



**HAL**  
open science

## Forêt et climat : rôle des forêts dans le cycle des gaz à effet de serre et les échanges d'énergie avec l'atmosphère

Denis Loustau, Jean-Luc Dupouey

### ► To cite this version:

Denis Loustau, Jean-Luc Dupouey. Forêt et climat : rôle des forêts dans le cycle des gaz à effet de serre et les échanges d'énergie avec l'atmosphère. 8. Colloque ARBORA "Carbone, forêt, bois : impacts du changement climatique, stratégies pour la filière?", Dec 2005, Bordeaux, France. 13 p. hal-02825903

**HAL Id: hal-02825903**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02825903>**

Submitted on 7 Jun 2020

**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.

# **Forêts et climat: rôle des forêts dans le cycle des gaz à effet de serre et les échanges d'énergie avec l'atmosphère.**

**Denis Loustau (1) et Jean-Luc Dupouey (2)**

(1) INRA, Unité de recherches EPHYSE, BP81, Villenave d'Ornon 33883.  
loustau@pierroton.inra.fr.

(2) INRA, Unité mixte de recherches EEF, BP83, Champenoux 54280.  
dupouey@nancy.inra.fr.

## **Remerciements**

Cette synthèse reprend plusieurs informations données par Jean Claude Germon, Directeur de Recherches à l'INRA Dijon.

## **Résumé**

Cette communication propose une synthèse sur le rôle des forêts en général et le rôle de la forêt de Pin maritime en particulier sur le climat. Elle donne un aperçu sur le fonctionnement de l'effet de serre, les gaz atmosphériques impliqués et les autres impacts possibles des forêts sur le climat. A partir d'une approche simplifiée elle compare les impacts climatiques de trois scénarios de sylviculture du Pin maritime et montre l'importance de la durée considérée pour le calcul des impacts sur les effets relatifs du stockage de carbone *in situ* et de la production, les effets de changements d'albedo étant quant à eux d'un ordre de grandeur inférieurs.

# 1. Introduction

Le rôle des forêts de l'hémisphère Nord dans le cycle du carbone fait l'objet de grands programmes de recherche internationaux, nationaux et régionaux depuis que les premières études permettant de dresser le bilan atmosphérique du CO<sub>2</sub> ont montré que les surfaces forestières semblaient être responsables d'un flux net d'absorption de carbone estimé à environ 2.3 Gigatonnes de carbone par an (GtC. an<sup>-1</sup>, figure 1) soit un tiers des émissions de carbone fossile provoqué par les activités humaines. Si le CO<sub>2</sub> est le gaz à effet de serre (en abrégé *ges*) le mieux médiatisé puisqu'enjeu d'accord de régulation internationaux, on finit par oublier qu'il n'est pas le plus important. La place centrale qu'il occupe actuellement sur le plan économique et politique, dans le secteur forêt – bois - papier en particulier, ne doit pas occulter les autres impacts des forêts sur le climat.

Les écosystèmes forestiers participent au cycle des éléments et molécules intervenant dans les autres gaz à effet de serre d'origine anthropique comme le méthane, l'oxyde nitreux et les fluorures de carbone. Par ailleurs, les forêts présentent des propriétés radiatives différentes, *e.g.*, une albedo<sup>1</sup> plus faible, des cultures ou des prairies. De plus, ces propriétés sont variables d'un type d'écosystème forestier à l'autre, entre conifères et feuillus par exemple, ou encore entre une forêt adulte fermée, une forêt juvénile ou une friche en régénération suite à une coupe rase, un incendie ou un chablis. Les échanges d'énergie entre un couvert forestier et l'atmosphère et leur répartition en chaleur, rayonnement ou évapotranspiration jouent aussi un rôle important sur le plan climatique.

Cette courte synthèse résume les connaissances disponibles sur les principaux *ges* et le rôle des écosystèmes forestiers vis-à-vis du climat et propose un cadre d'analyse des impacts sur le climat global et local de la sylviculture d'une espèce. Elle s'appuie sur les données collectées par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le Climat (G.I.E.C., IPCC en anglais) dans ses différents rapports de 2001 et les études faites en France et en Aquitaine sur les forêts françaises (Dupouey et al. 1999, Chantal 2001, Loustau et al. 2005).

## 2. L'effet de serre.

On désigne par "effet de serre" l'absorption par différents composés atmosphériques (*ges*) du rayonnement infrarouge émis par la terre, ce qui provoque une élévation de la température atmosphérique à la surface de la terre. L'effet de serre naturel des gaz atmosphériques (vapeur d'eau, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O,...<sup>2</sup>) élève la température à la surface de la terre de +18°C : sans la présence de ces gaz, la température moyenne de la terre serait proche de -3°C au lieu de +15°C en moyenne globale annuelle.

On observe depuis plusieurs décennies un déséquilibre entre émission et absorption de CO<sub>2</sub> et autres *ges* par la terre. Ce déséquilibre est responsable d'un accroissement du stock atmosphérique de carbone de  $3,3 \pm 0.1$  Gt par an soit une augmentation de concentration en CO<sub>2</sub> de +1,5 ppm par an. La cause de ce déséquilibre est avant tout les émissions liées aux activités humaines et à la déforestation (fig. 1). Les principales activités concernées sont toutes celles qui entraînent la combustion de carburants fossiles, la déforestation et les autres changements d'usage des terres, la fabrication de ciment, l'élevage et l'agriculture. L'augmentation de gaz à effet de serre liée aux activités humaines sera appelée ici "effet de serre anthropique".

---

<sup>1</sup> L'albedo est le coefficient de réflexion du rayonnement solaire par une surface. La neige fraîche a une albedo proche de 1, une forêt de conifères environ 0.1.

<sup>2</sup> Les deux principaux constituants de l'atmosphère, N<sub>2</sub>, et O<sub>2</sub> ne jouent aucun rôle dans l'effet de serre.

## ENCART 1. Les gaz à Effet de Serre

Par ordre de forçage radiatif (voir la définition de ce terme dans l'encart 2) décroissant, les *ges* sont:

### La vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O.)

C'est le *ges* le plus abondant dans l'atmosphère (~50 fois plus que le CO<sub>2</sub>, soit entre 0 et 20 000 ppm, 0-2%). Sa concentration, variable, est essentiellement sous le contrôle du flux d'évaporation depuis l'océan et est peu influencée par les activités humaines.

### Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

La concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> est passé de 280 ppm<sup>3</sup> pendant la période préindustrielle (1750) à ~370 ppm en 2002. Le CO<sub>2</sub> est le principal *ges* influencé directement par l'activité humaine. Les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> sont responsables de 60% de l'effet de serre anthropique.

Les flux de carbone échangés entre les compartiments biosphérique, océanique atmosphérique et sédimentaires sont générés par des processus physico-chimiques et biologiques (Fig 1). La répartition actuelle du carbone entre les compartiments océanique, biosphérique-continental, roches carbonatées et réserves d'hydrocarbures fossiles d'une part et l'atmosphère d'autre part, est le résultat du fonctionnement des écosystèmes continentaux et marins, fonctionnement étant compris ici comme l'ensemble des échanges de masse et d'énergie avec l'atmosphère. Les méthodes de bilan atmosphérique montrent que la biosphère continentale accumule actuellement du carbone, selon un mécanisme encore mal connu: l'enrichissement de l'atmosphère est plus faible que ce que permet de calculer le bilan émissions de CO<sub>2</sub>-fixation par la photosynthèse. Cette fixation nette de carbone par les écosystèmes continentaux atténue d'environ un tiers l'effet des émissions de carbone fossile sur la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cette fixation est estimée par le GIEC à 1,9 (2,3) ± 1,3 (1,3) et Gt C.an<sup>-1</sup> pour les décennies 1980-1989 (1990-1998)

### Méthane (CH<sub>4</sub>)

C'est le principal composant du gaz naturel. Sa concentration dans l'atmosphère est inférieure à 2 ppm (environ 200 fois moins que le CO<sub>2</sub>) mais le pouvoir de réchauffement d'une molécule de méthane est 7,5 fois supérieur à celui d'une molécule de CO<sub>2</sub> et il joue donc un rôle significatif dans l'effet de serre (4% de celui du CO<sub>2</sub> et 20% de l'effet de serre anthropique). Le temps de résidence dans l'atmosphère d'une molécule de CH<sub>4</sub> est de 12 années, il est détruit par des réactions chimiques avec les radicaux libres hydroxyles (OH\*) de la troposphère qui le transforment en CO<sub>2</sub>. Sa principale source naturelle est la décomposition de matière organique dans les milieux sans oxygène: tube digestif des animaux, marais et zones humides.

L'activité humaine est responsable d'un fort accroissement de la production de méthane par l'exploitation du pétrole, charbon et gaz naturel, l'élevage, la culture du riz, le traitement des déchets organiques ou animaux et des ordures. Les forêts tempérées se comportent dans leur majorité comme un puits de méthane

### Oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Le ppm signifie partie par million. Une concentration atmosphérique en un gaz de 1ppm signifie que l'atmosphère contient un volume de ce gaz pour 1000 000 volumes d'air. De même, 1 ppb est une partie par milliard.

<sup>4</sup> ne doit pas être confondu avec les oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>) produits par exemple par les moteurs automobiles

C'est un *ges* mineurs, dont la concentration dans l'atmosphère est de 0,3 ppm et augmente d'environ 0,25% par an. Sa durée de vie dans l'atmosphère est de 120 ans. Les sources anthropiques de N<sub>2</sub>O ne sont pas clairement identifiées (industrie chimique, déforestation), deux tiers des émissions de N<sub>2</sub>O sont cependant attribués aux sols, cultivés ou non. Les émissions par les sols agricoles ou forestiers sont considérées en première approximation comme une proportion constante (1,25 %, avec une très large incertitude) des intrants azotés, auxquelles on ajoute les émissions des sols organiques mis en cultures, qui sont importantes dans certains pays. L'estimation de l'impact des forêts tropicales et tempérées est encore très incertaine. L'oxyde nitreux intervient pour 6% dans l'effet de serre anthropique (fig. 4).

#### Les CFC

Famille de composés de fluorures de carbone contribuant pour 14% à l'effet de serre anthropique, en légère diminution après un pic observé au début des années 1990 grâce à la réduction des émissions (protocole de Montréal).

#### Les composés à effet de serre indirect

Ils n'ont pas par eux même, un effet significatif mais peuvent affecter d'autres *ges* importants. Les principaux sont le monoxyde carbone (CO), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub> dont NO et NO<sub>2</sub>) les gaz volatiles organiques autres que le méthane.

### **Encart 2. Chiffrage de l'impact climatique des *ges*.**

Pour juger de l'impact réel d'un composant atmosphérique sur la température à la surface de la terre on fait appel à la notion de **forçage radiatif** ou pouvoir de réchauffement (en Watts.m<sup>-2</sup>) qui peut être défini comme l'apport d'énergie supplémentaire à la surface de la terre dû à la présence de ce composant dans l'atmosphère. Cette notion prend en compte la concentration atmosphérique et les caractéristiques d'absorption - émission thermique de chaque composant (Fig. 4). Elle est aussi applicable et quantifiable pour d'autres facteurs du climat comme les changements d'albédo, ce qui permet de comparer leurs impacts respectifs sur le climat.

Les temps de résidence dans l'atmosphère de ces composants sont très variables. Pour estimer l'impact climatique de l'émission dans l'atmosphère d'un composant donné, la prise en compte de ce temps de résidence est donc nécessaire. Cette nécessité a conduit à définir un deuxième paramètre, le **Potentiel de Réchauffement** qui est le potentiel de réchauffement d'un kg d'un composant donné relativement à celui d'un kg de CO<sub>2</sub>. Sur une durée de 100 ans, les Potentiels de Réchauffement des principaux *ges* impliqués dans l'effet de serre anthropique (Global Warming Potential, GWP en anglais) sont de 23 pour le CH<sub>4</sub> et de 296 pour N<sub>2</sub>O. Autrement dit, l'émission de 1 kg de N<sub>2</sub>O a le même impact climatique sur 100 ans que celle de 296 kg de CO<sub>2</sub> et 1 kg de CH<sub>4</sub> correspond à 23 kg de CO<sub>2</sub>.

## **2. LES FORETS**

Sans les forêts, la vitesse d'augmentation de l'effet de serre et le changement climatique associé seraient 1.5 fois plus rapide mais cette estimation demeure incertaine. L'impact majeur des forêts sur l'effet de serre est lié à leur rôle dans le cycle du carbone global. Deux tiers de la photosynthèse globale (flux descendant vers la biosphère, Fig. 1) proviennent d'écosystèmes forestiers. La photosynthèse des forêts recycle annuellement 5% du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les forêts mondiales jouent donc un rôle majeur dans la régulation du cycle

du carbone et de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Elles renferment 53% du carbone accumulé dans les écosystèmes continentaux, dont 26, 20 et 7% respectivement en forêts boréales, tropicales et tempérées (Fig. 2). 65% du stock de C forestier est contenu dans le sol et 35% dans la biomasse. Le flux de fixation de carbone par une forêt suit son cycle de vie. 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<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, une forêt en pleine croissance peut emmagasiner de 3 à 10 tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (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).

Les sols forestiers naturellement drainés, comme la plupart des sols naturellement aérés, se comportent comme des puits de méthane ; une vaste synthèse sur différents sols d'Europe du Nord (Smith et al, 2000) montre que la valeur moyenne de ce puits est remarquablement constante et de l'ordre de 2,4 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (contre 0.65 en sol cultivé). La mise en culture des sols ou des pratiques culturales comme la fertilisation azotée altèrent significativement cette fonction puits et la réduisent de l'ordre de 70%, ordre de grandeur observé dans différents travaux. Les éléments en cours de discussion au GIEC visent à comptabiliser cette réduction de la fonction puits comme une source de méthane (à raison de 1,7 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) dans les sols forestiers soumis à une fertilisation.

N<sub>2</sub>O est produit naturellement par les processus de dénitrification et nitrification dans les sols. Comme pour les sols agricoles, les émissions de N<sub>2</sub>O des sols forestiers sont accrues en réponse à tout apport d'azote (fertilisation, engrais organique, épandage,..). On considère que 1,25% ± 1 de l'azote apporté est volatilisé comme N<sub>2</sub>O (Bouwman et al. 1996), mais voir aussi Flessa et al. (2002) qui trouvent ~deux fois plus et Freibauer (2003). Le drainage des sols forestiers tourbeux ou humides provoque également une émission nette de N<sub>2</sub>O estimée à 2.5, 8 et 16 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> en forêt boréale ou tempérée de conifères, feuillus et tropicale respectivement. Des valeurs d'émission de 0.15 à 3.3 kg N-N<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ont été mesurées sous divers couverts forestiers européens (Persson, 2000).

L'impact des activités humaines liées aux forêts (boisement, déboisement, exploitation, brûlage sur place) sur le cycle du carbone et des *ges* est donc considérable. Deux points doivent être rappelés ici :

1. Le potentiel global de stockage de carbone par les forêts n'est pas à même d'annuler à lui seul l'effet de serre anthropique : il pourrait en atténuer tout au plus une fraction de l'ordre de 20 à 30% .

2. Ce potentiel de stockage est transitoire et, dans les zones exposées à des changements climatiques négatifs, réversible (voir communication de A Bosc et al.).

Un impact climatique de deuxième ordre des forêts est lié à leur albedo, faible par rapport aux autres types d'utilisation des terres. Une surface enneigée, une culture, une lande où une prairie reflètent globalement une proportion plus forte du rayonnement solaire que les forêts. L'impact du déboisement à l'échelle globale se traduit par un forçage radiatif négatif de l'ordre de -0,2 W.m<sup>-2</sup> ( à comparer à +1,48 W.m<sup>-2</sup> de pouvoir de réchauffement pour le CO<sub>2</sub> anthropique seul, Fig 4).

L'impact des écosystèmes forestiers sur le climat régional et local est important. Une forêt joue un rôle modérateur du cycle de l'eau pour plusieurs raisons. Elles constituent un réservoir tampon important par la profondeur et la réserve utile de leur sol et limitent le ruissellement superficiel. Elles retiennent et ré-évalorent une fraction importante (10 à 40%) des précipitations, dont elles atténuent ainsi les excès. L'évapotranspiration est généralement plus élevée et leur émission de chaleur plus faible qu'un couvert végétal comme une culture basse ou qu'un sol nu.

### **3. COMMENT ET OU SE STOCKE LE CARBONE FORESTIER ?**

La fixation de carbone par les forêts traduit un gain de production et l'accroissement d'un réservoir forestier de carbone. 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. Cet accroissement de la production primaire nette des forêts 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 (hors tropiques) ou le vieillissement des peuplements et des causes indirectes comme les dépôts azotés, l'allongement de la saison de végétation dû au réchauffement, le rôle fertilisant du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Une incertitude persiste sur :

- l'évolution à long terme de ce stockage forestier de carbone. Que se passera-t-il si l'exploitation des forêts boréales reprend avec une forte intensité ? On estime par ailleurs que l'effet fertilisant de l'élévation en CO<sub>2</sub> atmosphérique, de la température ou des dépôts azotés n'est que transitoire.
- la part respective des effets anthropiques directs (changement d'utilisation des terres, gestion sylvicole) et indirects (changement climatique, élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique, pollution azotée).

### **4. LA FORET FRANÇAISE**

Le stock de C contenu dans la forêt métropolitaine française est de  $2,00 \pm 0,26$  Gt dont 57% dans le sol (litière incluse) et 43% dans la biomasse (Fig. 3 chiffrage effectué par les laboratoires INRA FMN Nancy et Sols Orléans à partir des données de l'Inventaire Forestier National). Cette estimation vient d'être revue de + 10% pour la biomasse (Pignard et al. dans Loustau et al. 2004). Il représente un millième du stock biosphérique terrestre. Le stock dans la seule biomasse s'accroît de 0,9% par an (hors tempête 1999) ce qui équivaut à environ 10 % des émissions de carbone fossile nationales (Figure 3). Les causes invoquées sont assez variables d'une région à l'autre. Elles comprennent un déficit certain d'exploitation en regard de l'accroissement des forêts, une augmentation de productivité liée aux dépôts azotés, au réchauffement climatique, à l'élévation du CO<sub>2</sub>, au changement de sylviculture et à un accroissement de la surface forestière.

Outre l'accroissement de la biomasse sur pied, l'utilisation des produits forestiers joue un rôle potentiellement important pour réduire les émissions de *g.e.s.* par substitution à d'autres matériaux coûteux en *g.e.s.* (béton, acier, aluminium, PVC, emballages plastiques) ou à l'utilisation de combustibles fossiles (bois de chauffe, biocarburants, etc..). Le chiffrage national exact supposant un bilan complet du cycle de vie des produits concernés est difficile à réaliser (cf autres articles de ce compte rendu).

### **5. IMPACT CLIMATIQUE D'UNE FORET : LA CAS DU PIN MARITIME.**

Un écosystème forestier géré comme le forêt de Pin maritime des Landes de Gascogne agit sur les climats global et local par ses échanges d'énergie avec l'atmosphère et le sol et en participant au cycle biogéochimique des principaux éléments et molécules intervenant dans la composition des gaz à effet de serre. Dans ce qui suit, nous avons proposé d'établir une comparaison de l'impact sur le climat global de différentes options de sylviculture du pin

maritime en tenant compte de l'ensemble de ses effets de façon simplifiée. Nous avons posé ici les hypothèses et simplifications suivantes.

- l'impact est considéré sur des durées de 20 ou 50 ans.

- seul le carbone en tant que principal constituant des *ges* est considéré, et le seul *ges* considéré est le CO<sub>2</sub>. Cette simplification se justifie par le fait que la fertilisation azotée n'est pas pratiquée pour le Pin maritime dans le Sud Ouest de la France et que les taux d'émissions connus en N<sub>2</sub>O de la forêt des landes sont négligeables (Jambert, 1995). Des travaux plus récents sur forêts de conifères suggèrent toute fois que ces émissions devraient faire l'objet de mesures plus systématiques au moins en Lande humide (Arnold et al. 2005).

- l'indice utilisé pour comparer les scénarios est un impact sur la température terrestre calculé en prenant comme facteur d'échelle la surface totale des forêts tempérées de la terre (10,4 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>).

- le taux de remplacement de carbone fossile par les produits forestiers récoltés (bois fort uniquement) est fixé à 1,0.

- les scénarios de sylviculture sont considérés en état stationnaire et en équilibre de classes d'âge. Aucune perturbation de type tempête ou incendie n'est prise en compte.

Les deux scénarios de sylviculture « intensif » et « référence » comparés sont tirés de l'étude IFN, INRA, AFOCEL, ONF, CPFA, IRGAE, du projet « Suivi de la ressource pin maritime en Aquitaine » (2001). Nous y avons ajouté un scénario « extensif » de vieillissement avec une coupe finale à 75 ans. Le chiffrage des stocks de C moyens immobilisés dans la biomasse et le sol pour chaque scénario (tableau 1) a été effectué par Chantal (2001). Les valeurs du sous-étage sont une estimation d'expert (voir aussi la communication de Porté et al.).

Tableau 1. Stocks de carbone (C) , production en bois fort et carbone fossile remplacé pour trois scénarios de sylviculture du Pin maritime.

	Stock de C in situ (tC.ha <sup>-1</sup> )			Production moyenne annuelle (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	C fossile remplacé (tC.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )
	Biomasse		Sol		
	arbres	sous-étage			
Référence	27,7	5	80	12	2,6
Intensif	14,2	0	40	18	3,9
Extensif	57,5	7,5	100	6	1,3

Tableau 2. Impacts climatiques globaux (Δ, en °C) des scénarios intensif et extensif par rapport au scénario de référence calculés pour une durée de 20 et 50 ans.

	Δ stocks <i>in situ</i> biomasse et sol	Δ C remplacé	Δ albedo	Δ Total
<b>20 ans</b>				
Intensif	0,24	-0,11	-0,01	0,12
Extensif	-0,22	0,11	0,01	-0,10
<b>50 ans</b>				
Intensif	0,24	-0,27	-0,01	-0,04
Extensif	-0,22	0,27	0,01	0,06

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette comparaison en dépit de la simplicité de cette approche (tableau 2).

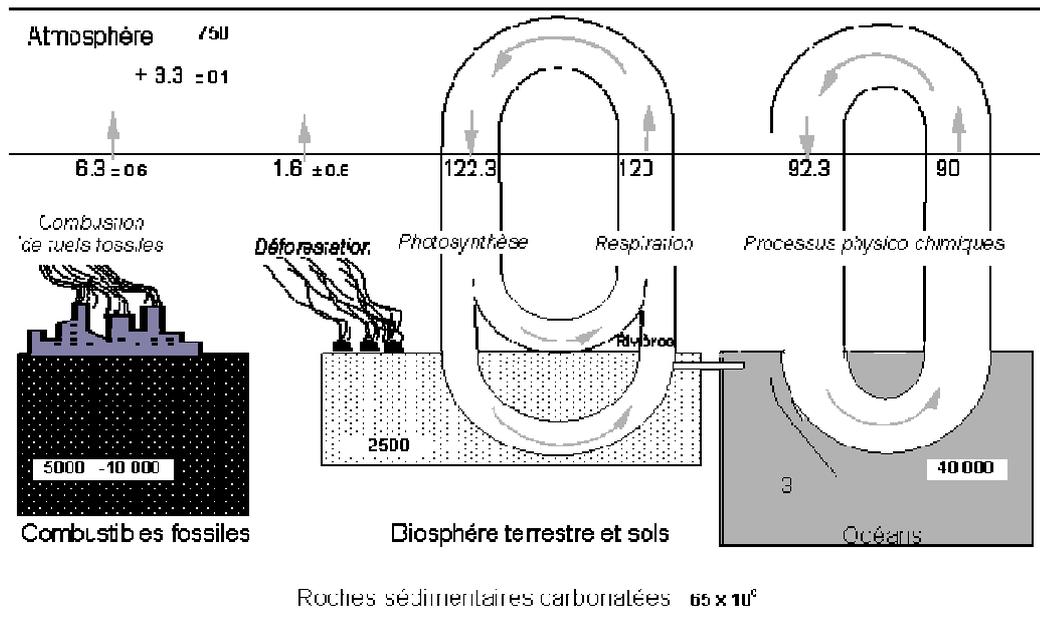
- La durée considérée conditionne l'importance relative des effets du stockage *in situ* d'une part et de la production et remplacement du C fossile d'autre part. A court terme, l'effet des changements de stocks dominant mais à plus long terme ce sont les effets de substitution de C fossile par l'utilisation des produits forestiers qui l'emportent.
- Le scénario « intensif », qui a la production moyenne la plus forte, a un impact de réchauffement à court terme car il affaiblit fortement les stocks de C de la biomasse et du sol relativement au scénario de référence. Cet effet s'atténue et même s'inverse à long terme par rapport au scénario de référence.
- Le scénario « extensif » de vieillissement en place a un effet climatique inverse, refroidissant à court terme et réchauffant à long terme par rapport à la référence.
- L'effet du changement d'albedo est d'un ordre de grandeur plus faible que l'impact induit via le cycle du carbone. Cet effet est lié à l'importance relative des classes d'âge dans la révolution, les classes d'âge jeunes, dominantes, dans le scénario intensif ayant un albedo plus élevé que les classes âgées.

Ces résultats sont très dépendants des valeurs données pour les écarts de stocks *in situ*, de production moyenne entre les scénarios et du taux de substitution choisi pour le remplacement du C fossile. Bien que demandant à être précisés, ils suggèrent que l'impact climatique des forêts pourrait être optimisé en jouant par exemple sur la distribution géographique des fonctionnalités forestières (production, protection, conservation,...) en fonction de la fertilité des sites : il est avantageux de développer les forêts de production à sylviculture intensive sur des sites fertiles où l'effet sur la substitution de C fossile compensera rapidement le déficit de stock de C *in situ* et réserver une sylviculture extensive aux sites moins fertiles.

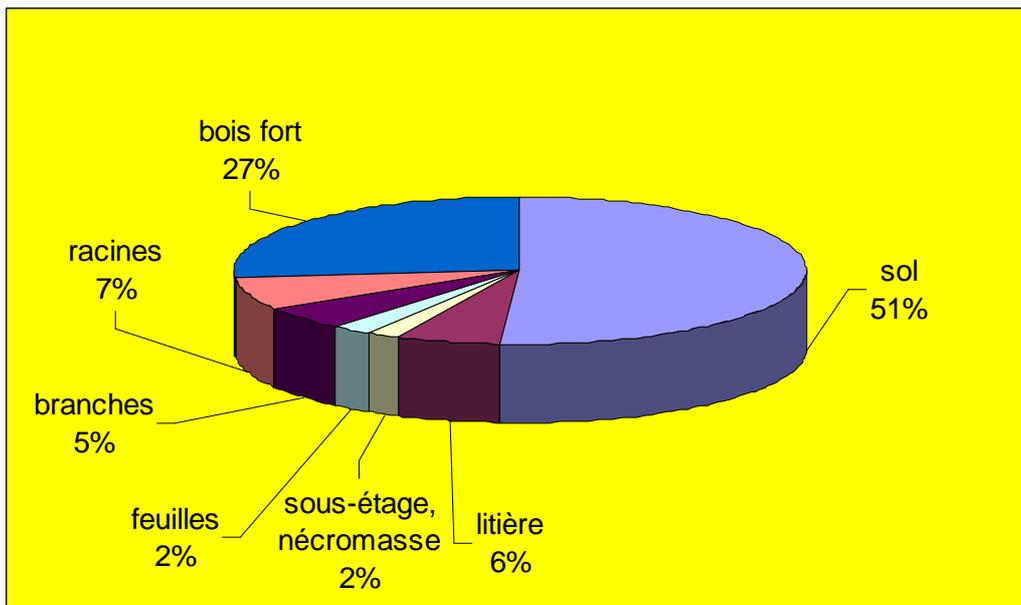
Nous n'avons pas considéré ici les effets des forêts sur le climat local et régional. Cet impact local, important, est très contingent des conditions locales et régionales mais a peu été étudié dans le cas de l'Aquitaine et on ne dispose pas encore des éléments quantitatifs suffisamment précis pour opérer une approche comparative similaire. On peut raisonnablement espérer que le développement des recherches sur l'intégration du fonctionnement d'ensemble d'écosystèmes à cette échelle, comme avec le projet CARBOEUROPE en Aquitaine, permettra dans un proche futur de développer des méthodes quantitatives pour estimer ce type d'effet à l'échelle locale.

## Références

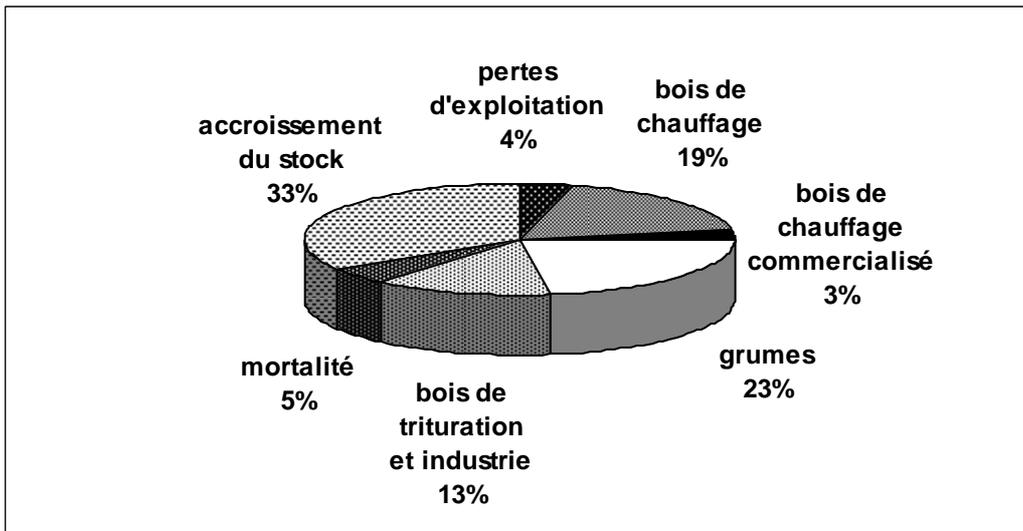
- Arnold, K.v., P. Weslien, M. Nilsson, B.H. Svensson and L. Klemetsson (2005). Fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from drained coniferous forests on organic soils. *For. Ecol. Manag.* 210 (1/3), 239-254.
- Bouwman AF, Taylor JA (1996) Testing high-resolution nitrous oxide emission estimates against observations using an atmospheric transport model. *Global Biogeochemical Cycles* (2): 307-318
- Chantal, M. (2001). Estimation du stock de carbone dans la biomasse de Pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.) du massif landais. Bordeaux, Mémoire de stage de DESS, Bordeaux 4: 31 pp + annexes.
- Dupouey, J.-L., G. Pignard, et al. (1999). Stocks et Flux de Carbone dans les forêts françaises. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* **85**: 293-310.
- Flessa H, Ruser R, Dorsch P, et al. (2002) Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 91 (1-3): 175-189
- Freibauer A., Kaltschmitt M. (2003) Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe. *Biogeochemistry* 63 (1): 93-115 2003
- Grace J., Malhi Y., Higuchi N., Meir P. (2001) Productivity of tropical rain forests. Dans "Terrestrial Global Productivity" Roy J., Saugier B. et Mooney H.A. Eds. Academic press, p400-422.
- 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.
- Jambert, C. (1995). Emissions de composés azotés dans l'atmosphère par les agrosystèmes fertilisés: maïsiculture dans les Landes de Gascogne. Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 112 pages + annexes.
- Loustau, D., A. Bosc, et al. (2005). Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology* **25**(7): 813-823.
- Watson R.T., Noble, I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J., (2000) *Land Use, Land Use Change and Forestry.* Rapport spécial du GIEC. IPCC Publisher, Cambridge University Press, ISBN 0 521 80083 8, 377 pages.
- Kowalski, S., M. Sartore, et al. (2003) The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Global Change Biology* 9(7): 1051-1065.
- Kowalski, A. S., D. Loustau, et al. (2004). Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10(10): 1707-1723.
- Persson T. et al. (2000) Carbon and nitrogen cycling in European forest ecosystems. Schulze E.D. Ed, Berlin (DEU), Springer-Verlag, p 297-331.
- Smith P., Powlson D. S., Smith J. U. (2000) et al. (2000) Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology* 6 (5): 525-539.



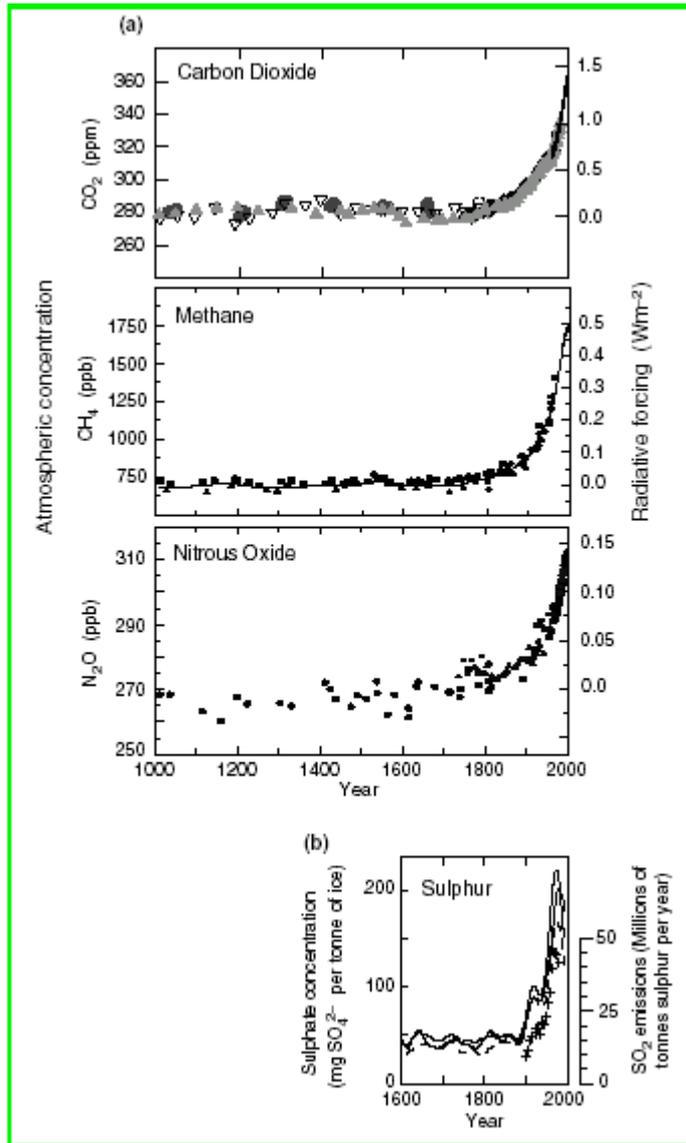
**Fig 1.** Flux annuels et stocks de carbone dans la biosphère, l'océan et l'atmosphère. Les unités de stock (en gras) sont des milliards de tonnes de carbone (ou gigatonnes C), les flux sont exprimés en  $\text{GtC}\cdot\text{an}^{-1}$ . (données 1990-1998, source GIEC 2001).



**Fig 2.** Répartition du stock de carbone de la Forêt française métropolitaine entre différents compartiments (d'après Dupouey et al. 1999).



**Fig. 3.** Allocation de la production forestière annuelle métropolitaine (d'après Dupouey et al. 1999).



**Fig 4.** (extrait du rapport 2001 du Groupe de travail 1 du GIEC). Concentration des *ges* reconstituée ou mesurée au cours du 2ème millénaire. L'axe de droite de chaque diagramme donne l'équivalent du changement par rapport à 1750 en forçage radiatif. NB : 1 ppm = 1000 ppb (Les unités de concentration changent entre chaque diagramme). disponible sur <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>