



**HAL**  
open science

## Le cycle du carbone en forêt, questions et inconnues, travaux en cours, réponses

Denis Loustau

► **To cite this version:**

Denis Loustau. Le cycle du carbone en forêt, questions et inconnues, travaux en cours, réponses. Colloque annuel de la MICCES, Mission Changement Climatique et effet de serre, Jan 2004, Isle-sur-Sorgue, France. 7 p. hal-02825204

**HAL Id: hal-02825204**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02825204v1>**

Submitted on 6 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.

# Rapport d'Activité 2003 du projet MICCES

## Changement climatique et Forêts

D Loustau

Unité Ephyse, INRA Bordeaux, 69 Route d'Arcachon, F-33612 GAZINET Cedex Tel 05 57 12 28 51 Fax 05 56 68 05 46 email: loustau@pierroton.inra.fr

---

### participants

Unité Ephyse: D Loustau, A Colin, M Bakker, J Ogée, P Berbigier, A Bosc  
L.E.V.E., Université de paris XI: H Davi, C François, E Dufrêne,  
Unité Ecophysiologie Nancy INRA Nancy A Granier, N Bréda,  
CNRM Toulouse. M Déqué, E Cloppet

---

Les recherches en rapport avec l'impact du changement climatique et le cycle du carbone mobilisent fortement les équipes INRA Bordeaux en bioclimatologie et écophysiologie forestières et leurs collaborations avec d'autres laboratoires nationaux et européens (projet CARBOFOR, Bilan de Carbone de la forêt Landaise (Région Aquitaine), CAROEUROFLUX, CARBO AGE, et CARBOEUROPE 5 et 6èmes PCRD communautaires). Ce rapport résume les résultats les plus récents obtenus en 2003 et en cours. La contribution de la MICCES à ces activités a permis de financer entièrement le travail d'expertise de D Loustau auprès du GIEC et la présentation de ces résultats à la réunion MICCES 2004 et à une réunion IUFRO "Modeling Forest Production" tenue à Vienne en Avril 2004 (<http://iufro.boku.ac.at/>).

### Introduction

Le rôle supposé des forêts comme puits de carbone soulève deux questions majeures concernant (1) la quantification de cette activité puits et (2) son futur. La quantification des composantes du cycle biosphérique continental du carbone ainsi que des stocks accumulés et finalement du bilan net des grands écosystèmes concernés présentent une incertitude toujours importante, en dépit du développement des réseaux de mesure terrestre et atmosphérique (travaux de Kauppi, Goodale, Pacala, Fang, Martin, Bousquet, Myneni). Cette incertitude affecte les estimations à toutes les échelles spatiales considérées: parcelle, région, continent ou globale. Pour réduire cette incertitude, la combinaison des approches d'intégration basée sur des données d'inventaire (inventaire forestier, observatoire des sols, statistiques agricoles et forestières) et de mesures directes ou indirectes des flux échangés apparaît prometteuse. Sa mise en œuvre requiert que certaines hypothèses soient vérifiées :

- superposition des domaines géographiques échantillonnés pas les deux approches ;
- exhaustivité des flux et stocks mesurés ;
- coïncidence des périodes échantillonnées pour les deux approches.

Cette vérification peut s'avérer difficile dans la pratique. Cette approche d'ensemble a cependant permis de mieux comprendre voire d'interpréter les écarts existants entre différentes estimations du flux continental de CO<sub>2</sub> à l'échelle régionale (Janssens et al. 2003). Au sein du réseau européen de sites – flux, peu satisfont de telles conditions, moins encore ont pu mettre en œuvre cette double appréhension de flux et stocks. Nous en présentons ici une application pour la Hêtraie de Hesse et la Pinède du Bray .

Le devenir du puits de carbone terrestre attribué aux forêts dépend de leur gestion passée et future et de son interaction avec les changements qui affecteront le milieu physique en terme de climat, hydrologie, pollution. Ces interactions mettent en œuvre des processus de réponse variables d'une espèce à l'autre et en fonction des facteurs locaux du biotope : hydrologie de surface, sols, topographie. Elle nécessite de disposer de scénario climatique cohérent à haute résolution spatiale qui peuvent se conjuguer avec les données cartographiques des sols et des peuplements forestiers disponibles. Dans la deuxième partie, nous avons présenté l'approche développée dans le cadre du projet GICC– GIP *Ecofor* Carbofor (<http://www.carbofor.fr.st>) pour analyser l'impact d'un scénario climatique régionalisé sur le fonctionnement du cycle du carbone dans les forêts françaises. Elle s'appuie sur des bases de données combinant scénario de climat 1960-2100, sol et forêt avec une résolution de 50 x 60 km sur lesquelles sont « projetés » des modèles de fonctionnement des forêts décrivant les cycles eau énergie carbone. Seuls quelques résultats préliminaires et donc provisoires sont présentés ici, à titre d'illustration, l'intégralité des simulations opérées étant en cours de réalisation.

## Matériel et Méthodes

### PARTIE 1. DÉTERMINATION DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE

#### Sites retenus

L'approche flux- stocks a été conduite pour deux sites forestiers de plaine, une pinède atlantique de 27 ans au sud de Bordeaux et une hêtraie de 30 ans proche de Sarrebourg. Les caractéristiques de ces deux sites sont disponibles sur le site CARBOFOR.

#### Principe

La formulation opérationnelle de l'équation du bilan de carbone de l'écosystème appliquée ici est :

$$NEE = \Delta W + D + H_r + R_h + F_{C \neq CO_2} + F_{Cs} \quad (1)$$

où les différents termes, tous exprimés en gC.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, sont :

- NEE*, flux net de C-CO<sub>2</sub> au dessus du couvert
- $\Delta W$ , variation de stock de C dans la biomasse
- D*, flux de matière organique morte (litière, rhizodéposition, mortalité racinaire) au sol
- H<sub>r</sub>*, flux de C accumulé par le compartiment des producteurs d'ordre II et III
- R<sub>h</sub>* flux de C-CO<sub>2</sub> du sol du à la respiration hétérotrophe
- F<sub>C≠CO2</sub>* flux de C gazeux autre que CO<sub>2</sub>
- F<sub>Cs</sub>* drainage de C particulaire ou dissous

#### Méthodes

*Flux, NEE, GPP, RE*

Le flux de CO<sub>2</sub> a été mesuré par la méthode des covariances turbulentes comprenant un anémomètre sonique 3D (R3 Gill instruments) et un analyseur infra rouge à cellule fermée (LiCor 6262) ((Berbigier et al. 2001; Kowalski et al. 2003). Les données ont été .....

#### *Biomasse, arbres, sous bois, Litière.*

La biomasse aérienne des arbres a été calculée annuellement par application de l'équation allométrique de (Porté et al. 2002) à partir des valeurs mesurées de diamètre individuel du tronc à 1.3m de haut de la totalité des arbres d'une zone de 4 ha centrée autour de la tour de mesures (n~3000). Cependant, partir de 2002 seul un échantillon de 650 arbres a été mesuré.. La variation de biomasse aérienne du sous-bois, constitué d'une graminée à rhizome, la Molinie, a été négligée. La chute de litière aérienne annuelle des arbres a été estimée par échantillonnage de 24 collecteurs de 1 m<sup>2</sup> mesurés tous les 15 jours au moment de la chute des aiguilles de pin, mensuellement sinon. Le dépôt de litière aérienne du sous-bois a été estimé par échantillonnage destructif de 24 placeaux de 1 m<sup>2</sup> fauchés en fin de période croissance, en juillet.

#### *Respiration hétérotrophe aérienne*

Le flux total annuel de CO<sub>2</sub> dégagé du sol,  $F_c$ , a été estimé par application d'une loi en Q10 sur les données mesurées de température du sol à -10 cm,  $T_s$ .

$$F_c = F_{c_{tsref}} Q_{10}^{(T_s - T_{sref})/10}$$

$F_{c_{tsref}}$  a été estimé tous les 15 jours de 1999 à 2002 par la moyenne arithmétique d'un échantillon de 30 mesures de flux faites dans la parcelle avec le système fermé portable SRC-1 de PP System modifié (Le Dantec et al. 1999), après correction de l'effet de la température.  $Q_{10}$  a été estimé par décade à partir des mesures de flux opérées par un système automatisé de 5 chambres ouvertes multiplexées à ouverture automatique, mis au point à l'INRA Bordeaux d'après (Rayment and Jarvis 1997; Roy et al. 2002). Les deux systèmes ont été comparés et calibrés au laboratoire un banc d'essai. Cette approche permettait de combiner un échantillonnage de mesures suffisant pour atteindre une précision de 10% sur la valeur moyenne de  $F_{c_{tsref}}$  et un suivi temporel continu permettant de détecter les variations temporelles de  $Q_{10}$ .

Le flux de CO<sub>2</sub> du sol a été réparti entre une composante autotrophe ( $R_a$ ) et une composante hétérotrophe ( $R_h$ ) à partir de mesures opérées sur un dispositif comparatif de 10 « trench plots », zone de sol d'exclusion racinaire de forme circulaire (d=1m).

La consommation des producteurs I et II,  $H_r$ , ainsi que les flux de C gazeux autres que CO<sub>2</sub> ( $F_{C \neq CO_2}$ ) et le drainage de C particulaire ou dissous ( $F_{C_s}$ ) n'ont pas été mesurés et ont été négligés ici.

## PARTIE 2. MODÉLISATION DE L'ÉVOLUTION DU CYCLE BIOSPHÉRIQUE DU C EN FORÊT.

### **Données de forçage.**

Le scénario climatique est une série de 140 années de données 6-horaires à journalières simulée par le modèle ARPEGE-Climat sur une grille de ~60 x 60 km (360 points

de grille en France métropolitaine) d'après le scénario d'accumulation de CO<sub>2</sub> atmosphérique B2 de l'IPCC (IS92a) .

#### Données sol et peuplement

Les données sol et peuplement utilisées pour initialiser les modèles de fonctionnement sont un assemblage des données de l'Inventaire Forestier National et de la base de données INFOSOL agrégées au niveau de la petite région forestière (560 points).

#### Modèles

Les modèles utilisés sont décrits sur le site du projet. Il s'agit de modèles spécifiques construits pour représenter de façon détaillée le cycle du carbone, le bilan d'énergie, l'hydrologie et la croissance des écosystèmes concernés, la hêtraie de plaine, la chênaie atlantique et la chênaie méditerranéenne (modèle CASTANEA, LEV Université de Paris XI-Orsay) et la Pinède atlantique (modèle GRAECO, INRA Bordeaux). De plus, le modèle générique du LSCE (ORCHIDEE) est utilisé sur la France entière.

#### Base de données observées de flux .

Les modèles utilisés ont été évalués sur une base de données constituées de données de flux semi-horaires et de croissance annuelle mesurées sur les écosystèmes ateliers de l'ORE Forêt.

#### Expériences de simulation

Deux expériences sont réalisées afin d'analyser les effets respectifs du climat et de ses variations géographiques et ses interactions avec la fertilité stationnelle, l'espèce dominante et la gestion sylvicole.

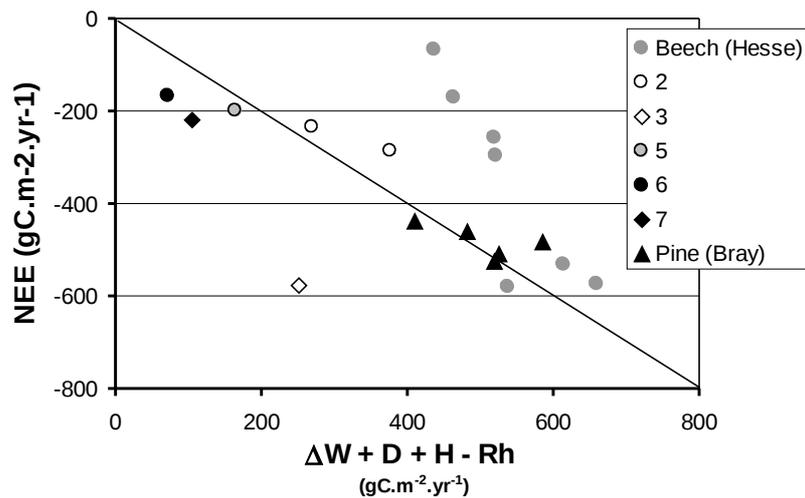
- a. Expérience 1. Le fonctionnement annuel d'un peuplement standard fixé est simulé pour chacune des 140 années du scénario pour un point de grille central de l'aire métropolitaine de l'écosystème considéré. Cette expérience est effectuée pour quatre essences modèles pour le Hêtre, Chêne sessile, Chêne vert, et Pin maritime et dans chaque cas, avec et sans stress hydrique.
- b. Expérience 2. Le fonctionnement de l'écosystème est simulé pour l'ensemble de la révolution (durée totale variant de 30 à 150 ans suivant les espèces et les scénarios de gestion envisagés) et sous quatre périodes climatiques reconstituées à partir des données ARPEGE. Les données ARPEGE ont été regroupées en 4 séries centrées en 1980, 2015, 2045 et 2080. Cette expérience est appliquée à dix points de grille ARPEGE représentatifs suivant une matrice à quatre dimensions:
  - i. espèce
  - ii. scénario de gestion
  - iii. réserve utile
  - iv. richesse en azote disponible

construite d'après les bases de données sols et forêts disponibles. Les scénarios de sylviculture ont été établis par le LERFOB - Nancy pour les feuillus sociaux et l'INRA Bordeaux pour la Pinède atlantique.

#### Résultats et discussion

1. **Détermination des stocks et flux de carbone.** La figure et le tableau 1 résument les résultats obtenus en les comparant avec les données publiées pour des écosystèmes forestiers tempérés en Amérique du nord. L'erreur commise sur les données n'est pas représentée, elle est évaluée à  $\pm 15\%$  sur le flux net de C-CO<sub>2</sub> annuel et autant sur les

variations de stock de carbone. Elle est inférieure à  $\pm 10\%$  pour les apports de litière mais atteint  $\pm 25\%$  sur le terme de respiration hétérotrophe en raison de sa variabilité spatiale et de l'incertitude sur la proportion des termes de respiration autotrophe et hétérotrophe. Les deux écosystèmes considérés la hêtraie et la pinède se comportent comme des puits de C-CO<sub>2</sub> avec de fortes variations interannuelles expliquées par les sécheresses, les variations de température, les éclaircies et les tempêtes de décembre 1999. La fermeture du bilan est relativement bonne au site du Bray en année humide mais montre de fortes variations annuelles à Hesse avec un bon accord flux vs stock en année humide mais pas en année sèche ou durant les années suivant des éclaircies. Ce décalage se retrouve dans le calcul de ces termes pour une période quinquennale (tableau 1). Compte tenu du mode de calcul retenu, plusieurs causes expliquent le décalage observé entre la somme annuelle du flux net et les variations de stock: variations annuelles de l'allocation du C fixé, de densité du bois, variations annuelles de sources de C comme les résidus de coupe laissés après éclaircie. Nous n'avons pas encore quantifié leur impact sur le calcul du bilan de C. Dans tous les écosystèmes considérés, la croissance des arbres est le premier déterminant du bilan de C de l'écosystème. Nous ne mettons pas en évidence de variation significative du flux net de C provenant d'autres compartiments comme l'humus ou le sol.



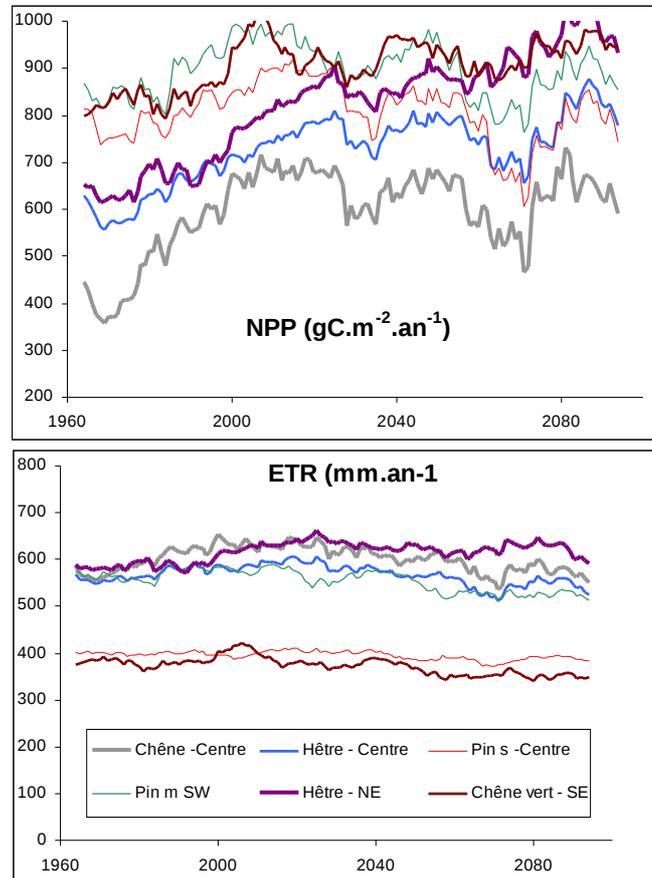
**Figure 1.** Comparaison des flux annuels de C-CO<sub>2</sub> de l'équation opérationnelle du bilan de carbone (eq. 1). Les deux sites étudiés sont comparés à un échantillon de sites forestiers tempérés d'Amérique du Nord (2 à 7) tirés de (Curtis et al. 2002; Ehman 2002)

**Tableau 1.** Bilan quinquennal des flux et variations de stocks de carbone dans trois écosystèmes forestiers tempérés.

site	espèce	NEE	$\Delta W+D+Rh$ (gC.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	$\Delta W$
Hesse	Hêtre	-2482	3756	3407
Walker Branch	Feuillus mélangés	-2885	1260	1320
Bray	Pin maritime	-2417	2525	2227

## 2. Changement climatique

**Expérience 1.** La simulation montre que le scénario climatique prédit une évolution non monotone des variables climatiques au cours de la période 1960-2100 et que cette évolution se retrouve assez bien sur l'évolution des flux simulés en terme de production primaire brute, flux de respiration autotrophes et hétérotrophes et évapotranspiration mais avec d'importantes variations par espèce, du Nord au Sud et en fonction de la distance à la bordure atlantique. (Figure 2).



**Figure 2.** Moyennes glissantes (n=10) de la production primaire nette annuelle (NPP) et de l'évapotranspiration annuelle (ETR) simulées pour un peuplement forestier adulte en cinq points de grille en territoire métropolitain (modèles GRAECO-CASTANEA).

**Expérience 2.** Les résultats de cette expérience sont actuellement en cours d'analyse. Une première synthèse montre que les effets de changement climatique simulé par ARPEGE présente une interaction plus ou moins importante avec les facteurs locaux comme la richesse en azote disponible, la réserve utile et l'essence dominante et avec les scénarios de gestion.

- La production en bois est généralement améliorée par le CC dans les forêts de feuillus de plaine dans le Nord et le centre de la France, inchangé dans l'Ouest. Elle est plutôt diminuée dans le Sud, sur Pin maritime, sauf pour les stations recevant les plus fortes précipitations annuelles (littoral et Sud du massif landais);

- ces tendances s'expliquent assez bien par les effets relatifs de l'augmentation de la teneur en  $CO_2$  d'une part et l'accroissement de la fréquence et de la durée des sécheresses estivales d'autre part, ces dernières étant accélérées en fin de scénario (période 2080);

- les changements sont plus importants pour les sites les plus fertiles et à plus forte réserve utile qui présentent la production actuelle (1980) la plus élevée;

- les scénarios de gestion forestière intensive, à courte rotation, sont plus sensibles que les scénarios extensifs en raison d'une sensibilité différente avec l'âge des peuplements.

L'ensemble de ces résultats sera développé de façon exhaustive dans le rapport final du projet CARBOFOR remis début Juin au comité scientifique du GICC. La publication de ce rapport final sous forme d'un ouvrage collectif est en cours de discussion.. Ils sont en cours de publication en particulier dans les proceedings de la réunion IUFRO "Modelling Forest production" Vienne Avril 2004 (Loustau et al. 2004) dans le journal Tree Physiology.

---

### **Expertise de D Loustau au GIEC.**

Le rapport GIEC sur les bonnes pratiques pour l'estimation des flux de gaz à effet de serre dûs aux changements d'utilisation des terres et à la sylviculture a été soumis révisé et finalement accepté par la COP 9 en décembre 2003. Il est sous presse (Good Practice Guidance for LULUCF, J Penman et al., IPCC). Le récapitulatif des missions et activités fournies est joint sous forme d'un fichier excel.

---

### **Références.**