

Toujours dans *Nature*, un article paru début janvier 2008 (Piao et al., 2008) fait état de l'impact du réchauffement automnal sur les forêts. Cet article étudie l'évolution des flux de carbone au cours de l'année entre la forêt et l'atmosphère en analysant plus particulièrement les deux moments où, en début de saison de végétation, les forêts passent d'un état de source à un état de puits et où inversement, à l'automne, elles redeviennent émettrices nettes de CO₂. Il se réfère donc à ce que

l'on peut appeler les deux « points morts » de printemps et d'automne où l'effet source est égal à l'effet puits. Il montre l'écart qu'il y a entre l'évolution de ces deux points morts et celle de la saison de végétation comprise entre le débourrement et le jaunissement. En effet, alors que la saison de végétation s'accroît par ses deux extrémités avec le réchauffement climatique, les deux points morts deviennent de plus en plus précoces. La saison de végétation est essentiellement liée à la photosynthèse tandis que les points morts étudiés prennent également en compte la respiration. Or, le réchauffement tend à stimuler l'activité biologique et donc à compenser la photosynthèse ; ce phénomène est surtout marquant à l'automne où il fait plus qu'annuler l'augmentation de la saison de végétation.

L'article émet une hypothèse selon laquelle le bilan de carbone pourrait se dégrader plus rapidement que prévu si la précocité du point mort d'automne devenait, avec le changement climatique, plus grande que la précocité du point mort de printemps. Cependant, aucun argument dans l'article ne va dans le sens de cette hypothèse. On pourrait sans doute tout aussi bien dire que si la précocité du point mort de printemps augmentait plus que celle du point mort d'automne, alors le bilan de carbone pourrait se dégrader moins que prévu.

Par ailleurs, les commentaires suscités par article en matière de puits de carbone forestier tendent à tirer des conclusions en forme de jugement de valeur (Miller, 2008), ce qui pose problème. Si la question de constituer de nouveaux puits de carbone se pose, il faut comparer l'absence de reboisement à un reboisement supplémentaire. Dans l'une ou l'autre de ces alternatives, le réchauffement provoquera une augmentation de l'activité biolo-

gique des sols et une émission plus grande, par respiration hétérotrophe, du carbone initialement présent. Cependant, ce phénomène, qui est justement celui étudié dans l'article, est finalement de peu d'importance pour prendre la décision de constituer de nouveaux puits de carbone forestiers ; il faut en effet se fonder sur des bilans de carbone complets des deux alternatives sans omettre dans l'analyse les gains liés à l'utilisation des produits en bois (en substitution à d'autres matériaux ou combustibles).

L'impact du réchauffement automnal sur l'effet puits de carbone des forêts est donc fort intéressant mais n'apporte pas véritablement de changement dans la connaissance du bilan global du carbone des formations boisées ; son principal mérite semble être de se focaliser sur la manière dont ce bilan se répartit sur l'année. En tout cas, il ne remet pas en cause l'intérêt de la forêt pour séquestrer du carbone de façon active.

Pour résumer

Les recherches se multiplient pour mieux comprendre le rôle des formations végétales en général, boisées en particulier, sur le cycle du carbone, notamment dans le cadre des évolutions atmosphériques et climatiques en cours. Lors de l'interprétation de leurs résultats, il convient cependant de prêter particulièrement attention à un certain nombre d'écueils dont les principaux sont sans doute les suivants.

■ Le champ de ces recherches est en général focalisé sur un problème précis : un gaz (soit le dioxyde de carbone, soit le méthane, soit l'ozone...), quelques espèces végétales, un type d'évolution (soit tendancielle, soit extrême), un moment (début ou fin de la saison de végétation), des conditions

contrôlées (au laboratoire, sur jeunes semis...), le maillon amont de la filière forêt-bois. Or, bien souvent, la tentation est grande d'utiliser les résultats obtenus pour répondre à des questions nécessitant un champ d'investigation beaucoup plus large. À cet égard, il apparaît indispensable de développer des approches intégrant l'ensemble des problèmes de manière à pouvoir resituer l'influence réelle de chaque découverte dans son environnement global. Par exemple, nombreux sont les effets qui tendent à se compenser ; or, ce n'est pas parce que deux phénomènes se compensent que l'un ne prime pas sur l'autre, encore faut-il vérifier comment joue la résultante. Ce n'est pas toujours ce qui a été fait avant de mettre en cause le puits de carbone forestier au motif qu'il était susceptible d'être réduit par des émissions de méthane, les agressions de l'ozone, les sécheresses, le poids grandissant de la respiration par rapport à la photosynthèse...

■ Il est problématique de ne raisonner le problème des flux de carbone qu'au seul niveau forestier alors que bon nombre des avantages des espaces boisés proviennent de l'utilisation du bois en lieu et place de matériaux ou d'énergie conduisant à une extraction importante de ressources de carbone fossile.

■ À partir d'articles scientifiques dont l'objectivité semble rarement en cause, on constate une fréquente dérive dans les interprétations qui commencent parfois dès le commentaire éditorial de la revue dans laquelle l'article est publié et se poursuit ensuite dans le monde médiatique à travers des communiqués de presse d'abord, des articles de journaux ensuite. C'est ainsi que des articles publiés pour mettre en évidence une éventuelle émission de méthane par les plantes, pour

susciter un intérêt accru sur l'ozone, pour mettre en garde contre des stratégies dépendant trop fortement du succès des puits de carbone... se voient réorientés, de manière tout-à-fait exagérée, vers une remise en question complète de l'intérêt de constituer de nouvelles forêts.

■ Lorsque les conclusions qu'on peut légitimement tirer d'un article sont, consciemment ou non, manipulées, on constate que cela revient souvent à présenter comme nouveau un phénomène connu depuis longtemps : c'est ainsi que les risques que représente l'ozone pour la végétation (et la santé humaine) ont été étudiés de longue date, par exemple en forêt dans le cadre du réseau RENECOFOR ; c'est également ainsi qu'il n'a pas fallu attendre la sécheresse de 2003 pour savoir que la végétation stagnait durant les fortes sécheresses...

■ Enfin, si les analyses biogéochimiques sont extrêmement utiles pour progresser dans la lutte contre l'effet de serre et l'adaptation aux changements climatiques, leurs résultats dictent rarement la décision à prendre, laquelle peut nécessiter, comme cela a été dit plus haut, un champ d'investigation beaucoup plus large mais également la comparaison entre des situations qui sont rarement celles étudiées : par exemple, si le puits de carbone forestier décroît à l'avenir, il suffit qu'il décroisse moins que dans toute alternative pour qu'on puisse avoir intérêt à continuer à le gérer... et pour l'instant, il continue à augmenter !

Jean-Luc PEYRON
Directeur du GIP ECOFOR

Bibliographie

BALA G. *et al.*, 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *PNAS*, vol.104, n°16, pp. 6550-6555

BETTS R.A., 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, vol. 408, n° 6809, pp. 187-200

CIAS P. *et al.*, 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by heat and drought in 2003. *Nature*, vol. 437, n° 7058, pp. 529-533.

DUECK T.A. *et al.*, 2007. No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants : a 13C-labelling approach. *New Phytologist*, vol. 175, n° 1, pp. 29-35.

GARREC J.P., 2004. L'ozone, polluant du beau temps. Inra Nancy <Dossier sécheresse en ligne : <http://www.nancy.inra.fr/extranet/com/secheresse/ozone.htm>>

HOPKIN M., 2007. Carbon sinks threatened by increasing ozone. *Nature*, vol. 448, n° 7152, pp.396-397

IPCC, 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report, Work Group 1, Chapter 2, 106 p. <en ligne : http://ipcc.wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Pub_Ch02.pdf>

KEPPLER *et al.*, 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, vol. 439, n° 7073, pp. 187-191

LOUSTAU D., DUPOUEY J.L., 2005. Forêts et climat : rôle des forêts dans le cycle des gaz à effet de serre et les échanges d'énergie

avec l'atmosphère. In Actes du 8ème colloque Arbora, Bordeaux, 1er et 2 décembre 2005, pp. 17-30

MILLER J.B., 2008. Sources, sinks and seasons. *Nature*, vol. 451, n° 7174, pp. 26-27

NOSETTO M.D. *et al.*, 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, vol. 11, n° 7, pp. 1101-1117

OLESON K.W. *et al.*, 2004. Effects of land use change on North American climate: Impact of surface datasets and model biogeophysics. *Climate Dynamics*, vol. 23, n° 2, pp. 117-132

OLLINGER S.V., ABER J.D., REICH P.B., 1997. Simulating ozone effects on forest productivity: interactions among leaf-, canopy- and stand-level processes. *Ecological Applications*, vol. 7, n° 4, pp. 1237-1251

PEYRON J.L., 2005. Forêt et méthane : entre science et politique, expérimentations et extrapolations, objectivité et subjectivité. *Revue Forestière Française*, vol. 57, n° 6, pp. 496-508

PIAO S. *et al.*, 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, vol. 451, n° 7174, pp. 49-52

SITCH S. *et al.*, 2007. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, vol. 448, n° 7155, pp. 791-794

ULRICH E., 2005. Effets de l'ozone sur la végétation forestière : introduction générale dans la problématique. *Rendez-vous techniques de l'ONF*, n° 9, pp. 6-12

Forêt, bois énergie, bois matériau et carbone

Les écosystèmes forestiers tiennent un rôle important dans le cycle du carbone en fixant le CO₂ de l'atmosphère. Au-delà, le bois en tant que matériau prolonge le stockage de carbone tout au long de la durée de vie des produits bois. Par ailleurs, à performance équivalente, l'utilisation du matériau bois génère beaucoup moins d'émissions de gaz à effet de serre que d'autres matériaux, et le bois employé comme source d'énergie renouvelable « neutre » vis-à-vis du changement climatique évite l'utilisation de combustibles fossiles, première source d'émission de gaz à effet de serre dans le monde.

La filière forêt/bois et le carbone : un triple effet

Une forêt exploitée séquestre du CO₂ : si la mobilisation des bois constitue à plus ou moins long terme un déstockage de carbone, conduisant à un bilan nul pour chaque tonne de bois exportée, l'utilisation du bois permet de prolonger le stockage du carbone et de diminuer directement les émissions de gaz à effet de serre (GES) en se substituant à des produits à plus fort contenu en énergie fossile (figure 1).

Soulignons qu'à long terme la gestion durable avec récoltes régulières et valorisation énergétique des sous-produits et des produits en fin de vie est plus intéressante pour le climat que la simple conservation des stocks de carbone en forêts (figure 2). Une récente étude réalisée en Suisse a démontré, grâce à des simulations, que le bénéfice « carbone » à l'échelle nationale, est plus grand dans le cas où la forêt est exploitée de façon durable et le bois produit utilisé que dans le cas où la forêt évoluerait sans intervention du forestier. Ce constat s'explique en grande partie grâce aux effets de substitution suite à l'utilisation de bois énergie et de bois matériaux en remplacement d'autres matériaux.

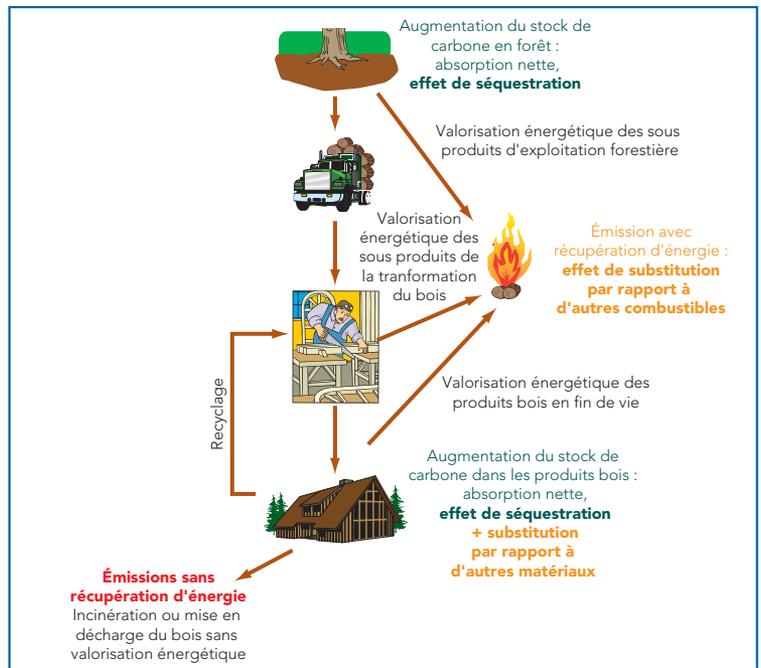


Fig. 1 : séquestration et émissions évitées de carbone suite à la croissance du peuplement forestier et à l'utilisation des produits bois

Prolongement de la séquestration du carbone dans les produits bois

Selon le GIEC, un m³ de bois stocke environ 1 tonne de CO₂. Ce stockage se prolonge jusqu'à la décomposition du bois ou à sa

combustion. Ce temps de stockage est en moyenne de 18 ans en France.

Des travaux ont été menés en 2005 afin de chiffrer les durées de vie des produits selon la filière d'utilisation du bois, en particulier dans

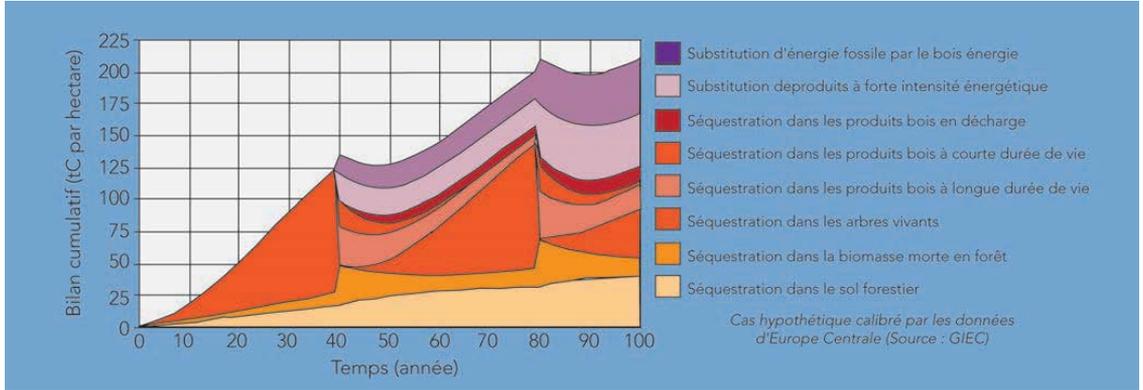


Fig. 2 : bilan cumulatif de séquestration et d'émissions évitées suite au boisement d'un terrain nu et à l'exploitation des arbres à maturité

le cadre d'un rapport du CTBA à l'ADEME suite au programme de Gestion des Impacts du Changement Climatique. Ces travaux ont permis de calculer les durées de vie apparente, c'est-à-dire l'espérance de vie d'une quantité de bois qui entre dans la filière, et non une durée de vie d'un produit fini. Cette approche est pertinente car elle permet de considérer l'intégralité de la grume (les chutes sont donc prises en compte). Les durées de vie apparentes par filière sont les suivantes : 20 mois pour le bois énergie ; 26 mois pour les papiers/cartons ; 3,9 ans pour l'emballage ; 9,1 ans pour la construction et 8,5 ans pour l'ameublement (Vallet, 2005).

Au niveau français, le stock de carbone dans les produits bois est estimé autour de 200 MteqCO₂ (soit presque 40 fois moins que le stock de carbone forestier). L'utilisation des produits bois sur le territoire français (y compris les bois importés) aurait un effet « puits de carbone » du fait de la séquestration de carbone de quelques millions de tonnes de CO₂ par an.

Le bois : un matériau sobre en énergie grise

C'est grâce à l'énergie solaire que le matériau bois est « produit » par les arbres. C'est principalement grâce aux énergies fossiles que l'homme « produit » des matériaux

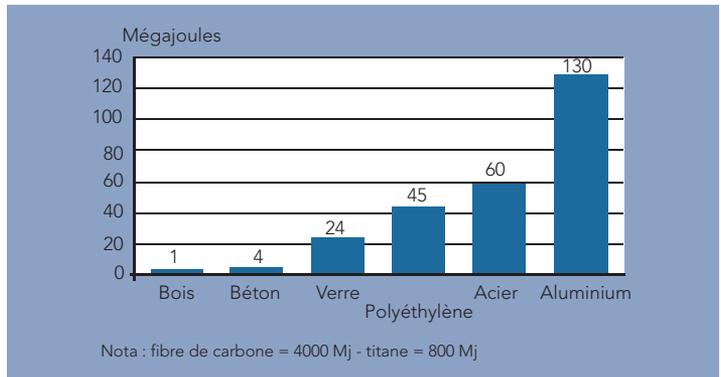


Fig. 3 : énergie consommée pour la production de 1 Kg de divers produits

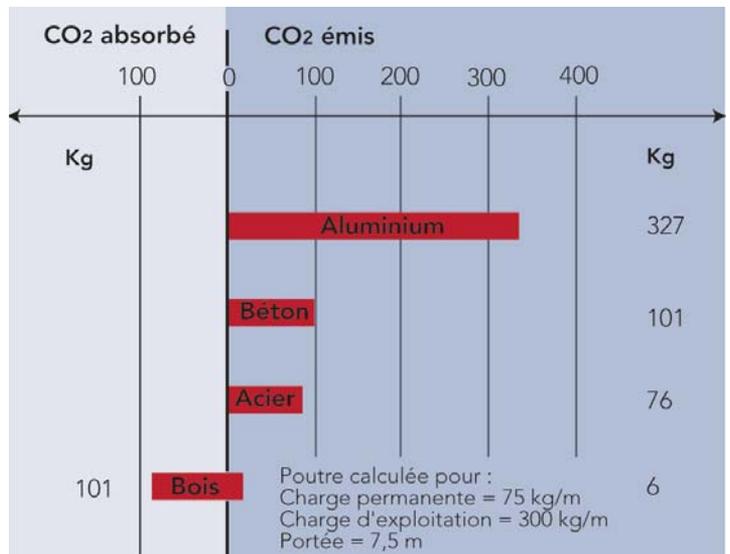


Fig. 4 : émissions de CO₂ pour la fabrication d'une poutre selon le matériau utilisé

	Habitat	Tertiaire	Industrie		Réseau de chaleur		Électricité
			Chaleur	Cogé.	Chaleur	Cogé.	
Gaz Naturel	1.5	1.5	1.5	1.1	1.8	1.1	0.7
Houille	2.6	2.9	2.6	2.2	2.9	2.2	1.8
Pétrole	1.5	1.5	1.8	1.5	1.8	1.5	1.1

Tab. 1 : réduction d'émissions de carbone par tonne de bois substituée aux énergies fossiles en fonction des secteurs, en t CO₂ par tonne de matière sèche de bois

comme le béton ou l'acier. Avant son utilisation finale, le matériau subit un ensemble de transformations et de transports, eux-mêmes très consommateurs d'énergie. Ainsi l'utilisation du bois comme matériau aboutit, dans la plupart des cas, à de moindres consommations d'énergie que d'autres matériaux comme le béton, l'acier ou l'aluminium. Cette moindre consommation d'énergie engendre de moindres émissions de CO₂ (figures 3 et 4).

L'accord cadre Bois Construction Environnement de 2001 a réalisé une première synthèse sur le sujet. On peut retenir le chiffre global retenu par cet accord : l'utilisation d'1 m³ de bois supplémentaire dans le secteur de la construction permet d'éviter les émissions de 0,8 t de CO₂.

Bois énergie et effet de substitution

L'utilisation du bois comme source d'énergie est neutre vis-à-vis du carbone : les émissions de CO₂ liées à la combustion du bois sont compensées par la croissance des arbres dans les forêts gérées de manière durable. Il peut ainsi se substituer à des énergies fossiles et éviter les émissions de CO₂ associées. Les potentialités sont larges pour le bois énergie, notamment pour les bois économiquement « pauvres », les déchets forestiers comme les rémanents de coupe, les sous-produits de dépressage, mais aussi tous les déchets de l'industrie du bois.

Cet effet de substitution dépend de plusieurs facteurs, notamment le secteur d'utilisation de l'énergie où a lieu la substitution, la technologie utilisée pour la production d'énergie à base de produits bois, et la filière effectivement remplacée.

Le « bilan de substitution » ou « taux de substitution » correspond aux émissions évitées de CO₂ par tonne de bois énergie utilisée (tonne de matière sèche). Les données du tableau 1 prennent en compte le carbone émis pour le conditionnement et l'approvisionnement du produit bois, le rendement de conversion en énergie, le carbone qui aurait été émis pour le conditionnement et l'approvisionnement du combustible fossile substitué, le rendement prévu de conversion en énergie de ce combustible fossile et le carbone qui aurait été émis par la combustion du combustible fossile (Dameron, 2005).

Pour conclure

L'utilisation de produits bois permet donc de stocker du carbone et d'éviter des émissions de GES en se substituant à des matériaux « énergivores » comme le béton ou l'acier ou directement aux énergies fossiles dans le cas du bois énergie.

La participation de la forêt à la lutte contre le changement climatique ne doit donc pas simplement se concevoir comme une simple conservation des stocks de carbone dans les écosystèmes mais

comme une véritable gestion durable de la ressource avec récoltes régulières et valorisation énergétique des sous-produits et des produits en fin de vie.

Clément CHENOST

Consultant Carbone et Changement Climatique
Ernst & Young Sustainability Assurance and Advisory Services

Marianne RUBIO

Chargée de mission effet de serre
ONF — DEDD

Bibliographie

DAMERON V., BARBIER C., RIEDACKER A., 2005. Les réductions potentielles d'émissions de CO₂ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050. In Le stockage du CO₂. Les cahiers du CLIP, n°17, 92 p.

MALSOT, J., DEROUBAIX G., PAQUET Ph., RAJI S., PRIEUR A., LOCHU S., 2005. Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois. In VIIIème Colloque ARBORA "Carbone, forêt, bois : Impacts du changement climatique, Stratégies pour la filière ?", pp. 307-324

Federal Office for the Environment, 2007. The CO₂ effects of the swiss forestry and timber industry: scenarios of future potential for climate-change mitigation. Berne, Suisse : Federal Office for the Environment. 102 p. <en ligne : <http://www.bafu.admin.ch/php/modules/shop/files/pdf/phpKVkm5f.pdf>>

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. Champenoux : LERFoB Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois. Thèse de doctorat de l'Engref. 195 p.

Forêt et carbone : les forestiers s'impliquent

La forêt française séquestre l'équivalent de 12 % des émissions de gaz à effet de serre nationales tous les ans mais, au-delà, le forestier peut prendre des initiatives pour optimiser la contribution d'une forêt gérée durablement à l'atténuation du changement climatique et faire reconnaître ce rôle actif de la forêt par la participation aux mécanismes de marché prévus dans le protocole de Kyoto. La mise en place de projets de démonstration puits de carbone en France apportera des éléments concrets pour mieux intégrer la forêt aux mécanismes de lutte contre le changement climatique.

France Forêts à l'initiative d'un dispositif de sites de démonstration « puits de carbone »

La superficie de la forêt française ainsi que le volume moyen de bois sur pied par hectare de forêt s'accroissent (MAP, 2005). Cette augmentation du volume de bois sur pied en France entraîne un stockage de carbone dans les peuplements. La forêt joue un rôle de « puits de carbone » et, par conséquent, constitue un outil de lutte important contre l'effet de serre. Par leurs décisions de gestion, les forestiers agissent sur le stockage du carbone en forêt et dans les produits bois. Ils disposent, du fait des différents choix de sylvicultures possibles, de moyens d'agir sur les quantités de carbone stockées et sur la qualité des produits exploités.

Dans ce contexte, l'association France Forêts, qui regroupe les propriétaires forestiers publics et privés, s'appuie sur des sites de démonstration représentatifs de la forêt française : elle met en place une trentaine de sites forestiers dont l'objectif est de servir d'exemple de gestion pour améliorer le bilan carbone. Ces différents projets permettent de disposer d'un éventail de sites de démonstration en forêt française, chacun relevant d'une problé-

matique spécifique de gestion sylvicole. Ce dispositif permet ainsi d'expérimenter et de comparer des évolutions de gestion et de choix techniques orientés vers l'amélioration du bilan carbone.

Ces projets s'inscrivent dans le respect de la conservation de la biodiversité et de la gestion durable du patrimoine naturel. Dans la mesure des connaissances disponibles, sur ces sites, les choix des essences et de la sylviculture appliquée seront effectués en prenant en compte les conditions d'adaptation au changement climatique et les risques climatiques et sanitaires.

Les objectifs du dispositif France Forêts et le choix des sites

Les objectifs du dispositif sont multiples :

- améliorer la connaissance du bilan carbone de la gestion forestière, en terme quantitatif et économique, à l'échelle d'une propriété forestière et identifier les leviers d'action du gestionnaire sur le bilan carbone ;
- identifier les scénarios sylvicoles qui optimisent le bilan carbone en forêt et quantifier l'impact des sylvicultures préventives (prévention des incendies de forêts, etc.) ;

■ établir des méthodologies permettant la mise en place de puits de carbone biologique sur le territoire français et la rémunération, via des « actifs carbone », des quantités de carbone séquestrées.

Les sites de démonstration concernent les types de gestion les plus représentatifs tant au niveau du type de peuplement (futaie régulière ou irrégulière, taillis simples ou sous futaie) qu'au niveau de l'origine du peuplement : régénération naturelle, plantation après coupe rase, boisement de terre agricole...

Les situations ou choix de gestion pouvant influencer le bilan carbone sont variés. Ce sont par exemple, à titre indicatif, la plantation forestière sur terrain non boisé (exemples en encadrés) ou des actions en lien avec la gestion forestière appliquée (voir encadré sur la boîte à outils du forestier) comme :

- la dynamisation de la sylviculture : modification du rythme et de l'intensité des éclaircies, choix de l'âge d'exploitabilité...
- la substitution d'essence,
- l'amendement sur terrain acide,
- le choix de la structure du peuplement (régulier, jardiné, taillis...),
- la reconstitution après incendie, tempête...

Un exemple de site France Forêts : la commune de Narbonne s'engage dans la réalisation d'un puits de carbone



ONF-DMD

Pour mettre en place sa politique de développement durable, la Ville de Narbonne s'est appuyée sur des études d'impacts réalisées en 2004 (état des lieux des dépenses énergétiques, tous secteurs d'activités confondus). Un certain nombre d'actions concrètes ont été lancées pour réduire la consommation énergétique et la production de gaz à effet de serre avec comme fil rouge, un Agenda 21 Local qui a obtenu le label du MEDAD en 2007.

Le « puits de carbone biologique », réalisé avec le soutien technique de l'ONF, vient compléter ce dispositif. Cette plantation de 27 ha est réalisée sur le site d'Aussières, localisé au sud-ouest de la ville, et recouvert par un maquis bas composé principalement de chênes kermès et de genêts d'Espagne, habitat commun et abondant dans ce secteur. Cette formation naturelle a été dégradée par d'anciennes activités humaines auxquelles ont succédé des incendies répétés dès l'après-guerre.

Dans son exploration des différentes voies de lutte contre l'effet de serre, la Ville de Narbonne a souhaité valoriser ces terrains par un boisement de type « puits de carbone » s'appuyant sur les standards internationaux en la matière. Douze essences différentes ont été utilisées pour la plantation, avec une prédominance des résineux (pin pignon, cèdre de l'Atlas, cyprès, chêne truffier...). Afin de limiter l'impact du projet, plusieurs ajustements ont été opérés : des plantations à faible densité, une mécanisation limitée et le maintien du maximum de végétation naturelle notamment dans les cèpées de chêne vert.

Grâce à la photosynthèse, la plantation en croissance doit permettre la séquestration du carbone atmosphérique dans les arbres. Mais elle a une portée qui dépasse le seul objectif climatique, elle doit aussi :

- protéger les sols contre l'érosion, restaurer les conditions écologiques des milieux et notamment de leur biodiversité,
- réhabiliter les points noirs paysagers,
- restaurer le rôle social de ces espaces par l'intégration d'un programme d'équipements d'accueil du public respectueux des milieux,
- protéger contre les incendies de forêt par une sylviculture préventive complétée par des équipements de protection (débroussailllements périmétraux...),
- préserver et favoriser une forêt méditerranéenne diversifiée et en bonne santé pour relever les défis de l'adaptation aux changements climatiques, particulièrement prégnant en zone méditerranéenne.

Le Bois de la Roussière, un site France Forêts en forêt privée — Boisement de terres agricoles



C.Drénou, IDF

■ **Éléments de contexte :**
Région Poitou – Charentes, département des Deux Sèvres (79)
Boisement de terres agricoles réalisé en 1990, sur une parcelle agricole abandonnée. Ce site est représentatif de la vague des boisements de terres agricoles qui ont été aidés par l'Union Européenne.

■ **Objectif du projet :**

Produire du bois de qualité sur des terres délaissées. Relancer une production dans un objectif de production de bois d'œuvre en 70 ans, avec des éclaircies. Ce site présente l'intérêt d'une séquestration forestière supplémentaire. Le pin laricio est une essence qui a été beaucoup utilisée en boisement de terres agricoles en France.

Mise en œuvre du dispositif et perspective de projets domestiques « officiels »

Le recours à la modélisation, grâce aux travaux de l'INRA et de l'Engref, permet d'estimer à l'aide de modèles de croissance existants la séquestration de « carbone » dans la biomasse aérienne (voir encadré en fin d'article). Sur certains sites du dispositif, des mesures *in situ* seront régulièrement effectuées sur les peuplements. Dans la mesure des connaissances disponibles, des procédures pourront être également définies pour l'estimation de la biomasse racinaire, du carbone dans les sols et dans les produits bois, de l'influence des aléas, etc. L'impact du changement clima-

Six façons de lutter contre le changement climatique : la boîte à outil du forestier

1. Augmenter les surfaces boisées

Au niveau français et européen, la surface couverte par la forêt augmente de façon régulière, du fait notamment de la déprise agricole : + 40 000 ha/an en France entre 1993 et 2004 (Source Agreste). L'impact du boisement sur le stock de carbone total par unité de surface est très nettement positif en raison du stock de carbone de la biomasse très élevé en forêt par rapport aux prairies et aux cultures. En revanche, le boisement a souvent un effet négatif sur le stock de carbone du sol à court terme (5 premières années) et un effet variable à plus long terme (-12 % à +12 %).

2. Diminuer les risques de catastrophes naturelles (incendie, chablis...)

Dès à présent, les forêts européennes subissent les conséquences des modifications du climat, notamment sous la forme de la multiplication des événements « exceptionnels » : tempêtes de 1999 ou de 2005, sécheresse et canicule de 2003... directement responsables de la destruction de peuplements sur des milliers d'hectares de forêts ou de dépérissements de parties importantes de massifs forestiers. L'augmentation de la fréquence des accidents climatiques s'accompagne également de celle des incendies de forêt et des attaques sanitaires. C'est pourquoi il est important d'optimiser la gestion des risques naturels de manière à limiter les risques de perte de stock.

3. Identifier les pratiques sylvicoles optimisant le bilan carbone en forêt

Les stocks de carbone de la biomasse et du sol sont fortement influencés par le climat et par les conditions pédologiques. Le choix de l'essence peut être déterminant sur le stock total de carbone dans l'écosystème, et en particulier sur le stock de carbone du sol : des différences allant jusqu'à 90 tC/ha ont été observées sur le stock de carbone du sol selon les essences. Peu d'études portent sur l'effet du mélange ou de l'irrégularité en structure sur le stockage du carbone.

Les études menées sur la durée de révolution montrent que son allongement conduit à une augmentation du stock contenu dans la biomasse en forêt. En revanche l'accroissement moyen, et donc la vitesse de séquestration de carbone par la biomasse, est maximal pour une durée de révolution moyenne, variable selon les essences et les conditions stationnelles.

Quelques rares études intègrent le bilan carbone de la « forêt » et des « produits forestiers » (effets de substitution et de séquestration ; voir points 5 et 6).

4. Adapter les peuplements au changement climatique

Dans la mesure des connaissances disponibles, le forestier doit tenir compte, dans son choix d'essences et de traitements sylvicoles, des changements climatiques constatés et prévus afin d'assurer, dans une vision à long terme, une gestion durable et optimale du patrimoine forestier.

5. Augmenter l'effet de substitution lié à la production de bois (énergie et matériaux)

Actuellement, la récolte de bois en France métropolitaine est nettement inférieure à l'accroissement biologique, avec un différentiel qui tend à s'accroître. Les causes de cet écart entre accroissement et prélèvement sont nombreuses : augmentation des superficies forestières, impact du prix du bois sur la récolte, augmentation de la productivité des forêts du fait des modes de gestion, des dépôts azotés, de l'augmentation de la concentration en CO₂, de l'allongement des périodes de végétation...

Il est possible d'augmenter les prélèvements sans mettre en péril les ressources et d'accroître l'utilisation du bois, ressource renouvelable et moins énérgivore. Une récente étude réalisée en Suisse a montré qu'il est en effet plus intéressant, en terme de bilan « carbone » à l'échelle nationale, d'exploiter la forêt de façon durable et d'utiliser le bois produit, que de laisser la forêt évoluer sans intervention du forestier. Ce constat s'explique en grande partie par le fait qu'utiliser du bois énergie et du bois matériaux dans certains secteurs en remplacement d'autres matériaux permet de réduire la consommation d'énergies fossiles.

6. Prolonger la séquestration du carbone par une utilisation sur de longues périodes des produits bois

Des potentialités non négligeables existent pour une utilisation plus importante du bois dans le secteur du bâtiment, qui représente actuellement 30 % en volume des utilisations du bois rond, contre 38 % dans le papier, 9 % dans le meuble et 8 % dans l'emballage. La séquestration résultant d'une utilisation du bois dans des produits à durée de vie plus longue apporterait une faible contribution au stockage du carbone du fait que la durée de vie moyenne de l'ensemble des produits restera limitée par rapport à celle du stockage dans les peuplements. En revanche, le bilan carbone global peut être nettement positif en intégrant l'effet « substitution » (voir point 5).

tique sur la croissance des peuplements forestiers n'est aujourd'hui pas modélisable mais les travaux scientifiques initiés sur ce sujet se poursuivent. Par ailleurs, une analyse économique des différents sites « France Forêts » sélectionnés sera menée en tenant compte des coûts des différentes opérations pratiquées.

Ainsi, le dispositif France Forêts per-

mettra d'établir les méthodes et outils nécessaires à la mesure et au suivi du bilan carbone des différentes sylvicultures observées, de réaliser pour le propriétaire forestier le bilan économique de l'opération et d'identifier les « bonnes pratiques » sylvicoles à préconiser.

À ce titre, certains des sites France Forêts seront amenés à participer à la

démarche « officielle » de mise en place de projets domestiques. Rappelons en effet que l'État français a souligné son intention (arrêté du 7 mars 2007) d'utiliser une partie de ses actifs carbone pour mettre en œuvre des projets domestiques carbone, c'est-à-dire des projets de stockage de carbone ou de réduction d'émission se déroulant sur le territoire national. Les conditions d'éligibilité

du secteur forestier pour entrer dans cette démarche devraient être précisées dans un prochain arrêté.

Pour conclure

La filière forêt bois est l'un des seuls secteurs qui est à la fois susceptible d'être profondément perturbé par le changement climatique et un axe majeur d'atténuation du réchauffement grâce à son potentiel de séquestration et d'émissions de CO₂ évitées. L'enjeu pour les forestiers est de développer une capacité d'analyser des itinéraires de gestion au regard des changements globaux et d'avoir une vision stratégique des mécanismes de marché pour stimuler les pratiques vertueuses.

Olivier PICARD

Responsable du Service
Recherche et Développement
IDF — Institut pour le
Développement Forestier

Nicolas ROBERT

Ingénieur de recherche-développement
Laboratoire d'études des res-
sources forêt-bois (LRFoB)
UMR INRA-ENGREF 1092
INRA Champenoux

Marianne RUBIO

Chargée de mission effet de serre
ONF – DEDD

Éric TOPPAN

Conseiller économique
Forestiers Privés de France

Bibliographie

DEWAR R.C., CANNELL M.G.R., 1992. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. *Tree Physiology*, vol. 11, n° 1, pp. 49-71

ERICSSON E., 2003. Carbon accumulation and fossil fuel substitution during different rotation scenarios. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 18, n° 3, pp. 269-278

L'INRA, chargé de la modélisation du bilan carbone

L'association France Forêts s'engage dans une démarche volontaire de mise en valeur de la capacité de la filière forêt bois à stocker du carbone. Sur les sites de démonstration, la gestion appliquée est telle que la forêt puisse remplir ses fonctions économiques, environnementales et sociétales. Pour valoriser le bilan CO₂ de ces forêts, France Forêts a besoin de le quantifier. Cette mission d'estimation de la capacité de stockage de carbone et de limitation des rejets de CO₂ de la filière a été confiée au Laboratoire d'étude des ressources forêt bois (Lerfob, INRA-Engref). Pour quelques sites et essences définies comme le douglas, peuplier, chênes, hêtre, des scénarios sylvicoles alternatifs seront simulés à l'aide de modèles, en envisageant différentes structures...

L'objet du travail est d'élaborer un outil de simulation du stockage de carbone en forêt et de limitation des rejets de CO₂ en fonction de scénarios sylvicoles et d'utilisation des produits bois. Il consiste en l'articulation de modèles existants (parmi lesquels des modèles de croissance et d'utilisation des bois) sur la plateforme Capsis (<http://capsis.free.fr/>). Le projet a débuté en novembre 2007 et durera trois ans.

Federal Office for the Environment, 2007. The CO₂ effects of the swiss forestry and timber industry: scenarios of future potential for climate-change mitigation. Berne, Suisse : Federal Office for the Environment. 102 p. <en ligne : <http://www.bafu.admin.ch/php/modules/shop/files/pdf/phpKVkm5f.pdf>>

MAP Ministère de l'agriculture et de la pêche, IFN. 2006. Conservation et amélioration appropriée des ressources forestières et de leur contribution aux cycles mondiaux du carbone. In Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises. Edition 2005, Paris : Ministère de l'agriculture et de la pêche, pp. 11-28 <en ligne : http://www.ifn.fr/spip/rubrique.php3?id_rubrique=80>

KAIPAINEN T., LISKI J., PUSSINEN A., KARJALAINEN T., 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science and Policy*, vol. 7, n° 3, pp. 205-219

LADEGAARD-PEDERSON P., ELBERLING B., VESTERDAL L., 2005. Soil carbon stocks, mineralization rates, and CO₂ effluxes under 10 tree species on contrasting soil types.

Canadian Journal of Forest Research, vol. 35, n° 6, pp. 1277-1284

LASCH P., BADECK F.W., SUCKOW F., LINDNER M., MOHR P., 2005. Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management*, vol. 207, n° 1-2, pp. 59-74

OOSTRA S., MAJDI H., OLSSON M., 2006. Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 21, n° 5, pp. 364-371

SEELY B., WELHAM C., KIMMINS H., 2002. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem : results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management*, vol. 169, n° 1-2, pp. 123-135

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. Champenoux : LRFoB Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois. Thèse de doctorat de l'Engref. 195 p.

ONF International, un acteur engagé contre le changement climatique

Depuis sa création en 1997, ONF International, filiale de l'ONF, s'est progressivement imposé comme un acteur de référence dans la valorisation du rôle des forêts dans la lutte contre l'effet de serre. Au-delà des projets forestiers de grande ampleur à vocation de puits de carbone, son expertise de projets « carbone » s'est développée en parallèle à son implication dans les négociations internationales liées au protocole de Kyoto. ONFI appuie également les pays dans la définition de leur stratégie forêt et s'investit dans le développement des usages énergétiques du bois issu de forêts gérées durablement.

Gérer durablement les ressources naturelles et le patrimoine forestier

ONF International (ONFI) a été créé en 1997 pour porter les activités de l'Office national des forêts à l'étranger ; il s'appuie sur l'expérience de l'ONF qui gère pour le compte de l'État et des collectivités plus de douze millions d'hectares de forêts et d'espaces naturels en France métropolitaine et dans les DOM. ONF International intervient sur tous les types de massifs forestiers tempérés et tropicaux dans de nombreux pays d'Afrique, d'Europe, d'Amérique du Sud et d'Asie et déploie ses actions sur l'ensemble des domaines relatifs à la gestion durable des écosystèmes.

ONFI a orienté son cœur de métier dans la gestion durable des forêts et des ressources naturelles au travers d'activités regroupées dans les domaines d'intervention suivants :

- aménagement durable des forêts : inventaires, planification d'aménagements, gestion durable, formation, certification ;



- mise en place de projets de boisement et de reboisements ;
- gestion d'aires protégées, conservation, biodiversité ;
- montage de projets puits de carbone : développement de projet, élaboration de méthodologies, mesures et vérifications, finance carbone. Montage de projets carbone « déforestation évitée » ;
- appui à la définition de stratégies nationales carbone, négociation, politiques forestières et environnementales ;
- tourisme, espaces verts ;
- gestion des risques naturels, lutte contre les incendies.

Dans le cadre de ses activités, ONF International a créé trois filiales en

Amérique Latine et une en Afrique afin de promouvoir la gestion durable des écosystèmes forestiers.

Son expérience dans l'élaboration de projets complexes l'amène à collaborer avec de nombreux clients et partenaires : bailleurs multilatéraux (Banque mondiale, Union européenne, Organisation internationale des bois tropicaux, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Commission économique pour l'Amérique Latine) et bilatéraux (Fonds français pour l'environnement mondial, Agence française de développement, ministère des Affaires étrangères, Ministère de l'Économie et des Finances,

Coopération allemande, Inter coopération suisse), exploitants forestiers, partenaires privés en France, en Europe et dans les pays en développement.

Naturellement, ONF International a particulièrement développé ses interventions dans le domaine du changement climatique et de la lutte contre l'effet de serre, pour mettre en œuvre et renforcer la contribution des forêts à l'atténuation du changement climatique. Car, comme l'a souligné le rapport 2007 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « les activités d'atténuation dans le secteur forestier peuvent réduire considérablement les émissions des sources et augmenter l'absorption du CO₂ par les puits ».

La mise en œuvre de puits de carbone à grande ampleur

ONF international s'est confronté à la thématique de l'effet de serre et du carbone dès ses premiers projets.

Des expériences pionnières au Chili et au Brésil

En 1997, un premier projet pilote (Conservation de la forêt tempérée chilienne) réalisé avec les services forestiers chiliens (CONAF) et financé par le Fonds français pour l'environnement mondial et le ministère des Affaires étrangères a permis de mettre en place un système de gestion multifonctionnel et durable de la forêt dans la réserve nationale de Malleco et le parc national de Tolhuaca. Un de ses objectifs est de **mesurer l'impact des opérations de gestion durable sur la séquestration de carbone** et de les comparer avec d'autres modes de gestion des forêts chiliennes.

La même année l'ONF met en place le projet « Puits de carbone Peugeot ONF » au Brésil, dans l'État du Mato Grosso. Ce projet, géré par ONF International, est mis en œuvre sur une propriété de 10 000 hectares



Plantation de de painera (*Chorizia speciosa*)

ONF International

située sur le front pionnier de déforestation amazonien. Cette propriété comprend 7 000 hectares de forêt naturelle, 1 000 hectares de zones de ripisylves, et 2 000 hectares anciennement occupés par des pâturages extensifs et aujourd'hui reboisés. Les reboisements sont composés à 80% par des espèces natives amazoniennes (dont le painera, en photo, espèce de la famille des bombacacées) et à 20% par du teck (*Tectona grandis*) qui sert d'étalon pour la comparaison des résultats des autres espèces. Pas moins d'une cinquantaine d'espèces ont pu être testées sur ce dispositif. Les objectifs de ce projet sont multiples :

- Programme **Carbone** : mesurer la contribution des reboisements à la lutte contre le changement climatique par la mise en place de méthodologies et la réalisation de mesures de terrain – le dispositif de mesure est complété par une tour de mesure de flux de carbone ;

- Programme **Sylviculture tropicale** : étudier le comportement des espèces natives amazoniennes ;

- Programme **Biodiversité** : étudier les processus de récupération des anciens pâturages et la recolonisation des espèces naturelles, étudier le retour de la

faune sauvage dans les zones de plantations (ce programme réalisé par l'université fédérale du Mato Grosso est appuyé par les équipes de l'ONF Guyane). Certaines espèces, rencontrées sur la Fazenda, comme celle présentée en photo, restent une énigme pour les chercheurs.

■ **Programme Forêt naturelle** : évaluation des stocks de carbone et mise en place d'un aménagement durable multifonctionnel sur les 7 000 hectares de forêt naturelle de la propriété.

■ **Programme Développement local** : mise en place d'actions à destination des communautés locales et des municipalités voisines (programme d'éducation environnementale, programme de collecte de noix du Para avec les petits propriétaires en partenariat avec le PNUD, programme de dons de plants, etc.).

Le projet « Puits de carbone Peugeot ONF » est coordonné par un comité scientifique qui réunit une quinzaine de chercheurs brésiliens et français appartenant à des institutions diverses (EMBRAPA, INPA, universités brésiliennes, Muséum national de Rio de Janeiro, INRA, IRD, CNRS). Peugeot et l'ONF se sont engagés dans ce partenariat pour une période de 40 ans (1998-2038).

Des expériences concrètes en Colombie, au Chili, au Cameroun, à Madagascar et en Haïti

Depuis 2000, ONF International met en œuvre un projet d'aménagement du bassin versant du Rio Magdalena, le plus grand cours d'eau de Colombie, en partenariat avec CORMAGDALENA, entreprise responsable de la navigation sur ce fleuve. Il s'agit d'apporter son concours à la réalisation de la cartographie complète du bassin, de mettre en place des projets de lutte contre l'érosion, de protection des berges et de



Batracien rencontré sur le site de Fazenda

ONF International



Plantations de melina (Gmelina arborea) sur la côte caribéenne colombienne

ONF International



Pesée de biomasse en forêt naturelle au Chili

ONF International

réaliser un programme de reboisement. Ce programme est appuyé par le Fonds français pour l'environnement mondial.

Le programme de reboisement s'inscrit dans le cadre du Mécanisme pour un développement propre (MDP). Il est développé avec les petits et moyens éleveurs de la côte caraïbe et totalise aujourd'hui près de 4 000 hectares composés principalement de teck (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*) et ceiba (*Bombacopsis quinata*). Une méthodologie spécifique a dû être développée pour répondre aux spécificités du projet. Elle est en voie de révision par le comité exécutif du MDP.

Au Chili, un autre projet pilote, le projet PROMACIN, réalisé également en partenariat avec la CONAF a permis la réalisation de 850 hectares de reboisements chez des petits propriétaires mapuches dans la région de l'Araucanie. Le projet prévoit la réalisation des mesures de terrain en 2008 pour estimer les quantités de carbone séquestrées et la mise en place de contrats de vente de certificats carbone permettant d'alimenter un fonds à l'usage des communautés mapuches. Les méthodologies employées sont les méthodologies « petite échelle » développées par le comité exécutif du MDP. ONF International met également en place un projet complémentaire de 200 hectares pour le compte de l'association Good Planet de Yann Arthus Bertrand.

Au Cameroun, à Madagascar et en Haïti, ONF International développe un programme de reboisement en partenariat avec la mairie de Paris dans le cadre du programme « un Parisien, un arbre ». Le programme prévoit la mise en place de 2 100 hectares de reboisements dans ces trois pays dans les cinq prochaines années.

Au-delà des projets puits de carbone, une expertise « carbone » globale

ONF International apporte également son concours à des partenaires privés et des porteurs de projets pour la réalisation de différentes expertises.

■ **Développement de nouvelles méthodologies** dans le cadre du MDP : ONF International est à l'origine de deux méthodologies sur les 23 déposées auprès du comité exécutif du MDP. La première pour un projet en Colombie, la seconde développée pour un projet de reboisement d'hévéa avec des petits propriétaires au Ghana. Cette dernière a reçu un « B » (acceptée sous réserve de modifications) et est en phase d'approbation. Seules dix méthodologies pour des projets de boisement / reboisement ont été approuvées dans le monde à ce jour. ONF International révisé également les méthodologies présentées par les autres projets pour le compte du comité exécutif ou de la Banque mondiale. ONF International a également appuyé les équipes de l'ONF pour la transposition des méthodologies internationales dans le cadre de projets développés sur le sol français.

■ **Identification de projets et appui à la rédaction des documents de projets** : ONF International appuie un certain nombre de développeurs pour la rédaction de leurs documents de projet (dossier de présentation de projet, plan de financement, méthodologies). Dans les pays du bassin du Congo par exemple, il a conduit depuis 2006, en partenariat avec le CIRAD, le projet COMIFAC MDP de formations dans le domaine du MDP et l'identification de projets. Le PNUE prend le relais en 2008 et 2009 avec le projet Cascade qui prévoit également un appui aux porteurs de projets dans sept pays africains.

■ **Appui aux pays dans leur stratégie forêt / carbone** : plusieurs missions sont réalisées auprès des autorités de pays du Sud pour les appuyer dans le cadre de leur réflexion sur la stratégie nationale forêt / carbone (Tanzanie et Cambodge notamment).

■ **Appui à la négociation** : depuis 2001, ONF International organise des ateliers de préparation à la négociation pour les experts forêts climat des pays d'Amérique Latine en partenariat avec le Centre agronomique tropical de recherche et d'enseignement (CATIE) basé au Costa Rica. Ces séminaires soutenus par la coopération française portent sur le thème des projets forestiers MDP et de la déforestation évitée. Un autre projet initié en 2006 auprès des pays du bassin du Congo, et financé par le ministère des Affaires étrangères, propose également un appui aux pays du bassin du Congo dans le cadre de la négociation sur les changements climatiques.

■ **Formation** : plusieurs interventions et formations sont réalisées par ONF International sur les thématiques carbone et MDP. Ces formations se déroulent notamment en France (ENGREF Nancy et Montpellier), en Afrique Centrale (projet COMIFAC MDP) et en Colombie (Université du Tolima, OIBT).

La mise en place de projets biomasse énergie

Les projets biomasse énergie (production d'électricité et de chaleur à partir de biomasse) sont également éligibles au Mécanisme pour un développement propre et peuvent générer à ce titre des crédits carbone.

En Colombie, une étude développée avec AREVA vise à mettre en place des centrales de cogénération électrique alimentées par des déchets agricoles (balle de riz ou

branches de palmiers). Cette étude est financée par un fonds FASEP.

En Afrique Centrale, une étude globale sur les disponibilités de déchets bois dans les entreprises forestières a été menée pour le compte de l'Association technique internationale des bois tropicaux en partenariat avec le CIRAD (Unité biomasse énergie) et le bureau d'études Forêt Ressources Management. Elle vise à analyser les quantités de déchets bois disponibles dans les industries forestières d'Afrique Centrale (unités de sciage et de déroulage) afin d'évaluer la faisabilité d'un projet de mise en œuvre de centrales de cogénération (production de chaleur et d'électricité) – l'étude aborde les aspects technologiques, économiques et évalue l'effet levier apporté par le MDP.

Conclusion

Aujourd'hui l'importance du rôle de la forêt dans la régulation du climat est de plus en plus reconnue. Cela se traduit aussi bien au niveau français (prise en compte des forêts dans l'inventaire Kyoto, mise en place de projet de reboisement « puits de carbone ») qu'au niveau international (reboisements MDP, projets de compensation volontaire ou de lutte contre la déforestation tropicale).

ONF International a acquis au cours de ces 10 dernières années une expérience et une expertise en termes de développement de projet, de méthodologies et de finance carbone qui en font l'un des acteurs clés de la thématique forêt / carbone en France et à l'international.

Yves-Marie GARDETTE
ONF International

Martin PERRIER
ONF International



Les marchés du carbone forestier

En pleine expansion aujourd'hui, les marchés du carbone recouvrent des réalités diverses parfois difficiles à déchiffrer. Du fait de leur contribution à l'absorption de carbone et à l'atténuation du changement climatique, des projets forestiers peuvent vendre des crédits carbone. Il s'agit par exemple de projets de boisement et de reboisement éligibles au Mécanisme pour un développement propre (MDP) du protocole de Kyoto et qui peuvent générer des crédits échangeables sur les marchés du carbone. Des projets forestiers peuvent également vendre des crédits carbone sur les marchés réglementés hors Kyoto et sur les marchés volontaires.

Les marchés carbone représentent une nouvelle opportunité de financement pour dynamiser le secteur forestier au Sud comme au Nord et peuvent aider certains pays ou opérateurs à lever les barrières et les contraintes généralement associées à ce secteur.

Cet article a pour objectif de faire le point sur les différents marchés du carbone et les opportunités existantes pour le secteur forestier. Il s'inspire largement d'une étude réalisée en 2007 par l'ONF International et le Cirad dans le cadre d'un projet d'appui aux pays du bassin du Congo financé par la coopération française (Gardette et Locatelli, 2007).

Marchés du carbone — Les marchés d'engagements contraignants

Deux grands types de marchés carbone fonctionnent actuellement. Les marchés d'engagements contraignants font intervenir des acteurs qui ont des enga-

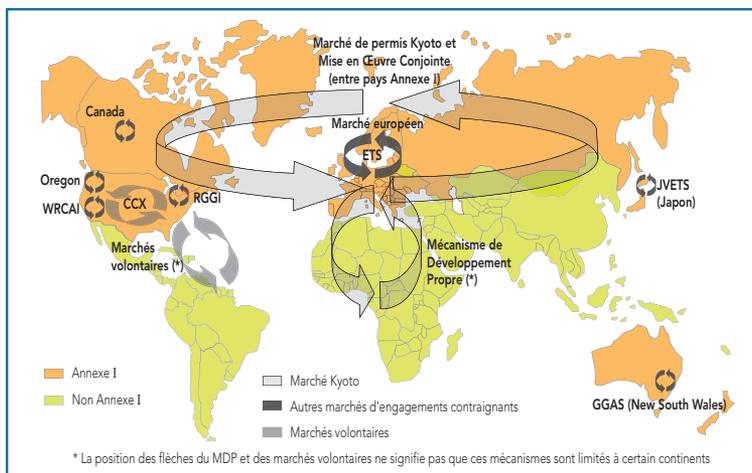


Fig. 1 : marchés d'engagements contraignants et marchés volontaires (adapté de Locatelli, 2005)

gements de réduction d'émission dans le cadre d'accords internationaux ou de politiques nationales. Au contraire, les marchés volontaires que nous verrons plus loin fonctionnent en dehors d'engagements formels de réduction.

Des accords internationaux ou des politiques nationales contraignent des pays ou des acteurs économiques à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et leur attribuent un contingent de droits d'émission qu'ils ont la possibilité d'échanger. Un objectif d'émission totale est fixé et les acteurs réduisent leurs émissions en fonction de leurs coûts de réduction et de la valeur du permis d'émission.

Les systèmes de marchés de permis ou quotas d'émissions sont présents dans le cadre du protocole de Kyoto, dans le cadre de pays ou continents ayant ratifié le Protocole (Union européenne, Royaume-Uni, Japon et Canada) et aussi dans des pays hors Kyoto (États-Unis et Australie) (voir figure 1). Ils ont montré leur effi-

cacité économique pour résoudre des problèmes environnementaux, comme dans le cas des émissions de soufre aux États-Unis (Winebrake et al., 1995).

Le marché du Protocole de Kyoto concerne les pays dits de l'annexe I (ou pays du Nord) ayant ratifié le Protocole (et recensés à ce titre dans l'annexe B ; voir Blanquet et Rubio, ce même dossier). Chacun reçoit une allocation initiale de permis correspondant à son engagement de réduction ; les permis sont détenus par les gouvernements des pays, qui peuvent se les échanger. Au-delà du simple échange de permis, deux mécanismes de flexibilité existent : la Mise en œuvre conjointe (MOC), qui fonctionne entre les pays du Nord (annexe I), et le Mécanisme pour un développement propre (MDP) qui permet à ces mêmes pays de réaliser des projets de réduction des émissions de GES ou de séquestration de carbone dans les pays du Sud (hors annexe I) et de les comptabiliser dans le cadre de leurs obligations nationales.

Le marché européen, appelé EU-ETS (European Union emissions trading scheme), est le dispositif communautaire mis en place par les directives européennes (2003/87/EC dite « quotas » et 2004/101/EC dite « projets ») pour réduire les émissions et atteindre les objectifs de Kyoto. Il est effectif depuis le 1^{er} janvier 2005 et concerne environ 12 000 sites industriels émetteurs de gaz à effet de serre en Europe. Les entreprises se voient attribuer des quotas d'émission au travers des plans nationaux d'attribution des quotas (PNAQ) et peuvent les échanger. Une entreprise qui ne respectera pas ses engagements se verra attribuer une pénalité de 100 € par tonne de CO₂ émise en plus de son quota. Selon la directive « projets », les entreprises européennes peuvent également avoir recours à des crédits MDP ou MOC en plus des quotas internes à l'Europe ; toutefois, seuls les projets de réduction d'émissions (projets énergétiques et industriels) sont concernés, les crédits issus de projets MDP forestiers ne sont pas pour l'instant utilisables dans le système européen (Bosquet, 2006). Des propositions ont été soumises par des ONG ou des scientifiques dans le but d'étendre le marché ETS aux crédits MDP forestiers (Streck et Sullivan, 2006 ; O'Sullivan et al., 2006).

D'autres marchés de pays du protocole de Kyoto fonctionnent ; le Royaume Uni par exemple a décidé de la mise en place d'un marché national du carbone dès 2002. Le Canada et le Japon mettent également en œuvre des marchés nationaux pour veiller au respect des engagements du Protocole.

Des marchés carbone en dehors de Kyoto ont vu le jour aux États-Unis et en Australie, qui ont (ou avaient) décidé de ne pas ratifier le Protocole. Aux États-Unis, malgré l'absence d'initiative du gouverne-

ment fédéral, des pourparlers s'organisent entre les gouvernements d'États pour la mise en place de marchés régionaux (Pew Center, 2006). Ainsi, en décembre 2005, l'initiative RGGI (Regional greenhouse gas initiative) a vu le jour dans sept États du Nord-Est et, en février 2007, la WRCAI (Western regional climate action initiative) a été décidée pour cinq États de l'Ouest. En Australie, un système de réduction des émissions s'est mis en place depuis janvier 2003 dans certains États (GGAS, 2006) ; la ratification récente par les Australiens du protocole de Kyoto devrait ramener le marché australien dans le giron du système Kyoto.

Marchés du carbone — Les marchés volontaires

Dans les marchés volontaires, ou marchés de la compensation, des acteurs achètent des réductions d'émissions pour « compenser » ou « neutraliser » leurs impacts sur le climat : ils deviennent ainsi « neutres en carbone ». Ces individus ou entreprises n'ont pas de contraintes dans leur pays pour lutter contre les changements climatiques mais veulent agir pour des raisons éthiques ou d'image environnementale. Ils achètent des réductions d'émissions sur les marchés volontaires, généralement plus flexibles que les marchés réglementés.

Les marchés volontaires sont parfois reliés aux marchés d'engagements, dans la mesure où les acheteurs volontaires peuvent choisir de compenser leurs émissions en achetant des crédits provenant des marchés d'engagements, comme les quotas du marché européen EU-ETS ou les crédits issus de projets MDP. Cependant, dans la plupart des cas, les réductions d'émissions échangées sur les marchés volontaires sont indépendantes des marchés d'engagements.

Les transactions font l'objet d'accords, généralement de gré à gré, entre des porteurs de projets et des demandeurs de crédits. De nombreux intermédiaires proposent de calculer les émissions des entreprises et des particuliers et de les compenser totalement ou partiellement en achetant des crédits qui servent à financer des projets.

On considère souvent que le marché volontaire présente une grande opportunité pour sensibiliser la société civile sur le changement climatique. Il permet en effet à tout un chacun de mesurer ses émissions de CO₂, c'est-à-dire de relier directement son mode de vie à son impact sur l'environnement. Le calcul de la compensation permet de responsabiliser le public et de lui faire prendre conscience du coût de ses émissions.

Les marchés volontaires représentent des volumes plus faibles (10 à 50 millions de tCO₂ échangés en 2006, entre 100 et 250 millions de US\$) que le marché d'échange de quotas européens (1 100 millions de tCO₂, environ 24 000 millions de US\$) et le marché du MDP et de la MOC (450 millions de tCO₂, environ 4 800 millions de US\$).

Les projets forestiers dans le Mécanisme pour un développement propre, MDP

Les modalités et procédures relatives aux projets MOC ont été développées récemment et très peu de projets sont en cours d'instruction à ce jour. C'est pourquoi nous ne traitons ici que le cas des projets MDP.

Les modalités du MDP forestier sont précisées par trois principales décisions de la Conférence des Parties : la décision 17/CP7 adoptée à Marrakech en 2001, la décision 19/CP9 adoptée à Milan en 2003, et la décision 14/CP10 adoptée à Buenos Aires en 2004 (voir en encadré les principaux critères requis).

Critères requis pour les projets du MDP forestier

Éligibilité : seules les activités de boisement et reboisement sont acceptées dans le MDP forestier. Cette décision écarte les activités de conservation ou de gestion forestière pour la première période d'engagement 2008-2012 (Locatelli, 2001). Boisement et reboisement sont définis comme des changements d'occupation du sol d'un couvert non forestier à un couvert forestier. On entend par « forêt » une terre d'une superficie minimale comprise entre 0,05 et 1 hectare portant des arbres dont le houppier couvre plus de 10 à 30 % de la surface et qui peuvent atteindre à maturité une hauteur minimale de 2 à 5 mètres. Chaque pays hôte doit choisir ces trois paramètres de définition de forêt dans les intervalles fixés. En fonction des définitions, des parcelles d'agroforesterie ou des systèmes sylvo-pastoraux peuvent être considérés comme des forêts. Pour être éligible, un projet de boisement ou de reboisement doit démontrer que le terrain ne portait pas de forêt à la date du 31 décembre 1989 et jusqu'au moment du démarrage du projet.

Additionnalité : l'article 12 du protocole de Kyoto mentionne que seules seront acceptées dans le MDP des « réductions d'émissions s'ajoutant à celles qui auraient lieu en l'absence de l'activité certifiée » (UNFCCC, 1997). Un projet MDP forestier doit donc démontrer que ses absorptions effectives nettes de gaz à effet de serre n'auraient pas eu lieu sans lui. Pour la démonstration de l'additionnalité, toutes les méthodologies de projet MDP forestier se basent sur le même outil accepté par le comité exécutif du MDP (Executive board, 2005).

Niveau de référence : un projet doit établir un niveau de référence qui décrit ce qui se passerait sans MDP. Les absorptions de gaz à effet de serre par les activités du niveau de référence doivent être évaluées et comparées aux absorptions effectives du projet. Seule la différence pourra être l'objet d'une vente de crédits.

Émissions et fuites : les projets forestiers peuvent émettre des gaz à effet de serre, par exemple lors de la consommation de pétrole par les machines, l'utilisation d'engrais ou le nettoyage des parcelles lors de l'installation de la plantation. Ces émissions doivent être comptabilisées et déduites, de même que les émissions induites par le projet à l'extérieur de ses limites, appelées « fuites ».

La non-permanence : le carbone stocké dans une forêt ou une plantation ne l'est pas pour l'éternité. Pour des raisons anthropiques (exploitation, changement d'utilisation du sol) ou naturelles (feux, maladies), le carbone peut être libéré dans l'atmosphère. Une tonne de carbone absorbée dans une plantation ne peut donc compenser une tonne de carbone émise par la production d'énergie (Chomitz, 2000) : une notion de temps doit lui être associée. Alors que les réductions d'émissions par des projets MDP énergétiques correspondront à des crédits permanents, l'absorption par les projets forestiers correspondra à des crédits temporaires (Locatelli et Pedroni, 2004). L'idée est que le crédit peut périmer pour refléter que le stockage peut disparaître.

Méthodologies : l'estimation d'un niveau de référence et du scénario projet (incluant les émissions et les fuites) et l'établissement d'un plan de suivi doivent se baser sur une méthodologie approuvée par le comité exécutif du MDP. En mars 2008, treize méthodologies sont approuvées, dont dix pour des projets de grande échelle et trois pour des projets de petite échelle. Ces méthodologies complexes sont disponibles en ligne sur le site de la convention Climat : http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/approved_ar.html. L'élaboration de nouvelles méthodologies, reprenant certains éléments des méthodologies déjà acceptées, permettra de faciliter l'élaboration de nouveaux projets MDP.

Les modalités et procédures sont facilitées pour les projets dits de « petite échelle », c'est-à-dire les projets qui absorbent moins de 16 000 tonnes de CO₂ par an.

Aujourd'hui, les projets MDP forestiers représentent une fraction très faible des crédits du marché MDP (voir figure 2). Une des raisons est le retard des décisions sur les modalités du MDP forestier sur celles des autres projets MDP (voir figure 3). La première méthodologie relative au secteur forestier a été approuvée par le comité exécutif du MDP fin 2005, plus de deux ans après les autres secteurs. Ce retard cause un préjudice aux projets forestiers dans un marché focalisé sur l'achat de crédits pour la première période d'engagement 2008-2012. Il est d'autant plus pénalisant que les projets forestiers doivent attendre que les arbres croissent avant de pouvoir vendre des quantités significatives de crédits. Le premier projet forestier a été enregistré en 2006.

Les projets MDP forestiers sont défavorisés par rapport aux autres projets MDP par la complexité des méthodologies, qui impliquent de nombreuses mesures de terrain, la démonstration de l'éligibilité des terres ou la délimitation des parcelles plantées. De plus, les autorités nationales doivent fixer leurs paramètres de définition des forêts. Au fur et à mesure de la mise en œuvre des projets, d'autres barrières surgissent, comme les barrières légales à propos des contrats entre les acteurs du projet, des droits de propriété sur les crédits, des contrats de transaction de crédits et de l'imposition des crédits carbone.

Néanmoins, les barrières techniques se réduisent à mesure que croissent l'expérience et les capacités des développeurs de projet et des consultants. Aujourd'hui, même si le montage des projets reste complexe, les principaux

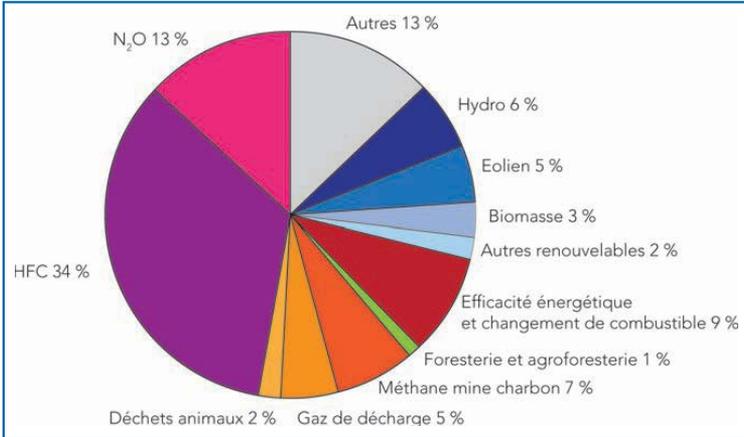


Fig. 2. : part des projets forestiers dans les transactions sur l'ensemble des marchés carbone (d'après Capoor et Ambrosi, 2007)

déforestation. Les projets forestiers des marchés volontaires se caractérisent aussi par leur petite échelle. Selon Harris (2006), 46 % des projets sont très petits (inférieurs à 5 000 tonnes de CO₂ par an), 23 % sont petits (5 000 à 20 000 tonnes par an), 17 % sont moyens (20 000 à 50 000 tonnes par an) et seulement 14 % sont grands (supérieurs à 50 000 tonnes par an).

Les projets forestiers connaissent un essor important dans le cadre du marché volontaire. Selon une enquête menée par l'IIED auprès de 53 fournisseurs de réductions d'émissions sur ce marché (Harris, 2006), près de 56 % des projets seraient des projets forestiers ou d'usage des sols, contre 25 % pour les projets énergie renouvelable et 13 % pour les projets d'efficacité énergétique. La mission Climat de la Caisse des Dépôts estime que 36 % du volume du marché volontaire proviendrait de projets forestiers (Bellassen et Leguet 2007). Une autre analyse de 71 intermédiaires de marchés carbone a montré que 61 % d'entre eux proposent des projets forestiers et 24 % ne proposent que des projets forestiers (Gardette et Locatelli, 2007).

Cet engouement est lié à plusieurs facteurs. D'abord, les projets forestiers amènent des bénéfices socio-économiques aux populations rurales (emploi dans les filières bois, diversification des sources de revenus, lutte contre la pauvreté) et

obstacles au développement de ces projets sont levés : treize méthodologies sont d'ores et déjà disponibles ainsi qu'un certain nombre d'outils officiels pour aider les porteurs de projets à démontrer l'additionnalité, calculer les gains carbone ou choisir la bonne méthodologie.

L'un des principaux facteurs de blocage à l'essor du MDP forestier reste la non-acceptation des crédits forestiers dans le cadre du marché européen EU-ETS. Les entreprises européennes ne sont pas autorisées à en acheter alors qu'elles peuvent avoir recours aux crédits d'autres types de projets MDP. Ce blocage est lié à des facteurs politiques (pression de certains acteurs pour laisser de côté le

secteur forestier) et techniques (complexité liée à l'inclusion de crédits temporaires dans le système européen) ainsi qu'à la méconnaissance qu'ont les décideurs européens de ce type de projet (méconnaissance des aspects techniques et méthodologiques, crainte que les projets forestiers ne génèrent de grandes quantités de crédits susceptibles de déstabiliser le marché).

Les projets forestiers dans les marchés volontaires

Dans le cadre des marchés volontaires, les activités éligibles sont beaucoup plus diverses que les simples boisement et reboisement. Elles peuvent concerner la gestion forestière et la réduction de la

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007...
Décisions sur les modalités et les procédures							
Autres secteurs	x						
Secteurs UCTCF		→	x				
Méthodes approuvées							
Autres secteurs	→		9	19	30	50	121
Secteurs UCTCF		→			1	5	13
Projets enregistrés							
Autres secteurs	→			2	140	560	907
Secteurs UCTCF		→				1	1

Fig. 3 : mise en œuvre de projets MDP dans le secteur forestier (UTCF, Utilisation des Terres, Changement d'affectation des terres et Foresterie), comparaison avec les autres secteurs (Source : CATIE actualisé ONFI)

des bénéfiques environnementaux (lutte contre l'érosion, protection des ressources hydriques, protection de la biodiversité) que les acheteurs de crédits apprécient. Ensuite, ils sont plus attractifs en terme d'image (Harris, 2006) car leurs effets positifs sur le réchauffement climatique sont plus intelligibles pour le grand public (Taiyab, 2006). Le marché volontaire représente donc sans contester une opportunité intéressante pour le secteur forestier.

Sur les 172 projets forestiers recensés en 2007 par Gardette et Locatelli (2007), 51 projets sont localisés aux États-Unis (29,7 %), 32 en Europe (18,6 %, principalement au Royaume Uni, en Allemagne et dans une moindre mesure aux Pays Bas), 28 en Amérique Latine (16,3 %, principalement au Brésil, en Équateur, en Argentine et au Mexique), 25 en Australie (14,5 %), 19 en Asie (11 %, principalement en Inde et en Malaisie) et 4 au Canada. De nombreux projets sont donc mis en œuvre dans les pays de l'annexe I (Australie, États-Unis et Union européenne). La proximité des projets semble être un argument important du marketing des fournisseurs de crédits. Les pays les plus dynamiques dans ce secteur sont justement ceux qui n'ont (ou qui n'avaient) pas ratifié le protocole de Kyoto, les États-Unis et l'Australie qui à eux deux regroupent 44,2 % de l'ensemble des projets recensés (76 projets).

Face aux critiques apportées aux marchés volontaires à propos de leur crédibilité, de l'absence de contrôle et de la transparence, un certain nombre d'organismes et d'ONG développent des standards de qualité (voir encadré).

Un marché à construire pour la déforestation et la dégradation évitées

Selon les dernières données du Groupe d'experts intergouverne-

Les standards de qualité sur le marché volontaire

Les standards inspirés du MDP et MOC : les acteurs du marché volontaire peuvent avoir recours aux règles des mécanismes de projet du protocole de Kyoto, soit en vendant directement des crédits MDP ou MOC sur le marché volontaire, soit en utilisant les mêmes règles, puis en faisant vérifier leurs projets par des organismes certificateurs officiels du MDP.

Le standard VCS : en 2005, The Climate Group (TCG), l'Association Internationale sur les Échanges d'Émissions (IETA) et le World Economic Forum Global Greenhouse Register (WEF) ont souhaité mettre en place un standard destiné aux projets du marché volontaire. Ce standard dit VCS (Voluntary Carbon Standard) a été présenté à la Conférence des Parties de Bali en décembre 2007. Il est valable aussi bien pour des projets de boisement-reboisement, de gestion forestière, de gestion de terres agricoles que de réduction des émissions résultant du déboisement. Il propose des solutions aux problèmes de non-permanence au travers de la mise en réserve d'une partie des crédits générés par le projet (VCS, 2007). Le label australien Greenhouse Friendly propose une approche similaire (Bellassen et Leguet, 2007).

Le standard CCB : l'alliance CCBA (Climate, Community & Biodiversity Alliance), regroupant des ONG (TNC, Conservation International) et des entreprises, a été appuyée techniquement par des centres de recherche pour développer le standard CCB. Il est uniquement destiné aux projets forestiers et s'intéresse surtout, au-delà du carbone, aux bénéfices sociaux et environnementaux associés aux projets (CCBA, 2005).

Le Gold Standard : créé en 2003 par le WWF, l'ONG South South North (SSN) et Hélio International, ce standard ne s'adressait au départ qu'aux projets MDP et MOC et n'était pas spécifique des projets forestiers. L'idée générale était de « labelliser » des projets MDP qui participaient réellement à la lutte contre les changements climatiques et au développement durable. Face au développement du marché volontaire, le Gold Standard a annoncé en 2005 la création d'un standard adapté au marché volontaire : le Voluntary Gold Standard (VGS) qui reprend les mêmes principes que le Gold Standard MDP. Le WWF travaille actuellement au développement d'un standard Gold spécifique aux projets forestiers.

mental sur l'évolution du climat (GIEC), les émissions de gaz à effet de serre issues des activités de changement d'usage du sol représentent 17,4 % des émissions mondiales d'origine humaine, soit moins que le secteur énergétique (25,9 %) et l'industrie (19,4 %), mais plus que le secteur de l'agriculture (13,5 %) et des transports (13,1 %) (Wertz et Rubio 2007). La plus grande partie provient de la déforestation et de la dégradation des forêts dans des pays en développement ; pour certains d'entre eux, la déforestation et la dégradation représentent jusqu'à 70 % des

émissions nationales.

Pourtant, aucun instrument « officiel » n'est prévu pour lutter contre la déforestation ou pour favoriser la gestion durable des forêts dans les pays en développement. Les raisons de l'exclusion de la « déforestation évitée » étaient nombreuses. Elles portaient sur les scénarios de référence (comment prouver, dans une région donnée, que la forêt est menacée de déforestation ?), les fuites (un projet de conservation ne déplacerait pas uniquement le problème dans une autre région ?), la dilution des

efforts (la déforestation évitée ne favoriserait-elle pas l'arrivée sur le marché du carbone de grands volumes de crédits bon marché, ce qui réduirait les efforts des pays de l'annexe I pour réduire leurs émissions ?) ou la souveraineté des pays en développement sur la gestion de leurs forêts.

Lors de la 11^e conférence des Parties de la convention Climat (2005), la Papouasie Nouvelle Guinée et le Costa Rica ont proposé d'inclure dans le cadre de la convention et du protocole de Kyoto des incitations pour réduire la déforestation tropicale. L'idée serait de mettre en place un mécanisme de financement pour la réduction des émissions par la déforestation dans les pays du Sud, communément appelé RED pour « Réduction des émissions résultant du déboisement ».

Cette demande a entraîné l'ouverture d'un processus de négociation qui a été marqué par une participation très active de l'ensemble des pays, au Nord comme au Sud. Cette discussion a été marquée entre autres par la publication en 2006 du rapport Stern, qui indique notamment que le coût pour réduire de 50 % les émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation dans les huit pays responsables de 70 % de ces émissions est de l'ordre de 5 à 15 milliards de dollars par an. En 2007, le GIEC publie son 4^e rapport qui estime que 65 % du potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial se trouve dans les pays du Sud, et que 50 % de cet objectif pourrait être atteint en réduisant les émissions liées à la déforestation.

Le processus de discussion s'est achevé à Bali en décembre 2007. Tous les pays se sont accordés sur la nécessité de mettre en place des actions pilotes sur le RED sur la période 2008/2009 et de renforcer les capacités dans les pays du Sud.

À la demande des pays d'Afrique Centrale, soutenus par certains pays d'Amérique Latine et d'Asie, les émissions liées à la dégradation des forêts ont été incluses dans le champ de la négociation (la déforestation est entendue comme une perte de stock de carbone avec changement d'usage du sol tandis que la dégradation considère une baisse des stocks de carbone sans changement d'usage du sol) : le mécanisme RED s'est transformé en mécanisme REDD pour « Réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts ».

À la demande du Costa Rica, de l'Inde et de la Chine, une fenêtre reste ouverte sur la possibilité de rémunérer aussi l'accroissement des stocks sur pied. Cela se traduit par la mention que les « rôles des actions de conservation et accroissement des stocks de carbone seront étudiés » lors de l'établissement du régime futur. À la demande des pays d'Amérique Latine, les actions pourront être développées au niveau national ou infra national. Cette décision témoigne de la volonté commune d'avancer vite sur le sujet. Les acteurs (coopérations multilatérales et bilatérales, secteur privé, ONG, etc.) sont invités à financer des programmes de renforcement des capacités vers les pays du Sud, des actions de recherche et des activités pilotés sur la période 2008 et 2009 afin de pouvoir définir le futur mécanisme de financement REDD.

Conclusions

Face au développement des enjeux climatiques, un certain nombre de mécanismes financiers se mettent en place en relation avec le secteur forestier et notamment les mécanismes de marché du carbone. Ces marchés du carbone peuvent aujourd'hui être scindés en trois grands marchés : MDP, volontaire et REDD (« Réduction des Émissions résultant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts »).

Le marché du MDP est un marché très compétitif pour les projets forestiers qui souffrent des désavantages par rapport aux autres projets. Les principales barrières auxquelles les porteurs de projets étaient confrontés (absence de méthodologies approuvées, complexité du mécanisme) sont aujourd'hui en passe d'être levées. La principale difficulté qui subsiste est le refus de l'Europe d'inclure les crédits générés par ces projets dans le cadre du mécanisme européen d'échange de quota : elle est donc plus d'ordre politique que technique.

Le marché volontaire est un marché en pleine expansion qui se place aujourd'hui au même niveau que le marché MDP pour le secteur forestier. C'est un marché qui reprend les idées du MDP mais se révèle plus flexible et permet le développement d'activités non éligibles dans le MDP, notamment les activités de gestion forestière et de déforestation évitée. Ce marché volontaire est en cours de régulation par l'établissement de nouveaux standards comme VCS ou CCB.

Le marché REDD est quand à lui en pleine construction. Il fait l'objet d'une négociation active depuis deux ans et pourrait aboutir dans les prochaines années à des mécanismes innovants de financement permettant de lutter contre la déforestation tropicale et d'œuvrer à la protection de ces dernières. Des activités pilotes sont déjà en cours de réalisation et devraient se multiplier dans les prochaines années.

Yves-Marie Gardette

ONF International
ymgardette@hotmail.com

Bruno LOCATELLI

UPR Ressources Forestières
CIRAD Montpellier
bruno.locatelli@cirad.fr

Bibliographie

BELLASSEN B., LEGUET B. 2007. Compenser pour mieux réduire, le marché de la compensation volontaire. Note d'étude de la Mission climat de la Caisse des dépôts, n° 11, 40 p. <en ligne : http://www.riaed.net/IMG/pdf/Caisse_des_depots_Note_sur_la_Compensation_TTI_0907.pdf>

BOSQUET B., 2006. The market for land use, land-use change and forestry : the BioCarbon fund. The World Bank – UNESCO - ProNatura International Forum, 15 mars 2006

CCBA, 2005. Climate, community and biodiversity project design standards. First edition. Washington, USA : Climate, Community and Biodiversity Alliance. 40 p. <en ligne : <http://www.climate-standards.org/images/pdf/CCBStandards.pdf>>

CDM Clean development mechanism Executive Board, 2005. Tool for the demonstration and assessment of additionality in A/R CDM project activities. Report of the 21st meeting of the CDM Executive Board, Sept 2005, Annex 16. <en ligne : <http://cdm.unfccc.int/EB/021/eb21repan16.pdf> >

GARDETTE Y.M., LOCATELLI B., 2007. Les marchés du carbone forestier : comment un projet forestier peut-il vendre des crédits carbone ? Paris : ONF International : CIRAD. 72 p. <en ligne : http://climat.cirad.fr/media/files/les_marches_du_carbone_forestier>

GGAS, 2007. Introduction to the Greenhouse Gas Reduction Scheme (GGAS). NSW Greenhouse Gas Reduction Scheme (GGAS), Australia. 20 p. <en ligne : <http://www.greenhousegas.nsw.gov.au/documents/Intro-GGAS.pdf>>

HARRIS E., 2006. Working paper on the voluntary carbon market : current and future market status, and implications for development benefits. IEDD and nef round-table discussion : Can voluntary carbon offset assist development ?, 26 octobre 2006. Londres, UK : IIED International Institute for Environment and Development. 6 p. <en ligne : http://www.iied.org/CC/document/FINAL_WorkingpaperforIIEDnefRoundtable_ElizabethHarris_2610061.pdf>

LOCATELLI B., 2001. Après Bonn, quel avenir pour les puits de carbone ? Bois et Forêts des Tropiques, n° 271, pp. 110-111

LOCATELLI B., PEDRONI L., 2004. Accounting methods for carbon credits : impacts on the minimum area of forestry projects under the Clean Development Mechanism. Climate Policy, vol. 4, n° 2, pp. 193-204

O'SULLIVAN R., STRECK C., JANSON-SMITH T., HASKETT J., SCHLAMADINGER B., NILES J.O., 2006. Local and global benefits of including LULUCF credits in the EU ETS. Technical workshop on "Using forest carbon credits in the European emission trading scheme", Bruxelles, 29 mars 2006. 5 p. <en ligne : http://www.climatefocus.com/downloads/publications/LULUCF-EUETS_benefits.pdf>

Pew Center, 2006. Understanding and responding to global climate change. Coll. Climate change 101. Washington, USA : Pew Center on Global Climate Change and Pew Center on the States. <en ligne : http://www.pewtrusts.org/uploadedFiles/wwwpewtrustsorg/Reports/Global_warming/Climate101-FULL_121406_065519.pdf>

STRECK C., O'SULLIVAN R., 2006. Briefing Note : LULUCF Amendment to the EU ETS. Technical workshop on "Using forest carbon credits in the European emission trading scheme", Bruxelles, 29 mars 2006 <en ligne : http://www.climatefocus.com/downloads/publications/EUETS_LULUCF_amendment.pdf>

TAIYAB N., 2006. Exploring the market for voluntary carbon offsets. Londres, UK : IIED International Institute for Environment and Development. 42 p. <en ligne : <http://www.iied.org/pubs/pdfs/15502IIED.pdf>>

Voluntary Carbon Standard, 2007. Guidance for agriculture, forestry and others land use projects, 19 novembre 2007. 54 p. <en ligne : <http://www.v-c-s.org/docs/AFOLU%20Guidance%20Document.pdf>>

WERTZ-KANOUNNIOFF S., RUBIO ALVARADO L.X., 2007. Why we are seeing « REDD » : an analysis on the international debate on reducing emissions from deforestation and degradation in developing countries. Coll. Analyses de l'IDDRI, n° 2. Paris : IDDRI Institut de développement durable et des relations internationales. 32 p. <en ligne : http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/An_0702_Wertz&Rubio_REDDupdated.pdf>

WINEBRAKE J.J., FARRELL A.E., BERNSTEIN M.A., 1995. The clean air act's sulfur dioxide emissions market : Estimating the costs of regulatory and legislative intervention. Resource and Energy Economics, vol. 17, n° 3, pp. 239-260

Les cloisonnements sylvicoles ont-ils un effet significatif sur la forme des tiges de hêtre ?

Les avantages des cloisonnements sylvicoles dans les régénérations naturelles et artificielles de futaie régulière sont bien connus : ils réduisent les investissements en facilitant le déplacement et la circulation des ouvriers dans les peuplements ; ils permettent par ailleurs de mieux s'adapter aux capacités humaines des chantiers de travaux. Cependant beaucoup s'interrogent sur les effets des cloisonnements sylvicoles sur les peuplements et suspectent que ces cloisonnements affectent la forme des tiges en favorisant le développement des branches, des fourches et l'inclinaison des tiges.

Une étude dans des peuplements de chêne sessile (Duplat *et al.*, 1997) avait déjà mis en évidence l'absence d'effets défavorables des cloisonnements sylvicoles sur la forme des tiges pour des hauteurs de peuplement de 5 et 8 mètres. La question restait posée pour le hêtre, plus enclin aux défauts de forme. Les largeurs de cloisonnements et de bandes de semis ont-ils un effet direct sur les semis selon leur positionnement dans les bandes ?

À travers une expérimentation conduite sur le hêtre depuis plus de quinze ans et évaluée à 3 stades de hauteur successifs nous avons constaté que la largeur des cloisonnements et des bandes avait certes une légère incidence, mais toute relative : en effet, ni la croissance ni la forme des tiges d'avenir de hêtre du peuplement ne souffrent durablement de ces ouvertures.

Organisation du dispositif

Deux facteurs sont étudiés :

- largeur des cloisonnements avec 2 modalités : Étroit ou 1 m et Large ou 2 m ;
- largeur des bandes de peuplements avec 3 modalités : 2, 3 et 4 m.

Le croisement complet de ces 2 facteurs donne des « entre-axes » de 3, 4, 5 et 6 m de large (voir figure 1).

L'essai est constitué de 2 blocs comprenant chacun 6 placettes (unités expérimentales) de 60 m sur 20 m issues du croisement complet des 2 facteurs étudiés. Les mesures ont été effectuées sur un échantillon temporaire de belles tiges, vigoureuses, et accessoirement bien réparties ; cela représente de 1 200 à 500 tiges d'avenir par hectare selon le stade. Lors de chaque campagne de mesures, les variables suivantes ont été relevées sur les tiges échantillon :

- circonférence à 1,30 mètre de hauteur ;
- hauteur totale ;
- nombre de fourches dont l'insertion se trouve à plus de 70 cm du sommet de la tige ;
- hauteur des fourches se trouvant à plus de 2 mètres (stade 5 m de haut) puis 3 mètres (stade 8 m de haut) du sommet de la tige, afin de s'affranchir des fourches temporaires ;
- nombre de branches vivantes de plus de 75 cm de longueur sur 2 m (stade 5 m de haut), puis sur la moitié de la hauteur (stade 8 m de haut) sur les faces orientées au nord, est, sud et ouest ;
- nombre de branchettes vivantes de moins de 75 cm de longueur sur 2 m, puis sur la moitié de la hauteur sur les faces orientées au nord, est, sud et ouest ;
- hauteur d'insertion de la première branche vivante (longueur ≥ 75 cm) ;
- hauteur d'insertion de la première branchette vivante (longueur < 75 cm) ;
- diamètre de la plus grosse branche ou branchette sur les 2 premiers mètres dans les 4 directions : nord, est, sud et ouest ;
- distance de la tige au cloisonnement situé au nord, les cloisonnements étant orientés est-ouest ;
- écart par rapport à la verticale sur les 2 premiers mètres (stades 3 et 5 m de haut) puis les 4 premiers mètres (stade 8 m de haut) et direction de l'inclinaison.

Ces résultats devraient lever les doutes sur les risques qu'engendre l'ouverture de ces cloisonnements et par-là même faciliter la réalisation des travaux et l'efficacité des interventions dans un contexte économique satisfaisant.

Une expérimentation pour évaluer les effets des cloisonnements

Pour répondre à ces interrogations, une expérimentation a été mise en place en octobre 1989 dans une régénération naturelle de hêtre de 0 à 60 cm de hauteur

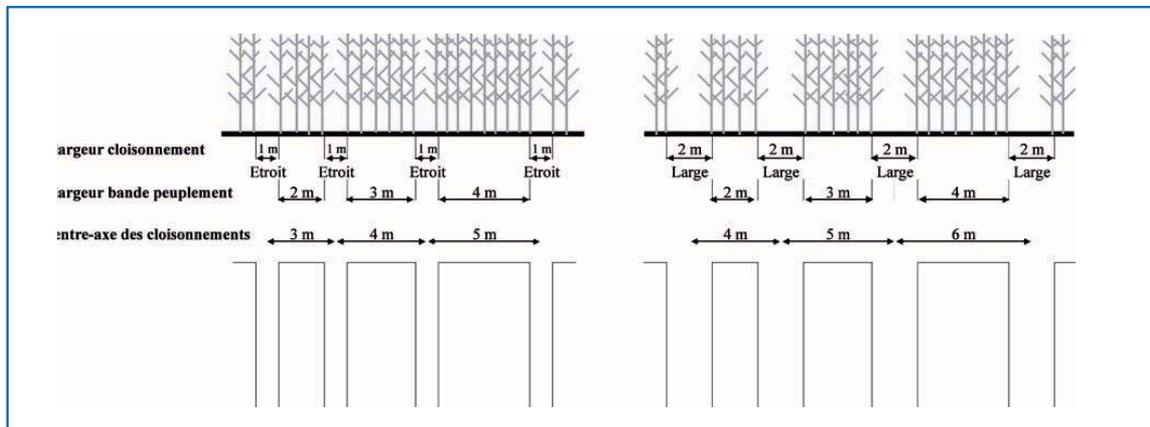


Fig. 1 : représentation schématique des différentes combinaisons de largeur de bandes et cloisonnements : en haut vue de face, en bas vue de dessus

issue de semis de 1982, 1984 et 1986 en forêt communale de Raddon, Haute-Saône. En 1995, le peuplement était constitué d'un fourré très dense d'environ 100 000 semis par hectare pour une hauteur de 3 m. Le type de station est particulièrement favorable au hêtre : hêtraie à luzule sur sol brun acide de profondeur supérieure à 80 cm sur grès avec des précipitations de l'ordre de 1 500 mm par an pour une température moyenne annuelle de 8 °C. Ce type de peuplement souffre en revanche d'un manque de diversité en essence, avec présence de quelques chênes sessiles mais absence chronique de feuillus divers en raison du fort dynamisme du hêtre.

Cet essai a permis de tester les effets de 2 largeurs de cloisonnements nommés « Étroit » pour 1 mètre et « Large » pour 2 mètres ainsi que 3 largeurs de bandes de semis : 2, 3 et 4 m correspondant à des largeurs d'entre-axes de cloisonnements de 3, 4, 5 et 6 m (voir encadré et figure. 1). L'évaluation du peuplement et de la qualité des tiges a fait l'objet de 3 campagnes successives à 3 m, 5 m et 8 m de hauteur de peuplement.

Une légère influence dès 3 mètres de hauteur

À ce stade, lorsque l'on considère les peuplements dans leur ensemble, sans distinguer la position des semis par rapport au cloisonnement, les effets négatifs suspectés sur la forme des tiges de hêtre dominantes ne sont pas mis en évidence. Seul un léger effet sur la verticalité sur 2 m de haut (figure 2) est

constaté avec des semis plus verticaux pour les cloisonnements étroits dans les bandes de 3 et 4 m.

La situation des semis au centre des bandes de peuplement, à plus de 50 cm de la lisière ou en lisière n'a pas d'effet sur le nombre de branches et l'élagage de la première branche vivante. En tenant compte uniquement des bandes de 4 m, seuls le diamètre

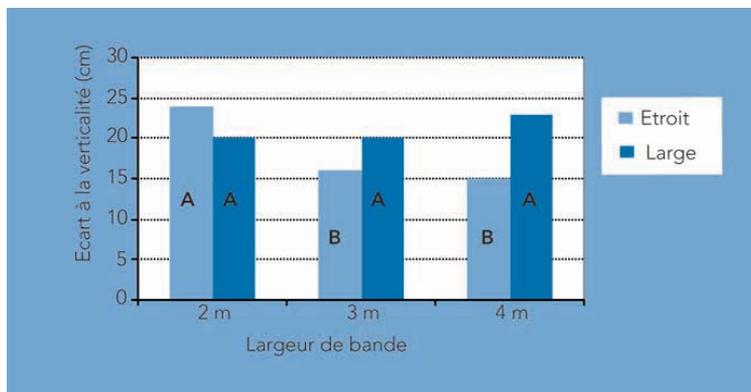


Fig. 2 : au stade $H_0 = 3$ m, écart à la verticalité sur 2 m en cm en fonction de la largeur du cloisonnement (Étroit ou Large) et de la largeur de la bande de semis

Pour une même largeur les différences significatives (au seuil de 10 %, $p = 0,06$, test de Newman Keuls) sont indiquées par des lettres différentes

NB : un écart à la verticalité de 21 cm à 2 mètres de haut correspond à un angle de 6° pour une tige non flexueuse, les extrêmes observés allant de 15 à 24 cm, soit de 4° à 7°

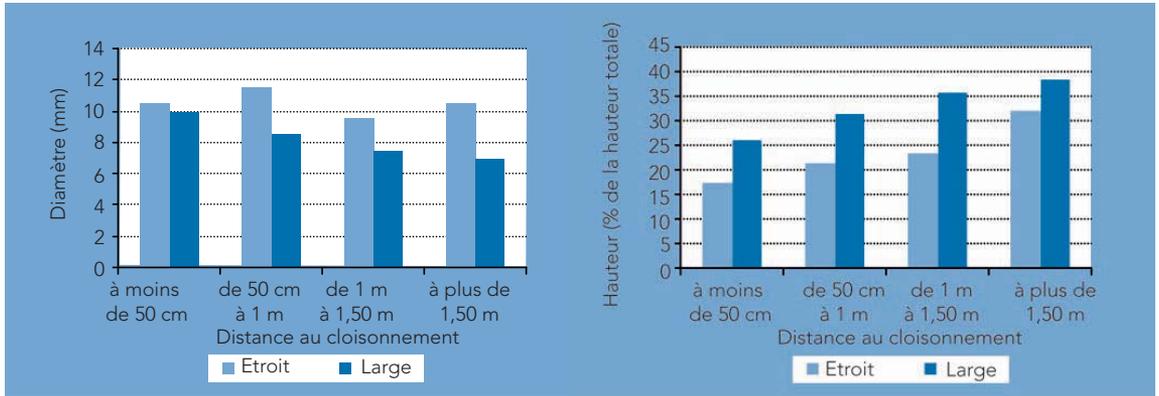


Fig. 3 et 4 : au stade $H_o = 3$ m, diamètre (mm) et hauteur (% de la hauteur totale) de la plus grosse branche ou branchette vivante sur 2 m en fonction de la position par rapport à la lisière du cloisonnement dans la bande de 4 m de large

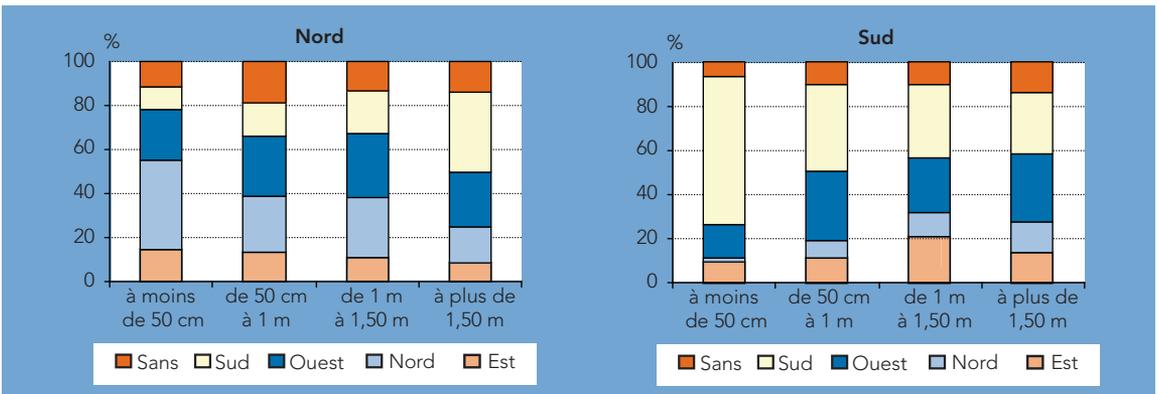


Fig. 5 et 6 : au stade $H_o = 3$ m, dans la bande de 4 m de large, orientation de l'inclinaison des semis (sur 2 m) selon leur situation vis-à-vis des cloisonnements nord (à gauche) et sud (à droite)

et la hauteur de la plus grosse branche vivante sur 2 m évoluent selon la distance au cloisonnement avec une amélioration au centre des bandes de peuplement (figures 3 et 4). Plus une tige est proche du cloisonnement plus elle est susceptible d'avoir de grosses branches basses. L'élagage est donc meilleur au centre des bandes. Cependant, l'absence d'effet sur le diamètre des branches pour les cloisonnements étroits ne semble pas confirmer ce résultat. De plus l'effet attendu entre cloisonnements étroits et larges est inversé sans toutefois être significatif : l'élagage semble

meilleur pour des cloisonnements larges de 2 m avec un diamètre plus faible et une hauteur de branche plus forte.

Les cloisonnements étant orientés est – ouest, nous avons étudié le comportement des semis en fonction de leur position dans les bandes de 4 m. Les semis situés au sud des bandes de peuplement sont plus inclinés vers le sud et l'ouest alors que la situation est beaucoup moins nette pour les semis situés au nord des bandes. Cette tendance est encore plus nette si l'on considère la distance des semis par

rapport au cloisonnement le plus proche : **les semis situés en bordure de cloisonnements ne sont pas plus penchés que les autres mais ils penchent préférentiellement vers ces cloisonnements** (figures 5 et 6). Cette influence directe des cloisonnements interfère sans doute avec une tendance générale des semis à l'inclinaison vers le sud et l'ouest selon la course du soleil. Enfin les semis situés sur les bordures de cloisonnements ont tendance à présenter des branches de diamètre plus important lorsqu'elles sont orientées vers les cloisonnements.

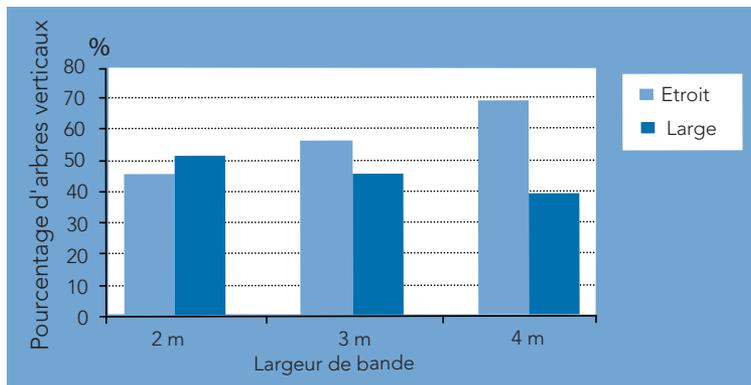


Fig. 7 : au stade $H_0 = 5$ m, proportion des arbres verticaux (sur 2 m) en fonction de la largeur des bandes et de la largeur des cloisonnements

Sont considérés comme verticaux les arbres présentant moins de 5° d'écart par rapport à la verticale, soit moins de 18 cm sur 2 mètres.

Des effets encore visibles à 5 mètres de hauteur

À ce stade, ni la largeur des cloisonnements, ni la largeur des bandes n'influencent la densité du peuplement (environ 70 000 tiges par hectare), sa structure (constituée de 50 % de dominants) et sa composition (entre 1 et 3 % de chêne dans l'étage dominant). La désignation d'un nouvel échantillon de 1 200 tiges d'avenir par hectare a été réalisée parmi les plus belles et les plus vigoureuses. À partir de cet échantillon, les seuls effets constatés concernent uniquement la verticalité :

Globalement la proportion d'arbres inclinés sur 2 m de haut apparaît légèrement (mais non significativement) plus forte avec des cloisonnements larges (54 %) qu'avec les cloisonnements étroits (42 %). Ceci est surtout vrai pour les arbres légèrement inclinés entre 5 et 10° (significatif au seuil de 5 %, $p = 0,02$) : 39 % dans le premier cas contre 28 % dans l'autre. L'orientation de prédilection de ces arbres est d'abord le sud pour 38 % des tiges puis le nord pour 20 %, les cloisonnements étant orientés est - ouest. Dans le détail, cet effet concerne surtout les bandes de 4 m les semis y sont sensiblement plus verticaux avec

des cloisonnements étroits qu'avec des cloisonnements larges (figure 7) ; toutefois, ces différences ne sont pas significatives sur le plan statistique. Les écarts extrêmes à la verticalité vont de 15 à 81 cm, soit une inclinaison de 4° à 22° . Nous n'avons pas décelé d'effet sur les autres variables : hauteur totale, diamètre moyen, hauteur sans branche vivante.

En s'intéressant aux seules bandes de 4 m, les plus larges, on constate que la position des semis dans la bande n'a pas d'incidence sur le diamètre et la hauteur, lesquels sont en revanche influencés par la largeur du cloisonnement, avec un effet stimulant sur la croissance des semis dans les cloisonnements larges (2 m). Comme on l'a vu plus haut, l'influence de la largeur du cloisonnement se manifeste aussi sur l'inclinaison, avec une plus forte propension à la verticalité en cloisonnement étroit avec 70 % contre 40 % en cloisonnement large (figure 7). Pour ce critère seulement, la position dans la bande joue aussi un rôle : les tiges inclinées situées à moins d'un mètre de la bordure penchent plutôt vers le sud (33 %) que vers le nord (10 %), et les semis verticaux sont plutôt dans la partie nord (67 %) que dans la partie sud (48 % seulement).

Des différences faibles à 8 mètres de hauteur

Un dépressage amenant la densité à 8 000 tiges par hectare a été réalisé à 5 m de hauteur après la campagne de mesure. À 8 m de haut, le peuplement est constitué de 93 % de dominants avec 4 % de chêne dans cet étage dominant et ne présente pas de variation en termes de densité, de structure et de composition en fonction de la largeur des cloisonnements et des bandes.

Une nouvelle évaluation à partir d'une nouvelle population de 500 tiges d'avenir par hectare donne des résultats assez similaires aux résultats obtenus à 5 m de haut. Pour la hauteur totale, nous avons relevé une valeur plus importante pour les bandes de 2 mètres, ce qui était déjà le cas dès 3 mètres de haut. L'écart semble toutefois se réduire entre ces deux stades.

Pour les variables de forme, les analyses n'ont pas révélé de différence en matière d'élagage ainsi qu'en matière de branchaison et de fourchaison. Par contre, nous avons relevé des différences en ce qui concerne la verticalité, l'inclinaison et l'orientation de cette inclinaison. Par exemple la proportion d'arbres verticaux est plus importante avec des cloisonnements étroits avec 73 % contre 49 % pour les cloisonnements larges (figure 8). Les tiges apparaissent ainsi effectivement plus verticales avec des cloisonnements étroits. Cependant le faible nombre de tiges fortement inclinées, moins de 10 %, montre que **même avec des cloisonnements larges l'inclinaison ne présente pas un défaut majeur pour les tiges d'avenir**. Enfin lorsque les tiges d'avenir sont inclinées, elles le sont préférentiellement vers le sud avec 41 % des tiges puis l'ouest avec 27 % (figure 9 : différence significative au seuil de 5 % $p = 0,0001$, test

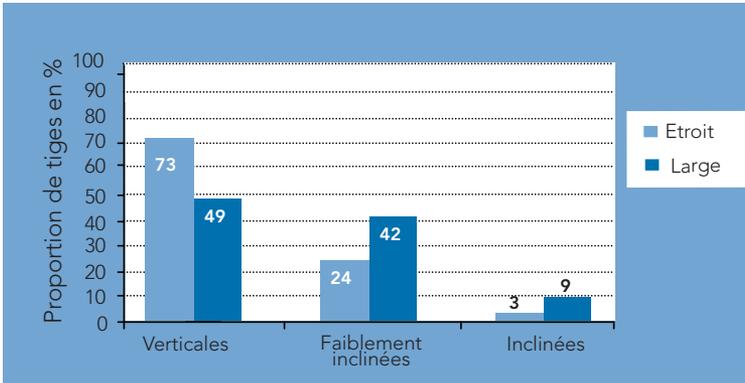


Fig. 8 : au stade $H_0 = 8$ m, proportion des tiges en fonction de leur inclinaison (sur 4 m) et de la largeur des cloisonnements

Tiges verticales : moins de 5° soit un écart à la verticalité de moins de 35 cm.
 Tiges faiblement inclinées : de 5 à 10° soit un écart de 35 à 70 cm.
 Tiges inclinées : de 11 à 22° soit un écart de 71 à 162 cm

de Newman Keuls), ce qui n'est pas surprenant puisque les cloisonnements sont orientés est-ouest ; à ce stade, **les tiges ne sont donc plus inclinées préférentiellement vers les cloisonnements mais en fonction de la course du soleil.**

En complément, nous nous sommes intéressés à l'effet des cloisonnements en fonction de la position des tiges d'avenir dans les bandes de peuplement de 3 et 4 m de large, d'une part, et dans la bande de 4 m de large seule, d'autre part, où l'hétérogénéité pouvait être la plus marquée. Les régressions n'ont révélé aucune corrélation significative entre la distance au cloisonnement et les variables étudiées. Seul le diamètre à 1,30 m semble être sensiblement plus gros lorsque la tige est à proximité de la lisière sud du cloisonnement. Nous ne pouvons pas connaître l'effet sur le diamètre des branches comme au stade 3 mètres car, par défaut d'accessibilité, la mesure n'a pas été effectuée à 8 m de hauteur. Cependant cet effet supposé, mesuré au stade de 5 m de hauteur, n'avait pas été décelé. La position des tiges dans la partie nord ou sud de la bande n'a pas d'influence sur l'inclinaison ; la proportion de tiges verticales n'est

pas différente au nord ou au sud de la bande et, comme on l'a vu dans la tendance générale, les tiges inclinées le sont significativement plus vers le sud.

Pour conclure

Notre peuplement de hêtre issu de régénération naturelle a atteint 8 m de hauteur. Dès l'origine des cloisonnements de 1 ou 2 m de largeur ont laissé des bandes de semis 2 m, 3 m ou 4 m de large. Sur une population de tiges d'avenir situées au centre ou en bordure des bandes de peuplement, ces cloisonnements n'ont pas eu d'effet négatif significatif sur le diamè-

tre, la hauteur, la branchaison ou la fourchaison. De plus, bien que les tiges soient plus inclinées avec des cloisonnements larges, cette inclinaison est dans la plupart des cas réduite puisque inférieure à 10°. Dans tous les cas, près de 250 tiges d'avenir par hectare sont verticales à 8 m de haut ; de ce fait, le recrutement des arbres objectif ne paraît pas pénalisé. L'effet des cloisonnements sur l'inclinaison est réduit à 8 m de hauteur à la faveur de la fermeture du peuplement. La faible inclinaison constatée semble être naturelle, les semis ayant une propension à s'incliner en fonction de la course du soleil et vers le sud. Comme pour l'étude sur le chêne : « Ces résultats n'incitent guère à redouter une influence négative d'un cloisonnement sylvicole traditionnel sur la qualité d'un jeune peuplement » de hêtre.

La largeur de cloisonnement de 1 m rendant la mécanisation difficile en raison de la quasi-inexistence d'engin de cette largeur, des cloisonnements de 2 m de large sont à conseiller pour des raisons pratiques d'entretien. Cependant l'essai ne permet pas de dire si des cloisonnements plus larges seraient plus pénalisants pour les peuplements. Dans ces conditions il est préférable de ne pas trop élargir ces cloisonnements et d'utiliser des engins de largeur modé-

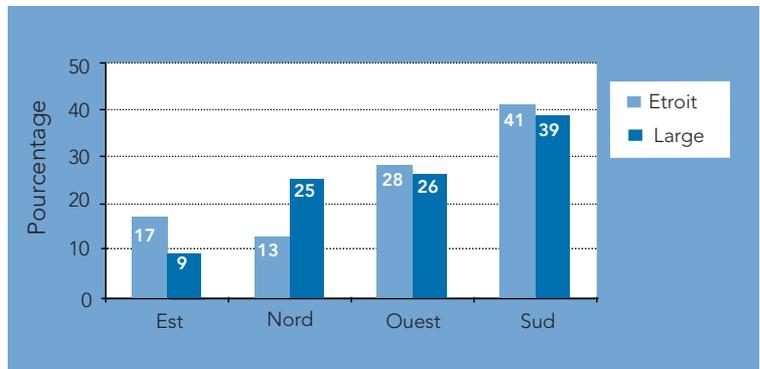


Fig. 9 : au stade $H_0 = 8$ m, proportion de tiges inclinées de 5 à 10° en fonction de l'orientation et de la largeur des cloisonnements



D. François, ONF

rée (2 m) donc de faible poids pour leur ouverture et leur entretien, ce qui est par ailleurs cohérent avec l'objectif de protection des sols.

Si l'on ne peut guère jouer sur la largeur des cloisonnements, les résultats montrent qu'il est possible de réduire la largeur des bandes sans pénaliser les jeunes peuplements. Le choix de la largeur des bandes est fonction de l'intensité des travaux à réaliser. Des bandes étroites sont à privilégier là où la végétation concurrente est abondante et où les densités sont fortes, c'est-à-dire dans les peuplements nécessitant des travaux intensifs. Ces bandes étroites facilitent le travail des ouvriers forestiers et, dans ces conditions, les cloisonnements denses sont une aide précieuse à la réduction des coûts, dans le cadre des dégagements et des dépressages en particulier.

Inversement, des bandes de peuplements plus larges peuvent suffire à la réalisation de travaux extensifs ou ciblés dans des contextes stationnels moins riches.

N'oublions pas enfin que l'ouverture et l'entretien de ces cloisonnements sylvicoles doivent tenir compte des prescriptions environnementales (SFFC, 1999) : préservation des sols, respect des périodes de mise bas et de nidification, intégration paysagère...

François CONRARD
Didier FRANÇOIS

Direction Forêt
ONF — DT Franche-Comté

Remerciements

Nos remerciements vont ici à Alain Boisson, Responsable de l'UT de Luxeuil les Bains et à l'ensemble de son équipe qui ont

tous participé à l'installation et au suivi de cette expérimentation ainsi qu'à la commune de Raddon et Chapendu pour la mise à disposition de la parcelle.

Bibliographie

DUPLAT P, DEMARCO P., DEMOLIS Ch., 1997. Le cloisonnement sylvicole induit-il des différences entre les arbres de bordure et les arbres intérieurs dans les jeunes peuplements de chêne sessile ? Bulletin technique, n° 33, pp. 33-47

CRPF Franche-Comté, ONF Direction régional Franche-Comté, 1999. Les accès dans la parcelle. Thise : Société Forestière de Franche-Comté. 16 p.

Les oiseaux face au changement climatique

Notre hors-série « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques » a illustré le cas des oiseaux par l'exemple des galliformes de montagne. Voici, en contrepoint, un panorama général sur les réactions des oiseaux à ces changements.

Le changement du climat est maintenant une réalité reconnue par tous. La température moyenne du globe s'est réchauffée de 0,6 °C au cours du siècle passé. Contrairement à une idée répandue, cette hausse de la température moyenne est essentiellement due à la hausse des températures minimales causée par une plus forte nébulosité, et non pas à la hausse, relativement modeste, des températures maximales. Le changement climatique ne se résume pas seulement à cette hausse de température moyenne : les régimes des précipitations ont connu également des modifications progressives. La France a connu au cours des deux dernières décennies des printemps et des hivers plus pluvieux et des étés plus secs, au sud comme au nord. Les précipitations automnales quant à elles sont devenues moins fréquentes dans l'extrême sud du pays, tandis qu'elles ont augmenté dans le reste du pays. En outre, il semble que nous connaissions une fréquence accrue d'événements climatiques brutaux (tempêtes, inondations, sécheresses) mais la nature chaotique de ces événements extrêmes rend la détection d'une tendance à long terme délicate. Et le pire serait devant nous, la faute aux rejets dans l'atmosphère de gaz à effet de serre.

Les écosystèmes doivent d'ores et déjà faire face à des bouleversements de deux paramètres clés du vivant : les températures et les précipitations. De nombreuses



Le circaète Jean-le-blanc, rapace méridional mangeur de reptiles, pourrait remonter vers le nord avec le réchauffement climatique

F. Archaux

populations ou communautés d'oiseaux sont suivies dans le monde entier par des scientifiques, parfois depuis plus de 50 ans. Depuis les années 1970-80, on a pu observer chez ces populations ou communautés des changements multiples et convergents de leurs aires de distribution, de leurs systèmes de migration, du calendrier de leur reproduction et de leur migration.

Dans cet article, nous passons en revue ces changements observés, avant d'aborder la délicate question des changements à venir. Nous terminons sur le rôle que peut jouer le sylviculteur pour ne pas accentuer, voire pour atténuer, l'impact du changement climatique sur les oiseaux.

Une répartition des espèces modifiée

Remontées en latitude (avec nuances) et en altitude

Sur les 435 espèces qui se reproduisent en Europe, pas moins de 196 (45 %) ont avancé leur aire de distribution vers le nord ou le nord-ouest depuis la fin du siècle dernier, contre seulement 32 qui se sont retirées vers le sud ou le sud-est. Cependant, les changements d'occupation des terres et l'adaptation des espèces à des environnements nouveaux expliquent certainement une part de ces changements de distribution. L'expansion spectaculaire du pic noir des montagnes vers la plaine à partir des années 1950 n'est probablement pas à mettre au crédit du réchauf-

fement climatique. En Angleterre, une étude portant sur la répartition de 20 espèces a mis en évidence une remontée moyenne vers le nord de 18,9 km en vingt ans. Cette même étude ne trouve pas de remontée vers le nord de la limite sud de répartition des espèces nordiques. Il semble également que les marges sud de distribution de plusieurs espèces de papillons soient restées plus stables que les marges nord, sans que l'on puisse proposer une explication à ce phénomène. De façon analogue à la remontée en latitude vers les pôles, certaines études mentionnent la remontée en altitude des ceintures de végétation et de leurs faunes associées.

Déclin des reliques glaciaires et espèces nordiques

Le réchauffement climatique est également considéré comme la cause principale du déclin actuel de nombreuses reliques glaciaires, ces espèces qui témoignent du temps où la France était encore largement couverte de glaciers ; elles se cantonnent à des zones toujours plus petites et morcelées, tel le lagopède alpin dans les Alpes. Ces espèces pourraient disparaître à moyen terme à cause du réchauffement. Le programme national de suivi temporel des oiseaux communs (STOC) a montré que les espèces à répartition nordique dans notre pays ont connu un déclin plus marqué que les espèces méridionales entre 1989 et 2002. Par ailleurs, ce même suivi a mis en évidence que la sécheresse 2003 a accentué la tendance à long terme (au déclin ou à l'augmentation) des passereaux communs : des sécheresses répétées accentueront l'impact du réchauffement climatique.

Des tendances fortes, mais...

Cependant, l'avifaune ne manifeste pas systématiquement une remontée en altitude ou en lati-



F. Archaux

Le tétras lyre, espèce alpine, pourrait pâtir du réchauffement

tude au cours des dernières décennies et dans tous les cas, la réponse semble inférieure à la réponse attendue compte tenu du réchauffement observé (+1 °C correspond à +100 km en latitude et +150 m en altitude). Une interprétation optimiste de ce phénomène est que de nombreuses espèces ne sont pas limitées par des contraintes climatiques ; le réchauffement climatique ne représenterait pas une menace majeure pour elles. Une interprétation pessimiste, plus probable, est que ces espèces colonisent de nouvelles zones de reproduction plusieurs années seulement après qu'elles soient devenues climatiquement favorables. Cette réponse différée pourrait s'expliquer par le fait qu'il faille un certain temps pour que se mettent en place les réseaux trophiques dont dépendent les oiseaux et/ou par la forte propension des oiseaux à revenir nicher à proximité de leur lieu de naissance (philopatrie) plutôt qu'à explorer des zones plus lointaines.

Vers une sédentarisation

La migration est un phénomène complexe qui impose la synchronisation de la reproduction, de la mue et de la migration au mieux des disponibilités alimentaires. Les espèces doivent donc adapter leur comportement migratoire au changement climatique. La réponse peut être un changement dans le calendrier de la migration, dans la distance par-

course, dans le choix de nouvelles zones d'hivernage, plus proches des sites de reproduction, ou même la sédentarisation.

Le séjour sur le territoire de reproduction s'allonge

L'avifaune migratrice, en Europe comme en Amérique du Nord, a tendance à rester plus longtemps sur les territoires de reproduction. L'avancée de la migration au printemps est plus marquée chez les migrateurs à courte distance – qui hivernent en Europe de l'Ouest ou en Afrique du Nord comme le pouillot véloce ou la fauvette à tête noire - (13 jours en 20 ans) que chez les migrateurs à grande distance – qui hivernent au sud du Sahara comme nos hirondelles - (4 jours). Un départ en migration différé en automne est également parfois constaté (pour les migrateurs à grande distance en Angleterre et les migrateurs à courte distance au moins en Suisse), probablement en réponse à l'allongement de la période de végétation. Le baguage des migrateurs en automne en Allemagne a montré que 19 espèces sur 28 ont différé leur départ en migration de 5 à 6 jours.

L'évolution climatique des zones d'hivernage peut pousser à la sédentarisation

Des espèces comme le coucou, les hirondelles de fenêtre ou de cheminée ou le rossignol hivernent en Afrique subsaharienne ; or les sécheresses chroniques que connaissent ces zones ont un impact très fort sur ces espèces. Par exemple, la sécheresse dramatique qu'a connue le Sahel en 1968 (avec un cumul annuel des précipitations 70 % en dessous de son niveau normal) a entraîné la mortalité des deux tiers des fauvettes grisettes anglaises entre 1968 et 1969. Si le coût de la migration excède celui de l'hi-

vernage sur les sites de reproduction, la sélection favorisera la sédentarisation d'espèces auparavant migratrices. Certaines populations se sédentarisent et/ou modifient leurs sites d'hivernage. À partir d'expérimentations sur la fauvette à tête noire, on a pu montrer qu'en 25 générations, soit environ 40 ans, une population totalement migratrice peut devenir totalement sédentaire. La rapidité de la réponse adaptative à des nouvelles pressions de sélection est sans doute à la base de la sédentarisation de certaines populations de passe-reaux d'Europe centrale au cours du 20^e siècle, tels que le merle noir, le rouge-gorge et la mésange bleue.



La fauvette à tête noire, espèce forestière migratrice susceptible de se sédentariser

dont l'abondance maximale est souvent de courte durée. Or de nombreuses études ont montré que l'ensemble des maillons des chaînes trophiques ont avancé leur calendrier biologique en réponse au réchauffement climatique des dernières décennies. Ainsi une étude anglaise portant sur plus de 70 000 pontes de 65 espèces montre qu'entre 1971 et 1995 toutes les espèces, à l'exception du pigeon colombin, ont avancé leur date de ponte. Tous les groupes d'oiseaux sont concernés (passereaux insectivores ou granivores, sédentaires ou migrants, canards).

...pose des problèmes de synchronisation

Cependant, les chaînes trophiques pourraient être interrompues. En Angleterre, une expérience a montré que les chenilles dont se nourrissent les jeunes mésanges bleues se développent plus rapidement sous l'effet de la température, ce qui avance leur pic d'abondance dans le temps. Or, les jeunes mésanges ne peuvent pas accélérer leur croissance aussi vite que les chenilles, pour des contraintes de développement. Bilan : moins de jeunes à l'envol, en moins bonne santé et qui ont moins de chances de pouvoir se reproduire à leur tour. Ce problème de désynchronisation a été constaté chez la mésange charbonnière en milieu naturel entre 1973 et 1995 aux Pays-Bas. De façon similaire, il semble que certains oiseaux hivernant en Afrique subsaharienne ne parviennent pas à avancer suffisamment leur reproduction en réponse au réchauffement printanier car le départ en migration printanière, qui va déterminer la date de ponte, dépend des conditions sur les territoires d'hivernage, et non pas sur les territoires de reproduction, lesquelles peuvent différer.



F. Archaux

La mésange charbonnière, espèce cavicole commune en forêt feuillue, souffre de désynchronisation alimentaire

Quel futur pour les oiseaux ?

Certains signes indiquent que l'avifaune n'est pas toujours en mesure de caler son calendrier biologique et sa répartition avec l'évolution récente du climat. Or les changements climatiques devraient s'accélérer. En effet, les modèles les plus récents prédisent une augmentation de la température du globe de 2 à 3 °C dans les 50 prochaines années. Certes, la fonte de la calotte glaciaire du pôle Nord pourrait provoquer l'arrêt du Gulf stream qui permet à l'Europe de l'Ouest de bénéficier de conditions hivernales tempérées. Le réchauffement du globe conduirait alors paradoxalement l'Europe de l'Ouest à subir des hivers plus rigoureux, comparables à ceux de la côte Est de l'Amérique du Nord. Ce courant transatlantique a connu de tels arrêts au cours de l'Éocène précisément du fait de l'arrivée massive d'eau douce. Cependant si le Gulf stream montre effectivement des signes de ralentissement, il est très peu vraisemblable qu'il s'arrête avant un siècle.

Scénario climatique probable et risque d'extinctions

À moyenne échéance, nous devrions donc connaître un climat globalement plus chaud, y compris en hiver. Le cumul annuel des précipitations devrait augmenter, mais se concentrer au printemps et en hiver, tandis que les sécheresses devraient être plus

Avancer la reproduction

L'adaptation du calendrier biologique...

Une forte pression sélective s'exerce sur les oiseaux pour faire coïncider les besoins alimentaires de leurs nichées avec les disponibilités alimentaires

intenses et fréquentes en été. Les interrogations sur l'amplitude des changements climatiques futurs tiennent aux incertitudes scientifiques sur le fonctionnement du climat et donc sa modélisation (en particulier en ce qui concerne les précipitations), mais aussi à la difficulté d'anticiper le niveau futur des émissions de gaz à effet de serre et de séquestration de ces mêmes gaz à l'échelle mondiale (en particulier du carbone). Il n'en demeure pas moins que tous les modèles climatiques indiquent un climat plus chaud dans le futur, quel que soit le scénario envisagé concernant les émissions futures de gaz à effet de serre. Les extinctions pourraient alors se multiplier.

Destruction des habitats et changement climatique : un cocktail désastreux

Cela ne doit cependant pas nous faire oublier que la fragmentation, la dégradation et la destruction des habitats sont des phénomènes tout aussi préoccupants. Le résultat est que ce sont les espèces d'oiseaux les plus spécialisées qui disparaissent au profit d'espèces les plus opportunistes, conduisant à la banalisation de l'avifaune à l'échelle du territoire. Changement des habitats et changement climatique concourent malheureusement à l'heure actuelle à l'érosion de la biodiversité : parmi les quelque 9 000 espèces d'oiseaux du globe, 5 000 sont sur le déclin et plus de 1 000 sont menacées d'extinction. En France, 165 espèces sur les 265 que compte l'avifaune reproductrice sont considérées comme menacées. Une crise d'extinction en masse a déjà commencé et semble devoir se poursuivre inéluctablement, en l'absence de prise de décision politique globale et vigoureuse.

Quelle gestion favorable à l'avifaune pour un avenir incertain ?

De nombreuses études scientifiques ont permis d'identifier les pratiques sylvicoles favorables à l'avifaune (et celles qui sont défavorables), mais aucune étude à ce jour n'a cherché à vérifier si les oiseaux encaissaient mieux les variations du climat dans certains contextes sylvicoles plutôt que d'autres. Par conséquent, il n'est pas possible de proposer des pratiques de gestion qui viseraient à limiter l'impact du changement climatique sur l'avifaune. En milieu agricole, les communautés d'oiseaux sont d'autant plus instables que l'agriculture y est intensive. Il est possible qu'il en soit de même en milieu forestier.

Le changement climatique aura évidemment un impact sur les écosystèmes forestiers et la production du bois. Face à un avenir incertain, le forestier se pose légitimement la question d'une gestion adaptée aux futures contraintes climatiques que rencontreront les peuplements forestiers. On sait que certaines options possibles auront un impact négatif sur l'avifaune forestière : une sylviculture qui systématiserait l'élimination du sous-bois pour réduire la compétition des arbres avec la végétation herbacée et arbustive, qui raccourcirait de même les cycles sylvicoles et qui privilégierait des espèces exotiques tolérant la chaleur et le manque d'eau comme l'Eucalyptus aurait des conséquences néfastes pour nombre de passereaux forestiers. L'application de pratiques sylvicoles variées dans le temps et l'espace, intégrant l'avancée des connaissances scientifiques, et non pas d'une sylviculture mono-

lithique et immuable, sera certainement à la clé de la préservation de la biodiversité forestière pour les décennies à venir.

Frédéric Archaux

UR Écosystèmes forestiers
Cemagref Nogent-sur-Vernisson

Bibliographie

IPCC, 2001. IPCC Third assessment report: climate change 2001. Cambridge : Cambridge University Press. <en ligne : <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>>

La Lettre du changement global <en ligne : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pigbsom.htm>>

JULLIARD R., JIGUET F., COUVET D., 2003. Common birds facing global changes : what makes a species at risk ? *Global Change Biology*, vol. 10, n° 1, pp 148-154

JULLIARD R., JIGUET F., COUVET D., 2004. Evidence for the impact of global warming on the long-term population dynamics of common birds. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, vol. 271, pp. S490-S492

ROOT T.L., PRICE J.T., HALL K.R., SCHNEIDER S.H., ROSENZWEIG C., POUNDS J.A., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, vol. 421, n° 6918, pp 57-60

à suivre

n° 21 - été 2007

Prochain dossier : réduire notre empreinte écologique

parution : août 2008

Ce prochain dossier se concentrera sur la réduction de l'empreinte écologique dans le cadre des activités de l'ONF. Il traitera notamment de la gestion des différentes catégories de déchets, mais aussi plus largement des divers domaines relevant de l'éco-responsabilité, dans un contexte « politique » et réglementaire exigeant.

Retrouvez *RenDed-Vous techniques* sur *intraforêt*

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

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

The screenshot shows the 'intraforêt' website interface. At the top, there is a navigation bar with links for 'Navigation', 'Direction Générale', 'Directions Territoriales', 'Réseaux', 'Groupes de Projets', and 'Mes Accès Directs'. Below this, the date 'Jeudi 10 juillet 2003' is displayed. The main content area is titled 'Recherche et Développement' and features a search bar with the text 'Rechercher une information dans intraforêt'. To the right of the search bar, there is a 'Sommaire' section for 'La documentation technique', which includes a list of documents and a 'Revenir au sommaire' link. The footer of the page contains 'Plan d'intraforêt', 'Intraforêt au quotidien', and 'Contacts'.

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

ONF - Département recherche
Christine Micheneau
Tél. : 01 60 74 92 25
Courriel : rdvt@onf.fr

Pour se procurer *RDV techniques* :

ONF - Documentation technique
Boulevard de Constance
77300 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 24 - Fax 01 64 22 49 73

