



**HAL**  
open science

# Le cycle du carbone dans les forêts et le changement climatique : comprendre le passé pour s'adapter au futur

Valentin Bellassen, Sebastiaan Luyssaert

## ► To cite this version:

Valentin Bellassen, Sebastiaan Luyssaert. Le cycle du carbone dans les forêts et le changement climatique : comprendre le passé pour s'adapter au futur. *Revue forestière française*, 2012, 64 (3), pp.263-274. 10.4267/2042/48435 . hal-01122956

**HAL Id: hal-01122956**

**<https://hal.science/hal-01122956>**

Submitted on 24 Apr 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# LE CYCLE DU CARBONE DANS LES FORÊTS ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : COMPRENDRE LE PASSÉ POUR S'ADAPTER AU FUTUR

VALENTIN BELLASSEN – SEBASTIAAN LUYSSAERT

Selon la théorie écologique, dans des conditions environnementales stables (par exemple, n'étant pas soumises à des variations du climat, de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, de l'intensité de la gestion, etc.), le bilan carbone des forêts finit par atteindre un état d'équilibre, le « climax » (Odum, 1969). Dans une forêt ancienne, « climacique », les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la décomposition des arbres morts et de la respiration des plantes — respiration de l'écosystème terrestre (TER) — compensent l'absorption du CO<sub>2</sub> due à la photosynthèse des arbres vivants — production primaire brute (GPP). Ainsi, le bilan carbone de l'écosystème — production nette de l'écosystème (NEP) — est nul.

Il s'avère toutefois que la plupart des forêts ne sont pas de vieux peuplements : à l'échelle mondiale, 64 % des forêts font l'objet d'une gestion forestière (FAO, 2010 ; Intact Forest Landscape, 2011). La demande en bois, et par conséquent l'intensité de la gestion forestière, a varié au fil du temps (FAOSTAT, 2011), entraînant également une variation de l'utilisation des terres entre forêts, cultures et pâturages (Pongratz *et al.*, 2008). Cette évolution fait que l'environnement des forêts gérées n'a donc pas été constant. La fréquence et l'intensité des perturbations naturelles telles qu'incendies et tempêtes ont également connu des variations (Schelhaas *et al.*, 2003 ; Mouillot *et al.*, 2006).

En outre, des mesures des flux de carbone dans les forêts anciennes montrent que, même dans ces forêts, la production nette de l'écosystème (NEP) n'est pas nulle (Luyssaert *et al.*, 2008 ; Lewis *et al.*, 2009) et que, par conséquent, l'environnement des forêts non perturbées n'est pas constant. Dans ce contexte de modifications environnementales, l'objectif de cet article est de fournir une explication cohérente du rôle que les forêts ont joué au niveau du cycle carbone mondial dans un passé proche, en s'appuyant sur des publications scientifiques récentes. Il reprend dans un premier temps l'impact carbone de différentes catastrophes récentes, puis décrit les diverses estimations faites du puits forestier au XX<sup>e</sup> siècle. Il touche ensuite aux différentes explications données pour ce puits et à la question de l'adaptation des forêts aux changements climatiques. Cet article ne vise donc pas à procéder à un bilan complet de la littérature scientifique mais bien plutôt à fournir une vision partiellement subjective mais cohérente du rôle des forêts dans le cycle carbone.

## ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES MARQUANTS DE LA PREMIÈRE DÉCENNIE DU XXI<sup>e</sup> SIÈCLE

Au cours de la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle, les forêts ont subi une série d'événements extrêmes à grande échelle : ravageurs, tempêtes, feux de forêts et sécheresses.

### **Infestation de la Colombie-Britannique par le Dendroctone du Pin**

Depuis 2004, la Colombie-Britannique est gravement ravagée par le Dendroctone du Pin (*Dendroctonus ponderosae*). Le Service des forêts de la Colombie britannique estime que 600 millions de mètres cubes de bois ont été infestés par cet insecte ravageur, ce qui représente 6 % du patrimoine forestier de la province (Forest service of British Columbia, 2011). Une apparition précoce du froid au cours de l'automne (moins 30° C pendant 2 à 3 semaines), ce qui n'était pas inhabituel dans cette province, stopperait probablement cette infestation.

### **Tempêtes européennes**

Entre 1999 et 2009, l'Europe occidentale a été durement frappée par les tempêtes. Quatre d'entre elles ont causé des dégâts particulièrement importants (Gardiner *et al.*, 2010) :

- Lothar et Martin, en décembre 1999, ont endommagé 226 millions de mètres cubes de bois, et environ 8 % du volume sur pied de la France ;
- Gudrun, en janvier 2005, a mis à mal 87 millions de mètres cubes de bois, principalement en Suède ;
- Kyrill, en janvier 2007, a saccagé 52 millions de mètres cubes de bois, principalement en Allemagne ;
- Klaus, en janvier 2009, a endommagé 44 millions de mètres cubes de bois concentrés dans le sud-ouest de la France.

### **Feux de forêts**

La canicule de mai 2010 en Russie, avec des records de température de 39 °C à Moscou, a causé des feux de forêts sans précédent dans la partie européenne du pays. En réalité, avec 2,3 millions d'hectares de forêt brûlés, les incendies saisonniers de 2010 en Russie n'ont pas été particulièrement sévères par rapport au reste de la décennie (FAO, 2011). La couverture médiatique de ces incendies a été particulièrement importante car ils ont surtout concerné la partie européenne de la Russie, plus peuplée, alors que la plupart des feux de forêts se produisent généralement dans la région asiatique de la Russie (Shvidenko *et al.*, 2011).

### **Sécheresses**

Les sécheresses qui ont affecté l'Amazonie en 2005 et 2010 ont remis en question la pérennité de la forêt amazonienne et, par conséquent, son impact sur le cycle carbone. L'Amazonie constitue un puits de carbone moyen de 1,4 tCO<sub>2</sub>éq. par hectare et par an. Cependant, en 2005 et 2010, elle s'est transformée en une source évaluée à respectivement 5,5 tCO<sub>2</sub>/ha et 7,5 tCO<sub>2</sub>éq./ha, contrebalançant ainsi potentiellement le fonctionnement en puits de l'Amazonie pendant une décennie (Phillips *et al.*, 2009 ; Lewis *et al.*, 2011).

Des sécheresses surviennent également dans les zones tempérées, mais elles n'ont pas toujours un effet aussi radical. Alors que les forêts ont continué de jouer leur rôle de puits de carbone au cours de la vague de chaleur qui a affecté l'Europe en 2003 et réduit la production primaire brute (GPP) de la végétation de 30 % (Ciais *et al.*, 2005 ; Reichstein *et al.*, 2007), les sécheresses printanières de 2005 et 2006 qui ont sévi dans la région méditerranéenne de la France et qui ont été suivies d'une infestation par les chenilles ont, elles, transformé une forêt d'arbres à feuillage persistant en source de carbone (Allard *et al.*, 2008).

### **Impact global des événements extrêmes : évolutivité interannuelle plutôt que source durable de carbone**

Tous ces exemples, tous possiblement liés au changement climatique d'origine anthropique, pourraient être perçus comme autant d'indicateurs du fait que les changements environnementaux

récents ont pour effet de faire passer les forêts de leur bilan carbone théoriquement neutre et de leur rôle fréquemment observé de puits de carbone au comportement d'une source de carbone. Un inventaire mondial des événements extrêmes permettrait de mesurer leur importance globale sur le bilan carbone mondial. Nous ne disposons pas d'un tel inventaire mais plusieurs indicateurs semblent cependant mettre en évidence un impact modéré des événements extrêmes sur le cycle global du carbone :

- seuls 30 à 60 millions d'hectares (Mha), c'est-à-dire 1 à 1,5 % de la surface totale des forêts du monde entier, brûlent chaque année, principalement en raison de la culture sur brûlis (10 à 20 Mha) et de la déforestation (8 à 10 Mha) (Achard *et al.*, 2002 ; DeFries *et al.*, 2002 ; Frohking *et al.*, 2009) ;
- les feux de forêt « non anthropogéniques » des zones boréales et tempérées n'ont affecté que 0,5 % de ces forêts (Mouillot et Field, 2005), et émis au plus 0,4 PgC/an (Mouillot *et al.*, 2006), ce qui représente un tiers de la valeur nette estimée du puits dans cette région (Pan *et al.*, 2011) ;
- environ 10 Mha sont chaque année victimes de tempêtes et d'autres types de perturbations entraînant le remplacement du peuplement, les tempêtes ayant un impact largement supérieur aux autres perturbations – hors incendies – à l'échelle mondiale (Frohking *et al.*, 2009) ;
- malgré ces événements, les différentes méthodes d'évaluation de l'impact net des forêts sur le cycle carbone à l'échelle mondiale indiquent avec régularité un puits de carbone net (voir partie "Différentes méthodes...", ci-dessous).

Ces événements extrêmes ont un impact encore plus faible sur le bilan carbone des forêts européennes (NEP), estimé à moins de 5 % (Gardiner *et al.*, 2010 ; Luyssaert *et al.*, 2010). Contrairement à ce que montre l'évaluation du cycle carbone au niveau mondial, les tempêtes sont en Europe beaucoup plus dévastatrices que les incendies, avec 50 % et 15 % du volume total affecté par an respectivement (Schelhaas *et al.*, 2003). Même si l'impact des événements extrêmes est dilué dans des moyennes continentales et décennales, ils peuvent expliquer en grande partie les bilans carbone locaux et la variabilité interannuelle (Lindroth *et al.*, 2009).

### **DIFFÉRENTES MÉTHODES VISANT À ESTIMER LE PUIITS FORESTIER DU XX<sup>E</sup> SIÈCLE**

Il existe trois méthodes principales basées sur des mesures, c'est-à-dire ne reposant pas uniquement sur des modèles, qui permettent d'évaluer la valeur du puits de carbone des forêts à l'échelle mondiale : la méthode « résiduelle » (émissions de combustibles fossiles que l'on ne retrouve ni dans l'atmosphère, ni dans les océans), les inversions atmosphériques et les inventaires de forêts (tableau I, p. 267). D'autres méthodes basées sur des mesures, telles que les covariances turbulentes, s'avèrent utiles pour évaluer le bilan carbone des forêts sur quelques hectares, mais ne peuvent actuellement être extrapolées à l'échelle mondiale (Luyssaert *et al.*, 2010).

#### **Méthode « résiduelle » pour la valeur du puits : 1,3 PgC/an entre 2000 et 2009**

La force de l'approche résiduelle provient de ce qu'elle repose sur trois ensembles plutôt précis d'estimations (Le Quere *et al.*, 2009) :

- l'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> provenant des combustibles fossiles et du ciment, basée sur les chiffres mondiaux de production et d'utilisation de ces produits, avec une erreur standard associée (1  $\sigma$ ) de 6 % ;
- l'évaluation de leur pourcentage dans l'air, basée sur les mesures de concentration en CO<sub>2</sub>, avec une erreur standard associée (1  $\sigma$ ) de 2 % ;

— l'évaluation du puits océanique, basée sur des modèles biophysiques de l'océan, avec une erreur standard associée ( $1 \sigma$ ) de 17 %.

La quantité résiduelle de  $\text{CO}_2$  provenant des combustibles fossiles et du ciment que l'on ne retrouve ni dans l'atmosphère, ni dans les océans, est attribuée au puits terrestre. Il en résulte une valeur moyenne de 1,3 PgC/an pour la période 2000-2009, et de 0,5 PgC/an entre 1959 et 2009 (Le Quere *et al.*, 2009).

Cette méthode présente toutefois deux inconvénients. Tout d'abord, elle n'établit pas de distinction au niveau du puits entre les forêts et les terres consacrées à d'autres usages. Il y a de bonnes raisons de penser que la majeure partie du puits terrestre est due aux forêts. En effet, les terres non boisées séquestrent ou émettent du carbone principalement par l'intermédiaire de la matière organique du sol. Or, même si le sol contient deux fois plus de carbone que la biomasse des forêts à l'échelle mondiale, sa dynamique est beaucoup plus lente : un sol tempéré ordinaire ne peut perdre ou gagner que jusqu'à 30 tC/ha en 100 ans, alors que la réserve de biomasse de la forêt peut passer de 120-230 tC/ha à 0 tC/ha en un ou deux ans (Arrouays *et al.*, 2002 ; Keith *et al.*, 2009). En outre, une récente inversion atmosphérique réalisée pour l'Europe a permis d'attribuer 72 % du flux de carbone brut aux forêts (Peters *et al.*, 2010), et l'estimation du puits forestier mondial effectuée à partir des inventaires de forêts est proche du reste de 1,3 PgC/an (voir paragraphe "Inventaires de forêts...", ci-dessous). Il est par ailleurs improbable que le compartiment des produits du bois joue un rôle majeur : le stock total est estimé à environ 15 PgC, c'est-à-dire 1,7 % de la réserve de biomasse des forêts, et sa croissance annuelle atteint au maximum 0,06 PgC/an, soit 5 % du puits résiduel (Pingoud et Matthews, 2005).

Même en supposant que le puits forestier est à peu près égal au puits terrestre total, la méthode « résiduelle » présente un autre inconvénient : elle ne permet pas de séparer le bilan carbone des forêts qui restent des forêts et celui des forêts qui proviennent de la conversion de terres non boisées ou sont elles-mêmes converties pour un autre usage.

### **Inversions atmosphériques pour la localisation du puits : au nord du Tropique du Cancer**

Le principe des inversions atmosphériques est d'imposer des contraintes aux modèles climatiques mondiaux (GCM), qui simulent les flux de carbone entre l'atmosphère, la biosphère et l'océan, en utilisant les mesures réelles de concentration en  $\text{CO}_2$ . Le GCM localise alors les sources et puits de carbone les plus compatibles avec cet ensemble de contraintes, la configuration des vents simulée par le GCM, et l'information qu'il contient sur l'utilisation des terres et les lois de la biophysique.

Le résultat d'une inversion dépend du modèle. Toutes les inversions sont nécessairement en cohérence avec la méthode « résiduelle » à l'échelle mondiale, mais elles apportent quelques informations supplémentaires sur la configuration spatiale des sources et des puits qu'elles produisent. La comparaison des inversions utilisant différents modèles tend néanmoins à montrer un puits de 1 à 3 PgC/an légèrement croissant dans la zone boréale et tempérée du nord pour la période 1980-2006, et une source stable de 0 à 2 PgC/an sous les tropiques (Rayner, 2005 ; Gurney *et al.*, 2008).

### **Inventaires de forêts pour la valeur et la localisation : un puits tropical important neutralisé par la déforestation**

Pan *et al.* (2011) ont récemment publié des estimations du bilan carbone mondial des forêts, basées sur la compilation la plus exhaustive des inventaires de forêts et des données relatives à

l'utilisation des terres actuellement disponibles. Leur méthode présente l'avantage de pouvoir envisager les forêts comme une entité séparée et de faire la distinction entre différentes régions ainsi qu'entre les forêts restant forêts et les forêts provenant de la conversion de certaines terres. Elle a par contre l'inconvénient de dépendre de données hautement incertaines et rares en ce qui concerne les tropiques.

Néanmoins, cette approche donne des résultats largement en accord avec les deux méthodes précédentes : de 2000 à 2009, elle met en évidence un puits moyen annuel de 1,1 PgC/an dans les forêts tempérées et boréales de l'hémisphère Nord. Sous les tropiques, le puits forestier important issu des forêts anciennes et des recrûs combinés (2,7 PgC/an) est largement compensé par les émissions dues à la déforestation (2,9 PgC/an).

TABEAU I Différentes méthodes permettant d'évaluer le bilan carbone des forêts mondiales

Méthode	Portée	Informations obtenues
« Résiduelle » . .	Biosphère	La capacité de stockage du puits est passée de 0,5 PgC/an à 1,3 PgC/an entre 1959 et 2009.
Inversions atmosphériques	Biosphère	Zone tempérée et boréale de l'hémisphère nord : puits croissant, entre 1 et 3 PgC/an. Tropiques : source stable, entre 0 et 2 PgC/an.
Inventaires des forêts . . . . .	Uniquement forêts	Forêts tempérées et boréales de l'hémisphère nord : puits de 1,1 PgC/an. Forêts tropicales : puits important de 2,7 PgC/an, largement compensé par les émissions dues à la déforestation, s'élevant à 2,9 PgC/an.

## EXPLIQUER LE PUIITS FORESTIER DU XX<sup>E</sup> SIÈCLE

La tendance du bilan carbone des forêts soumises à des modifications de l'utilisation des terres et les causes de cette tendance sont assez claires : la déforestation et le reboisement constituent respectivement une source et un puits de carbone, et résultent de la demande relative aux terres (culture, bétail, logements ou produits du bois). Les causes des puits forestiers « naturels », c'est-à-dire ceux qui sont associés aux forêts restant forêts, sont, elles, beaucoup moins claires. Quatre causes possibles ont été identifiées : changement climatique, augmentation de concentration en CO<sub>2</sub>, augmentation des dépôts azotés provenant d'installations industrielles, de la combustion de combustibles fossiles et de pratiques agricoles et, enfin, évolution de la gestion et de la structure de l'âge des forêts (Houghton, 2007). Toutefois, l'importance relative de chacun de ces facteurs par rapport aux autres constitue toujours une question ouverte, même si trois axes de recherche offrent quelques pistes.

### Études empiriques sur site

La croissance des forêts peut être contrôlée à l'échelle locale, et permet une comparaison entre des sites exposés à différentes intensités de changement climatique – température, précipitation, etc., de concentration en CO<sub>2</sub> et de dépôts azotés. En utilisant cette approche, Solberg *et al.* (2009) apportent clairement la preuve de l'importance des dépôts azotés sur les forêts européennes et montrent que leur effet neutralise l'effet du changement de température. Plusieurs expériences ont mis en évidence l'intensification de la croissance due à une augmentation de concentration en CO<sub>2</sub>, même si la durabilité de cette intensification de la croissance à long terme

est toujours sujette à controverse (Bader *et al.*, 2010 ; Norby *et al.*, 2010 ; Silva *et al.*, 2010). De manière plus spécifique, la croissance des forêts dans les zones tempérées et boréales est probablement limitée à la fois par la concentration en CO<sub>2</sub> et l'azote, ce qui signifie qu'une augmentation de la valeur du puits due à la disponibilité accrue de l'un de ces facteurs sera nécessairement limitée si la disponibilité de l'autre facteur ne croît pas en parallèle (Hungate *et al.*, 2003).

### **Modèles de végétation locaux et mondiaux**

La modélisation des processus écophysiologiques en forêt permet d'analyser l'évolution du puits forestier dans différentes conditions environnementales et, par conséquent, d'évaluer l'importance relative de chaque facteur environnemental (climat, concentration en CO<sub>2</sub>, azote, et gestion). En se basant sur un modèle local, calibré pour quelques sites européens, Milne et Van Oijen (2005) ont mis en évidence que l'azote avait été le facteur déterminant principal de l'intensification du puits forestier observé au cours du XX<sup>e</sup> siècle, et que la concentration en CO<sub>2</sub> prendra probablement le relais au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. La question est de savoir dans quelle mesure cette conclusion locale peut être généralisée, même simplement à l'échelle de l'Europe.

Pour tirer des conclusions à l'échelle continentale ou mondiale, il est nécessaire d'utiliser un modèle de végétation mondial (GVM) plutôt que local. Le problème est qu'aucun de ces modèles GVM n'est actuellement capable de simuler simultanément les effets des quatre facteurs probablement déterminants (Le Quere *et al.*, 2009). C'est pourquoi le puits observé n'est attribué qu'à un nombre limité de facteurs et surestime vraisemblablement l'importance des facteurs pris en compte dans le modèle. Des modèles intégrant le climat et la concentration en CO<sub>2</sub> montrent que l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> a eu un impact plus important que le climat sur le puits forestier (Harrison *et al.*, 2008 ; Luo *et al.*, 2008 ; Ciais *et al.*, 2009). O-CN, un modèle GVM intégrant le climat, la concentration en CO<sub>2</sub> et l'azote montre que les dépôts d'azote expliquent la majeure partie du puits tempéré et boréal, tandis que la concentration en CO<sub>2</sub> explique seule le puits tropical (Zaehle *et al.*, 2010). Pour l'Europe, ORCHIDEE-FM, un modèle GVM intégrant le climat, la concentration en CO<sub>2</sub> et la gestion met en évidence que, bien que le climat et la gestion soient souvent des facteurs déterminants essentiels sur le plan local, l'effet globalement positif de la concentration en CO<sub>2</sub> sur l'augmentation du puits forestier est prépondérant à l'échelle du continent (Bellassen *et al.*, 2011).

## **ADAPTER LES FORÊTS : À QUOI ET COMMENT ?**

### **L'avenir du puits forestier est incertain**

Comme nous l'avons expliqué dans la partie "Expliquer le puits forestier du XX<sup>e</sup> siècle" (p. 267), la compréhension actuelle des causes du puits forestier « naturel » reste imparfaite : l'hypothèse la plus probable semble que la concentration en CO<sub>2</sub> et les dépôts azotés soient des facteurs plus importants que le climat et la gestion aux échelles européenne et mondiale, mais on ne peut tirer aucune conclusion définitive quant à leur impact relatif, et encore moins une quantification et une compréhension précises de leur impact physiologique. Les divergences importantes des GVM quant au comportement du puits terrestre dans un scénario de changement climatique pour le XXI<sup>e</sup> siècle ne constituent donc pas une surprise : certains lui attribuent une valeur de 10 GtC/an tandis que d'autres prévoient que la biosphère deviendra une source de 6 GtC/an (Friedlingstein *et al.*, 2006).

### **Pistes de recherche pour adapter les forêts à un avenir incertain**

L'intensité du futur changement climatique est incertaine. Comme nous l'avons montré au paragraphe précédent, la réponse des forêts à l'évolution environnementale est également incertaine.

Malgré cette double incertitude, certaines options d'adaptation, qui paraissent d'ores et déjà raisonnables, mériteraient d'être étudiées plus avant : le risque d'incendie augmentera probablement, ce qui constitue un argument en faveur de la conversion des forêts de conifères, où le feu se propage plus facilement, en forêts de feuillus (Schelhaas *et al.*, 2010). Il ne faut pas se contenter d'évaluer ces options d'adaptation par rapport au changement climatique ; il faut également les examiner par rapport à différents impératifs économiques et d'autres services forestiers tels que la biodiversité. Toutefois, même si l'évaluation s'effectue uniquement par rapport au changement climatique, il se peut que l'adaptation s'effectue au détriment de l'atténuation.

TABLEAU II **Analyse conjointe des mesures d'adaptation et d'atténuation au changement climatique en forêt**

Adaptation / Atténuation	Gagnant	Perdant
Gagnant . . . . .	Prévention des incendies, reboisement post-catastrophe, conversion de taillis en futaie, ...	Modification des durées de rotation,...
Perdant . . . . .	Modification des durées de rotation, conversion de conifères en feuillus, maîtrise de sous-bois (?), ...	Arrêt de l'exploitation (sur le long terme), ...

Le tableau II présente les impacts probables de quelques mesures possibles sur l'adaptation et l'atténuation :

- la prévention des incendies est bénéfique aux deux approches, de même que la conversion des taillis à faible rendement, qui ne stockent que faiblement le carbone et sont susceptibles de prendre feu, en futaies disposant d'une capacité de stockage supérieure et d'une vulnérabilité au feu inférieure ;
- le raccourcissement des rotations peut constituer une stratégie d'adaptation en réponse à un risque de tempêtes accru, mais a pour effet de réduire la capacité de stockage forestier du carbone, et même la productivité des forêts si elles sont abattues avant d'avoir atteint l'optimum ;
- à l'inverse, repousser l'âge de la coupe finale des peuplements équiennes pourrait s'avérer bénéfique à l'atténuation lorsqu'il est possible de sécuriser les stocks de carbone accumulés contre les aléas (tempêtes, incendies, ravageurs, extrêmes climatiques). Ceci augmente les réserves de carbone des forêts et permet de produire en fin de compte des produits de plus grande durée de vie ;
- convertir des forêts de conifères en forêts de feuillus constitue une mesure préventive contre les incendies, mais peut avoir un impact défavorable sur l'atténuation étant donné que les conifères ont tendance à pousser plus vite ;
- à long terme, l'arrêt de l'exploitation forestière réduit le potentiel d'atténuation des produits du bois (substitution de combustibles fossiles pour le bois énergie et substitution de matériaux plus énergivores pour le bois matériau) et augmente la sensibilité aux tempêtes et aux animaux nuisibles.

## PERSPECTIVES POUR LES ANNÉES QUI VIENNENT

Toutes les méthodes disponibles montrent que les forêts ont constitué un puits net de carbone dans un passé récent, en séquestrant un peu plus de 1 PgC/an. Ce puits forestier se répartit de façon égale entre les zones tempérées et boréales d'une part, et la zone tropicale d'autre part.



Cependant, dans cette dernière, les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la déforestation contre-balancent la majeure partie de l'action du puits des forêts existantes et du recrû. La concentration en CO<sub>2</sub> et les dépôts azotés sont des facteurs largement dominants pour ce puits, la concentration en CO<sub>2</sub> jouant un rôle plus important dans les forêts tropicales et les dépôts azotés constituant peut-être le facteur essentiel pour les forêts tempérées et boréales. En raison de la connaissance imparfaite du puits forestier, il est difficile de prévoir comment ce puits évoluera dans un climat changeant.

Cependant, dans 5 à 10 ans, plusieurs modèles GVM seront capables de simuler les quatre principaux déterminants du puits forestier. Bénéficiant de davantage de recul quant aux études sur l'enrichissement en concentration en CO<sub>2</sub> ainsi que d'autres éléments empiriques issus des systèmes de plus en plus utilisés de surveillance des terres, ils permettront de réduire de façon spectaculaire l'incertitude sur la quantification et la localisation du puits forestier. Il n'est pas impossible d'espérer que l'on disposera en 2020 d'une classification des principaux déterminants du puits pour chaque biome forestier.

Cependant, même si ces conclusions appellent à une intensification des recherches sur les interactions biogéochimiques entre forêts et climat, il faut garder à l'esprit que les forêts et le climat ne se réduisent pas au cycle du carbone (Bonan, 2008 ; Jackson *et al.*, 2008). De récentes études, empiriques et par modélisation, nous rappellent que les aspects biophysiques de ces interactions ne peuvent être négligés : l'albédo plus élevé des forêts, notamment dans la zone boréale, peut causer un réchauffement important de la surface de la terre (Davin *et al.*, 2007), tandis qu'en parallèle, en raison d'une réponse différente en termes de transpiration, notamment lors des vagues de chaleur, les forêts ont localement un effet de refroidissement (Teuling *et al.*, 2010). Il est donc également important de ne pas délaissier ce domaine de recherche sur les interactions biophysiques entre forêts et climat, même si l'horizon pour parvenir à un socle consolidé de connaissances dans ce domaine semble plus lointain.

Valentin BELLASSEN  
CDC Climat Research  
47 rue de la Victoire  
F-75009 PARIS  
(valentin.bellassen@cdclimat.com)

Sebastiaan LUYSSAERT  
Laboratoire des Sciences du Climat  
et de l'Environnement (LSCE)  
CEA-Orme des merisiers  
F-91114 GIF-SUR-YVETTE

## BIBLIOGRAPHIE

- ACHARD (F.), EVA (H.D.), STIBIG (H.J.), MAYAUX (P.), GALLEGRO (J.), RICHARDS (T.), MALINGREAU (J.-P.). — Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. — *Science*, 297, 2002, pp. 999-1002.
- ALLARD (V.), OURCIVAL (J.-M.), RAMBAL (S.), JOFFRE (R.), ROCHETEAU (A.). — Seasonal and annual variation of carbon exchange in an evergreen Mediterranean forest in southern France. — *Global Change Biology*, 14, 2008, pp. 714-725.
- ARROUAYS (D.), BALESSENT (J.), GERMON (J.-C.), JAYET (P.-A.), SOUSSANA (J.-F.), STENGEL (P.). — Increasing carbon stocks in French agricultural soils. — Paris : INRA, 2002.

- BADER (M.K.), SIEGWOLF (R.), KÖRNER (C.). — Sustained enhancement of photosynthesis in mature deciduous forest trees after 8 years of free air CO<sub>2</sub> enrichment. — *Planta*, 232, 2010, pp. 1115-1125.
- BELLASSEN (V.), VIOVY (N.), LUYSSAERT (S.), MAIRE (G.), SCHELHAAS (M.J.), CIAIS (P.). — Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. — *Global Change Biology*, vol. 17, n° 11, 2011, pp. 3274-3292.
- BONAN (G.B.). — Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. — *Science*, 320, 2008, pp. 1444-1449.
- CIAIS (P.), PIAO (S.L.), CADULE (P.), FRIEDLINGSTEIN (P.), CHEDIN (A.). — Variability and recent trends in the African terrestrial carbon balance. — *Biogeosciences*, 6, 2009, pp. 1935-1948.
- CIAIS (P.), REICHSTEIN (M.), VIOVY (N.), GRANIER (A.), OGEE (J.), ALLARD (V.), AUBINET (M.), BUCHMANN (N.), BERNHOFER (C.), CARRARA (A.), CHEVALLIER (F.), DE NOBLET (N.), FRIEND (A.D.), FRIEDLINGSTEIN (P.), GRUNWALD (T.), HEINESCH (B.), KERONEN (P.), KNOHL (A.), KRINNER (G.), LOUSTAU (D.), MANCA (G.), MATTEUCCI (G.), MIGLIETTA (F.), OURCIVAL (J.M.), PAPALE (D.), PILEGAARD (K.), RAMBAL (S.), SEUFERT (G.), SOUSSANA (J.F.), SANZ (M.J.), SCHULZE (E.D.), VESALA (T.), VALENTINI (R.). — Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. — *Nature*, 437, 2005, pp. 529-533.
- DAVIN (E.L.), DE NOBLET-DUCOUDRE (N.), FRIEDLINGSTEIN (P.). — Impact of land cover change on surface climate: Relevance of the radiative forcing concept. — *Geophysical Research Letters*, 34, 2007, L13702.
- DEFRIES (R.S.), HOUGHTON (R.A.), HANSEN (M.C.), FIELD (C.B.), SKOLE (D.), TOWNSHEND (J.). — Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. — *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 2002, 14256.
- FAO. — Abiotic disturbances and their influence on forest health. — Rome : FAO, 2011.
- FAO. — Global Forest Resource Assessment. — Rome : FAO, 2010.
- FAOSTAT. — Rome : FAO, 2011. [En ligne] URL : <http://faostat.fao.org/>
- FOREST SERVICE OF BRITISH COLUMBIA. — 2011. [En ligne] URL : <http://www.for.gov.bc.ca/>
- FRIEDLINGSTEIN (P.), COX (P.), BETTS (R.), BOPP (L.), VON BLOH (W.), BROVKIN (V.), CADULE (P.), DONEY (S.), EBY (M.), FUNG (I.) *et al.* — Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C<sub>4</sub>MIP model inter-comparison. — *Journal of Climate*, 19, 2006, pp. 3337-3353.
- FROLKING (S.), PALACE (M.W.), CLARK (D.B.), CHAMBERS (J.Q.), SHUGART (H.H.), HURTT (G.C.). — Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on above-ground biomass and canopy structure. — *Journal of Geophysical Research*, 114, 2009.
- GARDINER (B.), BLENNOW (K.), CARNUS (J.-M.), FLEISCHER (P.), INGEMARSON (F.), LANDMANN (G.), LINDNER (M.), MARZANO (M.), NICOLL (B.), ORAZIO (C.), PEYRON (J.-L.), REVIRON (M.P.), SCHELHAAS (M.J.), SCHUCK (A.), SPIELMANN (M.), USBECK (T.). — Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts. — Final report to DG Environment. — EFI, 2010. — 113 p.
- GURNEY (K.R.), BAKER (D.), RAYNER (P.), DENNING (S.). — Interannual variations in continental-scale net carbon exchange and sensitivity to observing networks estimated from atmospheric CO<sub>2</sub> inversions for the period 1980 to 2005. — *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 22, 2008, GB 3025.
- HARRISON (R.G.), JONES (C.D.), HUGHES (J.K.). — Competing roles of rising CO<sub>2</sub> and climate change in the contemporary European carbon balance. — *Biogeosciences*, 5, 2008, pp. 1-10.
- HOUGHTON (R.A.). — Balancing the global carbon budget. — *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 2007, pp. 313-347.
- HUNGATE (B.A.), DUKES (J.S.), SHAW (M.R.), LUO (Y.Q.), FIELD (C.B.). — Nitrogen and climate change. — *Science*, 302, 2003, pp. 1512-1513.
- INTACT FOREST LANDSCAPE. — 2011. — [En ligne] URL : <http://www.intactforests.org/>
- JACKSON (R.B.), RANDERSON (J.T.), CANADELL (J.G.), ANDERSON (R.G.), AVISSAR (R.), BALDOCCHI (D.D.), BONAN (G.B.), CALDEIRA (K.), DIFFENBAUGH (N.S.), FIELD (C.B.), HUNGATE (B.A.), JOBBÁGY (E.G.), KUEPPERS (L.M.), NOSETTO (M.D.), PATAKI (D.E.). — Protecting climate with forests. — *Environmental Research Letters*, 3, 2008, 044006.
- KEITH (H.), MACKEY (B.G.), LINDENMAYER (D.B.). — Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. — *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 2009, pp. 11635-11640.

- LE QUERE (C.), RAUPACH (M.R.), CANADELL (J.G.), MARLAND (G.), BOPP (L.), CIAIS (P.), CONWAY (T.J.), DONEY (S.C.), FEELY (R.A.), FOSTER (P.), FRIEDLINGSTEIN (P.), GURNEY (K.), HOUGHTON (R.A.), HOUSE (J.I.), HUNTINGFORD (C.), LEVY (P.E.), LOMAS (M.R.), MAJKUT (J.), METZL (N.), OMETTO (J.P.), PETERS (G.P.), PRENTICE (I.C.), RANDERSON (J.T.), RUNNING (S.W.), SARMIENTO (J.L.), SCHUSTER (U.), SITCH (S.), TAKAHASHI (T.), VIOVY (N.), VAN DER WERF (G.R.), WOODWARD (F.I.). — Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. — *Nature Geoscience*, 2, 2009, pp. 831-836.
- LEWIS (S.L.), BRANDO (P.M.), PHILLIPS (O.L.), VAN DER HEIJDEN (G.M.F.), NEPSTAD (D.). — The 2010 Amazon Drought. — *Science*, 331, 2011, pp. 554-554.
- LEWIS (S.L.), LOPEZ-GONZALEZ (G.), SONKE (B.), AFFUM-BAFFOE (K.), BAKER (T.R.), OJO (L.O.), PHILLIPS (O.L.), REITSMA (J.M.), WHITE (L.), COMISKEY (J.A.), DJUIKOUO (M.N.), EWANGO (C.E.N.), FELDPAUSCH (T.R.), HAMILTON (A.C.), GLOOR (M.), HART (T.), HLADIK (A.), LLOYD (J.), LOVETT (J.C.), MAKANA (J.R.), MALHI (Y.), MBAGO (F.M.), NDANGALASI (H.J.), PEACOCK (J.), PEH (K.S.H.), SHEIL (D.), SUNDERLAND (T.), SWAINE (M.D.), TAPLIN (J.), TAYLOR (D.), THOMAS (S.C.), VOTERE (R.), WOLL (H.). — Increasing carbon storage in intact African tropical forests. — *Nature*, 457, 2009, pp. 1003-1003.
- LINDROTH (A.), LAGERGREN (F.), GRELE (A.), KLEMEDTSSON (L.), LANGVALL (O.), WESLIEN (P.), TUULIK (J.). — Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. — *Global Change Biology*, 15, 2009, pp. 346-355.
- LUO (Y.Q.), GERTEN (D.), LE MAIRE (G.), PARTON (W.J.), WENG (E.S.), ZHOU (X.H.), KEOUGH (C.), BEIER (C.), CIAIS (P.), CRAMER (W.), DUKES (J.S.), EMMETT (B.), HANSON (P.J.), KNAPP (A.), LINDER (S.), NEPSTAD (D.), RUSTAD (L.). — Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and CO<sub>2</sub> on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones. — *Global Change Biology*, 14, 2008, pp. 1986-1999.
- LUYSSAERT (S.), CIAIS (P.), PIAO (S.L.), SCHULZE (E.D.), JUNG (M.), ZAEHLE (S.), SCHELHAAS (M.J.), REICHSTEIN (M.), CHURKINA (G.), PAPALE (D.), ABRIL (G.), BEER (C.), GRACE (J.), LOUSTAU (D.), MATTEUCCI (G.), MAGNANI (F.), NABUURS (G.J.), VERBEECK (H.), SULKAVA (M.), VAN DER WERF (G.R.), JANSSENS (I.A.), TEAM (C.-I.S.). — The European carbon balance. Part 3: forests. — *Global Change Biology*, 16, 2010, pp. 1429-1450.
- LUYSSAERT (S.), SCHULZE (E.D.), BORNER (A.), KNOHL (A.), HESSENMOLLER (D.), LAW (B.E.), CIAIS (P.), GRACE (J.). — Old-growth forests as global carbon sinks. — *Nature*, 455, 2008, pp. 213-215.
- MILNE (R.), VAN OIJE (M.). — A comparison of two modelling studies of environmental effects on forest carbon stocks across Europe. — *Annals of Forest Science*, 62, 2005, pp. 911-923.
- MOUILLOT (F.), FIELD (C.B.). — Fire history and the global carbon budget: a 10x 10 fire history reconstruction for the 20th century. — *Global Change Biology*, 11, 2005, pp. 398-420.
- MOUILLOT (F.), NARASIMHA (A.), BALKANSKI (Y.), LAMARQUE (J.-F.), FIELD (C.B.). — Global carbon emissions from biomass burning in the 20th century. — *Geophysical Research Letters*, 33, 2006.
- NORBY (R.J.), WARREN (J.M.), IVERSEN (C.M.), MEDLYN (B.E.), MCMURTRIE (R.E.). — CO<sub>2</sub> enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. — *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 2010, pp. 19368-19373.
- ODUM (E.P.). — The Strategy of Ecosystem Development. — *Science*, 164, 1969, pp. 262-270.
- PAN (Y.), BIRDSEY (R.A.), FANG (J.), HOUGHTON (R.), KAUPPI (P.E.), KURZ (W.A.), PHILLIPS (O.L.), SHVIDENKO (A.), LEWIS (S.L.), CANADELL (J.G.), CIAIS (P.), JACKSON (R.B.), PACALA (S.W.), MCGUIRE (A.D.), PIAO (S.), RAUTIAINEN (A.), SITCH (S.), HAYES (D.). — A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. — *Science*, 333, 2011, pp. 988-993.
- PETERS (W.), KROL (M.C.), VAN DER WERF (G.R.), HOUWELING (S.), JONES (C.D.), HUGHES (J.), SCHAEFER (K.), MASARIE (K.A.), JACOBSON (A.R.), MILLER (J.B.), CHO (C.H.), RAMONET (M.), SCHMIDT (M.), CIATTAGLIA (L.), APADULA (F.), HELTA (D.), MEINHARDT (F.), DI SARRA (A.G.), PIACENTINO (S.), SFERLAZZO (D.), AALTO (T.), HATAKKA (J.), STROM (J.), HASZPRA (L.), MEIJER (H.A.J.), VAN DER LAAN (S.), NEUBERT (R.E.M.), JORDAN (A.), RODO (X.), MORGUI (J.A.), VERMEULEN (A.T.), POPA (E.), ROZANSKI (K.), ZIMNOCH (M.), MANNING (A.C.), LEUENBERGER (M.), UGLIETTI (C.), DOLMAN (A.J.), CIAIS (P.), HEIMANN (M.), TANS (P.P.). — Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. — *Global Change Biology*, 16, 2010, pp. 1317-1337.
- PHILLIPS (O.L.), ARAGAO (L.E.O.C.), LEWIS (S.L.), FISHER (J.B.), LLOYD (J.), *et al.* — Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. — *Science*, 323, 2009, pp. 1344-1347.
- PINGOUD (K.), MATTHEWS (R.). — Global carbon stocks and stock changes in harvested wood products: a review of current understanding and estimates. Presented at the Greenhouse Gas Aspects of Biomass Cascading - Reuse, Recycling and Energy Generation. — Paris : IEA, 2005.
- PONGRATZ (J.), REICK (C.), RADDATZ (T.), CLAUSSEN (M.). — A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. — *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 2008.

- RAYNER (P.J.). — Two decades of terrestrial carbon fluxes from a carbon cycle data assimilation system (CCDAS). — *Global Biogeochemical Cycles*, 19, 2005.
- REICHSTEIN (M.), CIAIS (P.), PAPALE (D.), VALENTINI (R.), RUNNING (S.), VIOVY (N.), CRAMER (W.), GRANIER (A.), OGEE (J.), ALLARD (V.), AUBINET (M.), BERNHOFER (C.), BUCHMANN (N.), CARRARA (A.), GRUNWALD (T.), HEIMANN (M.), HEINESCH (B.), KNOHL (A.), KUTSCH (W.), LOUSTAU (D.), MANCA (G.), MATTEUCCI (G.), MIGLIETTA (F.), OURCIVAL (J.M.), PILEGAARD (K.), PUMPANEN (J.), RAMBAL (S.), SCHAPHOFF (S.), SEUFERT (G.), SOUSSANA (J.F.), SANZ (M.J.), VESALA (T.), ZHAO (M.). — Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. — *Global Change Biology*, 13, 2007, pp. 634-651.
- SCHELHAAS (M.-J.), HENGEVELD (G.), MORIONDO (M.), REINDS (G.J.), KUNDZEWICZ (Z.W.), MAAT (H.), BINDI (M.). — Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry. — *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15, 2010, pp. 681-701.
- SCHELHAAS (M.J.), NABUURS (G.J.), SCHUCK (A.). — Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. — *Global Change Biology*, 9, 2003, pp. 1620-1633.
- SHVIDENKO (A.), SCHEPASCHENKO (D.), SUKHININ (A.), MCCALLUM (I.), MAKSYUTOV (S.). — Carbon Emissions from Forest Fires in Boreal Eurasia between 1998-2010. Presented at The 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, South Africa. — 2011. — 11 p.
- SILVA (L.C.R.), ANAND (M.), LEITHEAD (M.D.). — Recent Widespread Tree Growth Decline Despite Increasing Atmospheric CO<sub>2</sub>. — *PLoS ONE*, 5, 2010, e11543.
- SOLBERG (S.), DOBBERTIN (M.), REINDS (G.J.), LANGE (H.), ANDREASSEN (K.), FERNANDEZ (P.G.), HILDINGSSON (A.), DE VRIES (W.). — Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. — *Forest Ecology and Management*, 258, 2009, pp. 1735-1750.
- TEULING (A.J.), SENEVIRATNE (S.I.), STÖCKLI (R.), REICHSTEIN (M.), MOORS (E.), CIAIS (P.), LUYSSAERT (S.), VAN DEN HURK (B.), AMMANN (C.), BERNHOFER (C.), DELLWIK (E.), GIANELLE (D.), GIELEN (B.), GRÜNWALD (T.), KLUMPP (K.), MONTAGNANI (L.), MOUREAUX (C.), SOTTOCORNOLA (M.), WOHLFAHRT (G.). — Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves. — *Nature Geoscience*, 3, 2010, pp. 722-727.
- ZAEHLE (S.), FRIEND (A.D.), FRIEDLINGSTEIN (P.), DENTENER (F.), PEYLIN (P.), SCHULZ (M.). — Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 2. Role of the nitrogen cycle in the historical terrestrial carbon balance. — *Global Biogeochemical Cycles*, 24, 2010.

---

## LE CYCLE DU CARBONE DANS LES FORÊTS ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : COMPRENDRE LE PASSÉ POUR S'ADAPTER AU FUTUR (Résumé)

Une série d'événements extrêmes affectant les forêts et peut-être en rapport avec le changement climatique — ravageurs, tempêtes, incendies, sécheresses — a récemment fait la une des médias et des articles scientifiques. Ces documents présentent les forêts comme des sources de carbone. À l'inverse, toutes les méthodes d'estimation du bilan carbone des forêts à l'échelle mondiale mettent en évidence une absorption nette, un puits mondial de plus d'un milliard de tonnes de carbone par an (1 PgC/an). La modification de l'utilisation des terres affecte fortement ce bilan mondial, notamment en zone tropicale, ce qui met en évidence un puits forestier « naturel » encore plus important, nécessaire pour assurer la cohérence avec les valeurs enregistrées dans l'atmosphère. Les quatre principaux facteurs déterminants de ce puits forestier « naturel » sont les suivants : changement climatique, concentration accrue du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère, augmentation des dépôts d'azote et modifications de l'intensité de la gestion forestière. Même si nous n'avons pour l'instant qu'une compréhension imparfaite des causes du puits forestier, il semble que la concentration en CO<sub>2</sub> et les dépôts azotés en soient les causes majeures à l'échelle mondiale. L'effet du CO<sub>2</sub> serait particulièrement important sous les tropiques alors que les dépôts azotés seraient prédominants partout ailleurs. Une analyse simultanée des différentes options d'adaptation de la gestion forestière quant à leurs avantages en termes d'adaptation et d'atténuation révèle des exemples de mesures « sans regret » avantageuses malgré l'incertitude qui entoure le risque climatique.

**THE CARBON CYCLE IN FORESTS AND CLIMATE CHANGE - UNDERSTANDING THE PAST TO ADAPT TO THE FUTURE [Abstract]**

A series of extreme events affecting forests that are perhaps related to climate change — pests, storms, fires and droughts — has recently received much coverage in the media and in scientific publications. These documents describe forests as sources of carbon. In contrast, all the methods for estimating the carbon balance of forests worldwide show a net absorption, a global sink of over a billion tons of carbon per year (1 PgC/yr.). Changing land use strongly affects the global balance, especially in the tropics, highlighting that an even greater “natural” forest sink is necessary to ensure consistency with the values recorded in the atmosphere. The four main determining factors for this “natural” forest sink are: climate change, increased carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration in the atmosphere, increased nitrogen deposition and changes in the intensiveness of forest management. Even though our understanding of the causes of forest sinks is still imperfect, it appears that the concentration of CO<sub>2</sub> and nitrogen deposition are the major causes on the global scale. The effect of CO<sub>2</sub> is particularly important in the tropics while nitrogen deposition is thought to be predominant everywhere else. Simultaneous assessment of different adaptation options for forest management in terms of their benefits in the areas of adaptation and mitigation shows up examples of “no regrets” measures in spite of the uncertainty connected with climate risk.

---