

**Programme**  
**Gestion et Impacts du Changement Climatique**

**Appel d'offre restreint sur l'établissement d'inventaires fiables des émissions de gaz à effet de serre et des puits de dioxyde de carbone.**

***CARBO-CONTROLE***

***Quantification des flux et stocks de carbone  
au niveau Européen et national***

**Rapport final**

**Coordinateur : P. Ciais (LSCE)**

**Contributeurs : P. Peylin(LSCE), N. Viovy (LSCE), L. Jourd'Heuil (LSCE)  
P. Bousquet (UVSQ), M. Ramonet (LSCE), P. Friedlingstein (LSCE), P. Laj  
(LAMP), L. Pépin (LSCE), M. Schmidt (LSCE), B. Séguin (INRA), B.  
Saugier (LEV).**

## Partenaires du projet

- LSCE**      **Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement**  
UMR CEA/CNRS 1572 - CEA Saclay  
Orme des Merisiers - Bât.709 - 91191 GIF SUR YVETTE Cedex  
e-mail : ciais@lsce.saclay.cea.fr  
Tél : 01 69 08 95 06    Fax : 01 69 08 77 16
- UVSQ**      **Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines**  
23 Rue du refuge - 78035 VERSAILLES cedex  
e-mail : bousquet@lsce.saclay.cea.fr  
Tél : 01 39 25 45 29    Fax :
- LAMP**      **Laboratoire de Météorologie Physique**  
Université de Clermont-Ferrand II  
24 Avenue Landais - 63177 AUBIERE Cedex  
e-mail : chaumerliac@opgc.univ-bpclermont.fr, n.audiffren@opgc.univ-bpclermont.fr  
Tél : 04 73 40 73 72 / 04 73 40 73 50    Fax : 04 73 40 51 36
- LMD**      **Laboratoire de Météorologie Dynamique**  
ENS – 24 Rue Lhomond - 75231 PARIS Cedex 05  
email : frederic.hourdin@lmd.jussieu.fr  
Tél : 01 44 27 84 10    Fax : 01 43 36 83 92
- LEV**      **Laboratoire d'Ecologie Végétale**  
Université Paris Sud – Bât 362 - 91405 ORSAY Cedex  
email : bernard.saugier@eco.u-psud.fr  
Tél : 01 69 15 71 36    Fax : 01 69 15 72 38
- LET**      **Laboratoire d'Ecologie Terrestre**  
13 av Col Roche – BP 4403 - 31405 TOULOUSE Cedex 4  
email : kergoat.let@cesbio.cnes.fr  
Tél : 05 61 55 85 43    Fax : 05 61 55 85 44
- FGEP-INRA**      **Equipe Fonctionnement et Gestion de l'Ecosystème Prairial**  
Unité d'Agronomie INRA - 234 Av. du Brézet, 63039 CLERMONT-FERRAND Cedex 02  
email : soussana@clermont.inra.fr  
Tél. 04 73 62 44 23    Fax 04 73 62 44 57
- INRA**      **Equipe de Bioclimatologie**  
Domaine Saint Paul, Agroparc - 84914 Avignon Cedex 9  
email : olioso@avignon.inra.fr  
Tél : 04 90 31 61 11 Fax : 04 90 31 64 20
- CEFE-CNRS**      **Dream Unit**  
1919 route de Mende - 34293 Montpellier Cedex 5  
email rambal@cefe.cnrs-mop.fr  
Tél : 04 67 61 32 89 Fax : 04 67 41 21 38
- Météo France - CNRM**  
42 Avenue Coriolis - 31057 TOULOUSE Cedex 1  
email : serge.planton@meteo.fr  
Tél : 05 61 07 93 71    Fax : 05 61 07 96 00
- CITEPA**      **Centre Interprofessionnel des Techniques d'Etudes de la Pollution Atmosphérique**  
10 Rue Faubourg Poissonnière - 75010 PARIS  
email : citepa@compuserve.com  
Tél : 01 44 83 68 83    Fax : 01 40 22 04 83

## 1. Introduction

Le projet CARBO-CONTROLE a fédéré un ensemble de laboratoires et instituts autour des études de l'atmosphère et de la biosphère continentale. Ces deux volets doivent permettre une ébauche d'approche intégrée de l'évaluation et de la quantification des flux de carbone pour différentes échelles d'espace : Européenne, Nationale ou régionale (Ile de France) selon le volet d'étude. Les objectifs directs du projet CARBO-CONTROLE sont d'estimer les flux de carbone à l'échelle Européenne et Nationale en utilisant en synergie une désagrégation des flux par des inversions du transport atmosphérique, et une extrapolation des processus d'échanges végétation-atmosphère dans un modèle d'écosystème.

Plus spécifiquement, l'approche atmosphérique comprend :

- une synthèse des connaissances sur les inversions des flux de CO<sub>2</sub> à l'échelle de l'Europe avec un accent tout particulier sur les sources d'incertitudes associées au calcul des flux biosphériques afin notamment d'apporter des explications complémentaires aux décideurs dans le cadre des négociations internationales.
- un diagnostic nouveau des flux de CO<sub>2</sub> pour l'Europe en incluant 1) de nouvelles mesures atmosphériques sur l'Europe (profils verticaux notamment au dessus d'Orléans), 2) différents modèles de transport atmosphériques et 3) différents scénarios de flux a priori servant à initialiser la procédure inverse.
- la détermination à l'échelle nationale des sources régionales de CO<sub>2</sub> par une campagne de mesures en continue sur un an des espèces CO<sub>2</sub>, CO et radon à l'observatoire du puits de Dôme
- la vérification atmosphérique des inventaires des émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et SF<sub>6</sub> pour la région parisienne.

Quand à l'approche biosphérique, il s'agit :

- de modéliser les stocks et les flux de carbone au niveau national grâce au module STOMATE (inclus dans le modèle des échanges biosphère-atmosphère, ORCHIDEE), et ce en relation avec la variabilité du climat.
- d'intégrer un ensemble de connaissances acquises à l'échelle locale sur les processus contrôlant le cycle du carbone, dans le module STOMATE afin d'améliorer notre estimations des bilans biosphériques pour le CO<sub>2</sub>.

L'utilisation de contraintes multiples pour déterminer les bilans de carbone à l'échelle continentale et régionale est l'objet d'un effort de recherche sans précédent au niveau Européen (Programme CARBOEUROPE) et international (Carbon Joint Project IGBP-IHDP-WCRP). Les négociations qui ont fait suite au Protocole de Kyoto débouchent sur des objectifs quantifiés de réduction des rejets de gaz à effet de serre. Toutefois, les méthodologies scientifiques qui permettent de vérifier les engagements de Kyoto en sont seulement au stade de la recherche. Il importe donc de progresser pour améliorer les modèles et les réseaux d'observation destinés à estimer les bilans de carbone continentaux, et leur variabilité dans un premier temps et les bilans plus régionaux (ou par pays) dans un but ultime. Le projet CARBO-CONTROLE de part l'implication des différents acteurs principaux dans le groupe IPCC (P. Ciais et JF. Sousanna) ou dans les projets Européens tels CARBOEUROPE ou A-TEAM, se trouve tout naturellement intimement liée à l'effort de recherche européenne dans ce domaine.

Le projet CARBO-CONTROLE s'est déroulé sur une période de 3 ans avec une extension de 6 mois. Ce rapport présente donc l'ensemble des activités du projet et reprend en partie les 2

rapports de bilan intermédiaire. Outre l'exposé point par point des résultats obtenus conformément aux objectifs du projet (section 4) nous mettons l'accent sur les méthodologies employées (section 3), sur les limitations que nous avons rencontrées, et sur les améliorations qui pourraient y être apportées.

Ce rapport présente pour l'essentiel les résultats obtenus dans le cadre du projet par l'équipe cycle du carbone du LSCE. Le développement du modèle ORCHIDEE et son amélioration pour les cultures nous a conduit à collaborer avec les groupes de l'INRA d'Avignon et de Clermont-Ferrand, ainsi qu'avec le LEV d'Orsay. Cette collaboration initiée sous les auspices du GICC s'est poursuivie ultérieurement avec maintenant deux thèses en co-direction. Le suivi atmosphérique pour une durée de deux ans au puy de Dôme a été réalisé en collaboration avec le LAMP (Clermont- Ferrand), et se poursuit actuellement.

Concernant les modifications méthodologiques par rapport aux engagements initiaux, notons que nous avons prévu d'utiliser un forçage climatique donné par Météo-France pour le modèle ORCHIDEE. A la place, nous avons utilisé les historiques de température et précipitation réalisés au PIK (Postdam) ainsi qu'une nouvelle climatologie à 10' de résolution du PIK. Nous avons aussi prévu d'obtenir du CITEPA un cadastre à haute résolution des émissions en île de France. Le budget total du projet ne l'a pas permis et nous avons utilisé des statistiques moyennes départementales.

## 2. Résumé

Le projet CARBO-CONTROLE a pour **objectif d'évaluer différentes méthodologies complémentaires pour estimer les flux de CO<sub>2</sub> aux échelles Européenne (10000 km), nationale (1000 km) et régionale (100km)**. La stratégie est de combiner une désagrégation, ou "down scaling", des flux à grande échelle en inversant les mesures de CO<sub>2</sub> atmosphérique, avec une agrégation, ou "up scaling", des stocks et des flux nationaux à partir des champs climatiques d'un modèle d'écosystèmes.

Pour répondre à cet objectif, nous proposons d'utiliser des modèles tridimensionnels du transport du CO<sub>2</sub> atmosphérique et un modèle du cycle du carbone dans la végétation et les sols. Ces modèles existaient et ont été améliorés pour répondre aux objectifs et contraintes spécifiques du projet.

En ce qui concerne l'atmosphère, nous avons réalisé **un bilan des estimations de flux européens par approche « inverse »**, c'est à dire contraints directement par les observations, et nous avons dégagé les principaux facteurs d'incertitude liés à ce type d'approche. Nous avons en outre **effectué de nouveaux calculs des flux Européens avec trois modèles de transport** (TM2, TM3, GCTM) en mode "inverse" ainsi que différents scénarios de flux biosphériques a priori. Les objectifs initiaux ont été dépassés puisque, initialement seulement deux modèles (TM2 et TM3) étaient prévus. De plus la participation à un projet international TRANSCOM-3 nous a permis de mieux quantifier l'incertitude liée au transport atmosphérique grâce à l'inter-comparaison des flux estimés par 15 modèles de transport différents. Finalement, nous avons aussi mis au point **une nouvelle approche inverse permettant d'utiliser les mesures continues réalisées en Europe** et toute l'information synoptique sur les flux régionaux qu'elles contiennent. Pour cela nous avons utilisé le modèle de l'IPSL, LMDz, permettant de définir un zoom sur l'Europe de l'Ouest, une caractéristique essentielle pour bien assimiler les mesures continentales proches des sources et puits de CO<sub>2</sub>.

Compte tenu de la faible couverture des mesures de CO<sub>2</sub> dans l'air pour la France, nous avons proposé d'ajouter au réseau de mesure existant une station de suivi en continu à l'observatoire du Puy de Dôme, pour une durée de un an, afin d'analyser la variabilité des concentrations de CO<sub>2</sub> en atmosphère continentale et de décider d'un suivi à plus long terme en fonction des résultats obtenus. **La station du Puy de Dôme a été installée fin 2000, dans les délais prévus et les données ont été analysées.** La mise en place parallèlement au CO<sub>2</sub> du suivi du Radon-222 a permis de définir (sous forme d'un démonstrateur) **une approche multi-traceurs pour estimer les flux régionaux de CO<sub>2</sub>** sans modélisation explicite du transport atmosphérique.

En ce qui concerne la biosphère continentale, nous avons proposé de constituer de nouveaux champs de forçage à haute résolution pour la France pour forcer un modèle biogéochimique appelé ORCHIDEE, qui décrit l'ensemble des processus de fixation, de transformation et de respiration du carbone au sein des écosystèmes sur des échelles de temps allant de l'heure à la décennie. Il a été possible de constituer un jeu de données climatique avec une résolution de 10'x10' (contre 1°x1° précédemment). **Il a alors été possible de réaliser les simulations proposées avec ORCHIDEE. En particulier nous avons réalisé une simulation longue à haute résolution couvrant la période 1901-2000.** Une comparaison avec des observations (flux, biomasse) est en cours mais montre d'ores et déjà que le modèle est capable de reproduire de façon satisfaisante le comportement de la végétation en réponse à la variabilité interannuelle du climat. Il avait également été proposé d'améliorer le modèle ORCHIDEE afin de mieux représenter les processus à l'échelle régionale. Il est alors apparu que la principale limitation du modèle était liée à la représentation des zones cultivées. Nous avons donc couplé le modèle ORCHIDEE avec un modèle de culture STICS en collaboration avec les groupes de l'INRA. Ce couplage nous permet maintenant de représenter de façon satisfaisante le fonctionnement des cultures et de pouvoir prendre en compte le rôle des pratiques culturales dans le bilan de carbone Européen. Une première étude préliminaire a permis de montrer sur le 20<sup>ème</sup> siècle le rôle prépondérant des pratiques culturales (par rapport à l'évolution du climat et du CO<sub>2</sub> atmosphérique) sur l'évolution du bilan carboné des cultures.

### 3. Méthodologies.

#### 3.1. Mesures atmosphériques

Le développement des réseaux de veille atmosphérique du CO<sub>2</sub> au cours des 20 dernières années a rendu possible l'estimation par des approches inverses des flux de carbone à l'échelle continentale. En retour, ces méthodes inverses mettent le doigt sur les lacunes du réseau de mesure, et sur l'orientation à prendre pour optimiser le développement du réseau d'observation dans le cadre d'une régionalisation des flux de carbone. Les principaux enseignements pour la communauté scientifique en charge du suivi du CO<sub>2</sub> atmosphérique sont la nécessité d'assurer sur le long terme une inter-comparabilité de 0.1 ppm entre les sites et réseaux de mesure, et celle de densifier le réseau d'observation en milieu continental. Le LSCE est directement impliqué dans cette démarche puisqu'il a développé depuis une vingtaine d'années un réseau d'observation du CO<sub>2</sub> (Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre : RAMCES).

A l'échelle de l'Europe le premier point fait l'objet d'un projet spécifique coordonné au LSCE (TACOS-Infrastructure : [www.tacos.cnrs.fr](http://www.tacos.cnrs.fr)) depuis 2001 dans le cadre du 5<sup>ème</sup> PCRDT, activité prolongée dans le 6<sup>ème</sup> PCRDT avec CARBOEUROPE-IP. En ce qui concerne le développement du réseau de mesure en milieu continental, la difficulté est de trouver des sites adaptés au signal que l'on souhaite caractériser. La forte variabilité spatiale et temporelle des flux de carbone anthropiques et biosphériques génère une variabilité très forte des concentrations de CO<sub>2</sub> dans la basse atmosphère. Du fait de cette variabilité, on ne peut pas se contenter d'un suivi hebdomadaire ou mensuel par prise d'échantillons analysés dans un laboratoire central, comme cela est fait dans la grande majorité des sites océaniques et côtiers ([www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html](http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html)).

Le suivi en continu des concentrations de CO<sub>2</sub> est donc nécessaire pour caractériser la variabilité des concentrations aux échelles diurnes, synoptiques et saisonnières. A partir de cette analyse, il s'agit de comprendre les processus à l'origine des variabilités observées, pour séparer dans un premier temps la contribution des flux à l'échelle locale (0-30km), régionale (30-300km) et nationale (300-3000km). Cette étape est importante en vue du développement futur de schémas d'assimilation des mesures atmosphériques pour le calcul des flux régionaux et/ou l'optimisation de paramètres de modèles biogéochimiques de la biosphère continentale. En effet, les modèles atmosphériques et biosphériques utilisés ne pourront pas rendre compte de toutes les variabilités observées dans l'atmosphère, et il faut donc s'assurer que l'on utilise des jeux de données comparables entre mesures et modèles.

La stratégie mise en place dans le cadre du projet CARBOCONTROLE est de poursuivre les mesures qui avaient été initialisées par les LSCE dans divers cadres nationaux et Européens. Le suivi en continu des deux stations de Gif-sur-Yvette et Puy-de-Dôme permet une analyse détaillée de la variabilité du CO<sub>2</sub> en milieu rural au centre de la France, et à la périphérie de la région parisienne. Parallèlement, les observatoires du réseau RAMCES, (Île Amsterdam, *France* ; Mace Head, *Irlande* et Puy-de-Dôme, *France*) ont été labellisés Observatoire de Recherche en Environnement (ORE-RAMCES) et ces stations ont été incorporées dans le projet CarboEurope-IP (6<sup>ème</sup> PCRDT) qui devrait démarrer en janvier 2004 (Figure 3.1.1).

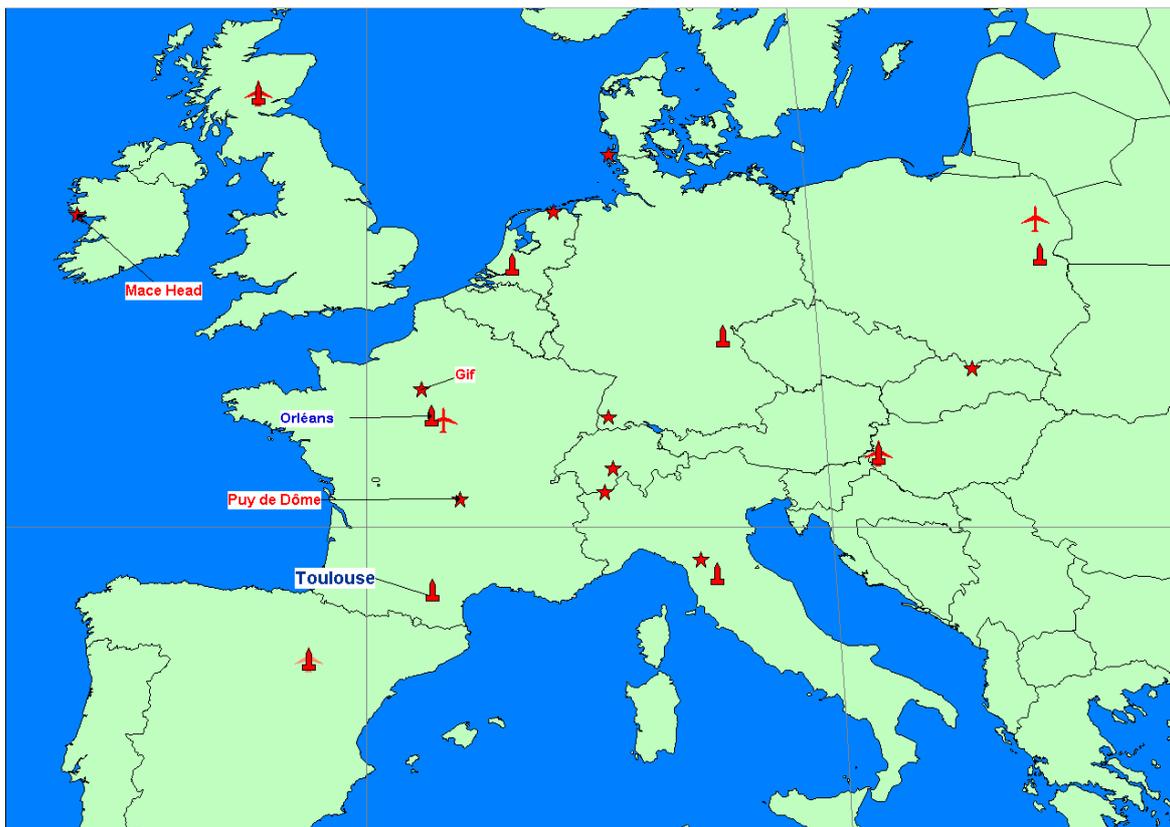


Figure 3.1.1 Localisation des stations de mesure continue (observatoire : étoile rouge, tours de grande hauteur : polygone rouge) et des stations aéroportées du projet européen CarboEurope-IP.

A partir de ces mesures, nous souhaitons attribuer les variations observées à des processus relativement bien identifiés de par leur étendue spatiale (local ou régional) et leur nature (émissions anthropiques, flux biosphériques, diffusion atmosphérique, etc...). La méthodologie que nous avons adoptée dans l'analyse des données consiste à analyser des rétro trajectoires, et à corrélérer les variations de CO<sub>2</sub> à celles d'autres traceurs atmosphériques tels que le <sup>222</sup>Rn, le CO, le SF<sub>6</sub>, ou les aérosols carbonés. L'étude des corrélations entre le <sup>222</sup>Rn et des principaux gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) permet en outre, à la station de Gif-sur-Yvette, une estimation des flux régionaux de ces composés, qui apporte une vérification atmosphérique des cadastres d'émissions publié régulièrement par le CITEPA en Île-de-France.

### 3.2. Modélisation inverse atmosphérique

La modélisation inverse est une approche dite « top-down » (descendante) qui utilise les mesures de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphériques d'un réseau global. En effet, l'atmosphère se comporte comme un superbe intégrateur des variations spatiales et temporelles des flux de CO<sub>2</sub>. Les gradients de CO<sub>2</sub> mesurés intègrent les sources et puits de carbone à la surface de la terre ainsi que le mélange diffusif et turbulent dans l'atmosphère. Par exemple, les combustions de fossiles en Amérique du nord, Europe et Asie aurait tendance à produire une accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'hémisphère nord de 6 ppm par rapport à l'hémisphère sud. L'approche inverse consiste à utiliser un modèle de transport atmosphérique pour déconvoluer les effets dus au mélange atmosphérique de ceux dus aux flux de CO<sub>2</sub>. En pratique, il s'agit de déterminer la combinaison optimale des flux de CO<sub>2</sub> pour un ensemble de régions plus ou

moins grandes, qui minimise une distance entre le champs de CO<sub>2</sub> simulé à partir d'un modèle 3D de transport atmosphérique et les observations. Une telle approche relève d'un problème inverse classique consistant à déterminer une estimation « optimale » (au sens Bayésien du terme) des flux (les inconnues), à partir de mesure imparfaite de concentration en espace et en temps. Cette méthode représente une technique puissante pour estimer les sources et puits de CO<sub>2</sub> aux échelles régionales et globales, mais requiert une attention toute particulière quand aux possibles erreurs de transport ou de mesure. La figure 3.2.1 représente le schéma de principe de l'approche inverse, incluant un discrétisation initiale de l'espace des flux, un modèle de transport et un ensemble d'observations (cf. carte du réseau global de mesures sur la figure).

Les résultats obtenus sont fonction de la densité des stations atmosphériques, de l'erreur associée aux mesures, d'une ébauche spatiale et temporelle des flux, et bien sur du code de transport utilisé. Jusque très récemment, la plupart des inversions étaient basées d'une part sur l'utilisation de moyennes mensuelles (ou annuelles) des concentration atmosphériques de CO<sub>2</sub> pour environ 50 à 80 sites de mesure suivant les études, et d'autre part sur la résolution des flux en moyenne mensuelle pour de grandes régions continentales ou océaniques (généralement de 20 à 30 régions au total). Des approches plus élaborées permettant d'estimer les flux à la résolution spatiale du modèle de transport ont cependant émergées très récemment (cf section 4.1.3).

Le formalisme inverse Bayésien (dit de synthèse, [Enting et al. 1995]) que nous avons adopté

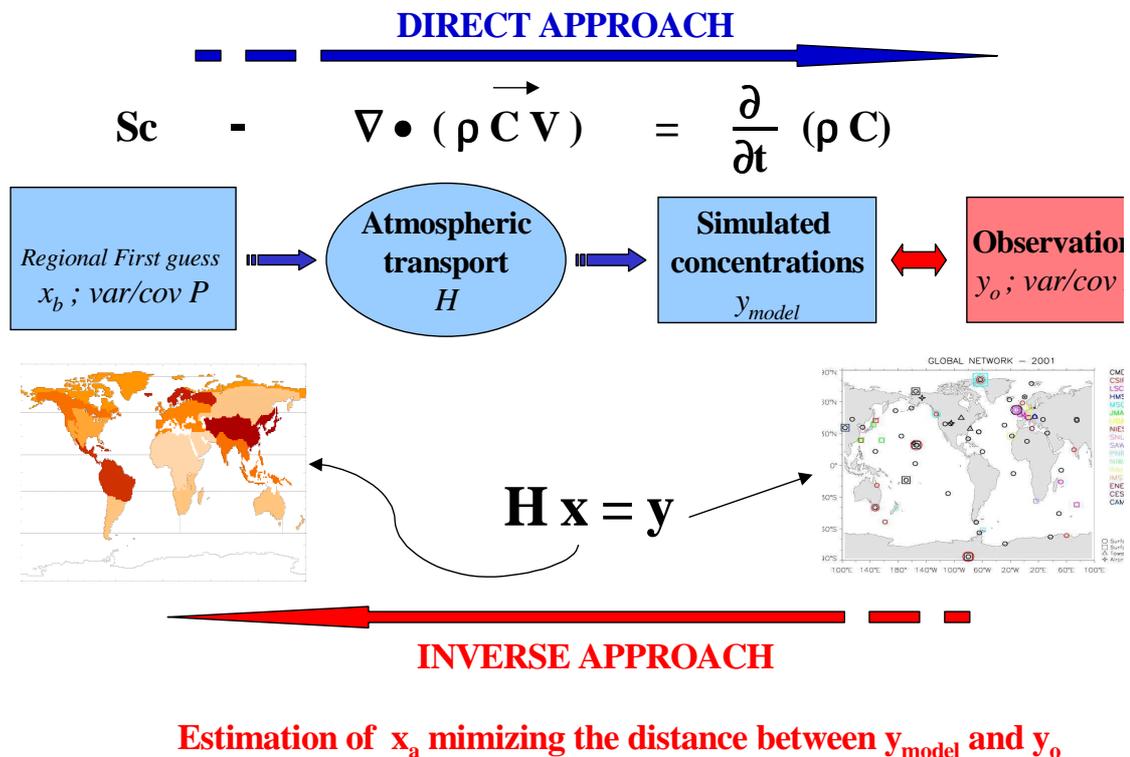


Figure 3.2.1 : Schéma de principe de la modélisation inverse des flux de CO<sub>2</sub>. A gauche on définit une ébauche des flux que l'on injecte dans un modèle de transport pour comparer les concentration simulées aux concentration observées (carte du réseau a droite).

dans le cadre du projet CARBO-CONTROLE possède l'avantage de calculer les erreurs sur les flux optimisés à partir des erreurs sur l'ébauche et sur les observations. Pour prendre en compte les incertitudes liées au transport atmosphérique, et leur impact sur les flux inversés, nous avons utilisé plusieurs modèles de transport. La méthodologie utilisée dans CARBO-CONTROLE se base sur l'utilisation de **modèles inverses globaux qui ont été raffinés dans le cadre spécifique du diagnostic des flux Européens**. Deux approches complémentaires ont été développées dans le cadre du projet, l'une consistant à utiliser des modèles globaux possédant éventuellement une grille zoomée sur la France et l'Europe (LMDz) et l'autre consistant à utiliser des modèles à domaine limité, dit méso-échelle. L'objectif général était d'augmenter la résolution spatiale et temporelle des schémas de transport et d'utiliser une discrétisation en régions et en temps la plus fine possible (comparativement aux études globales réalisées jusqu'alors).

### ***3.3. Modélisation directe des flux biosphériques à partir d'un modèle basé sur des processus biogéochimiques.***

La modélisation directe dite « bottom-up » (montante) consiste à simuler en chaque point de grille les flux de CO<sub>2</sub> à partir des conditions climatiques (forçage) et de la description du couvert végétal, en simulant les processus qui conduisent à la production de ces flux. Les résultats présentés dans le cadre de ce projet sont basés sur le modèle ORCHIDEE développé au sein de l'IPSL en collaboration avec les laboratoires du LEV (Orsay), LET et CESBIO (Toulouse), pour étudier le rôle de la biosphère dans le cycle du carbone sur les échelles interannuelles. Le modèle ORCHIDEE est en fait composé de 3 sous modèles : STOMATE, un modèle du cycle du carbone continental global, SECHIBA un schéma de surface (couplé au modèle de circulation atmosphérique LMDZ) et LPJ, un modèle de dynamique de la végétation. STOMATE calcule les flux de CO<sub>2</sub> liés à la photosynthèse, l'allocation du carbone au sein des plantes, la formation et décomposition de litière et de matière organique dans les sols, et donc l'ensemble des échanges de CO<sub>2</sub> entre la biosphère et l'atmosphère. Il s'agit d'un modèle mécaniste, c'est à dire qu'il cherche à représenter les processus biologiques qui gouvernent le fonctionnement des écosystèmes. Le schéma de surface lui calcule les paramètres physiques de l'échange à l'interface sol/végétation/atmosphère (bilan d'eau, d'énergie et de moment). Les variables de forçage du modèle sont des variables météorologiques telles que température à la surface, précipitation, humidité, rayonnement, vents, pression, ainsi que les types de végétation et des données relatives au type de sol.

Un modèle de bilan de carbone conçu pour des études globales comme STOMATE permet contrairement aux modèles « stationnels » de pouvoir décrire la variabilité spatio-temporelle à grande échelle. La contrepartie est que ce type de modèle offre une représentation nécessairement très simplifiée du fonctionnement des écosystèmes. La représentation du cycle du carbone à l'échelle d'un pays comme la France reste relativement grossière. En particulier dans sa version initiale, ORCHIDEE représente de façon très insatisfaisante les cultures dont le fonctionnement et la phénologie sont très différents des végétations naturelles, qui de plus sont pilotés par les pratiques culturales. Dans le cadre de ce projet nous avons amélioré le modèle ORCHIDEE dans sa représentation des cultures en couplant ce dernier avec le modèle de culture STICS développé à l'INRA. L'autre aspect méthodologique de cette étude a été d'améliorer les paramètres de forçage. En effet, les forçages météorologiques utilisés pour réaliser les simulations globales ont une résolution spatiale très faible (de l'ordre de 10<sup>4</sup> km) qui ne permet pas de prendre en compte de façon précise les phénomènes locaux (comme les reliefs) ou la forte variabilité spatiale de paramètres comme la pluviométrie donc l'influence

est très importante sur une échelle comme l'hexagone. D'autre part, pour les données de forçage comme la couverture végétale, il est évident que l'on dispose au niveau de l'Europe d'informations beaucoup plus précise de bonne qualité que sur l'ensemble du globe. Pour améliorer les prédictions des stocks et flux de carbone à l'échelle de la France à partir d'un modèle développé initialement pour des application globale il est donc nécessaire bien sur d'affiner la description du modèle mais également de rechercher les données les plus précises possible à mettre en entrée du modèle.

Cette méthodologie a été spécifiquement développée pour CARBO-CONTROLE et en collaboration étroite avec deux autres projets du GICC (figure 3.3.1). Elle a permis de **réduire les incertitudes sur les flux de carbone à l'échelle de la France**, et plus spécifiquement

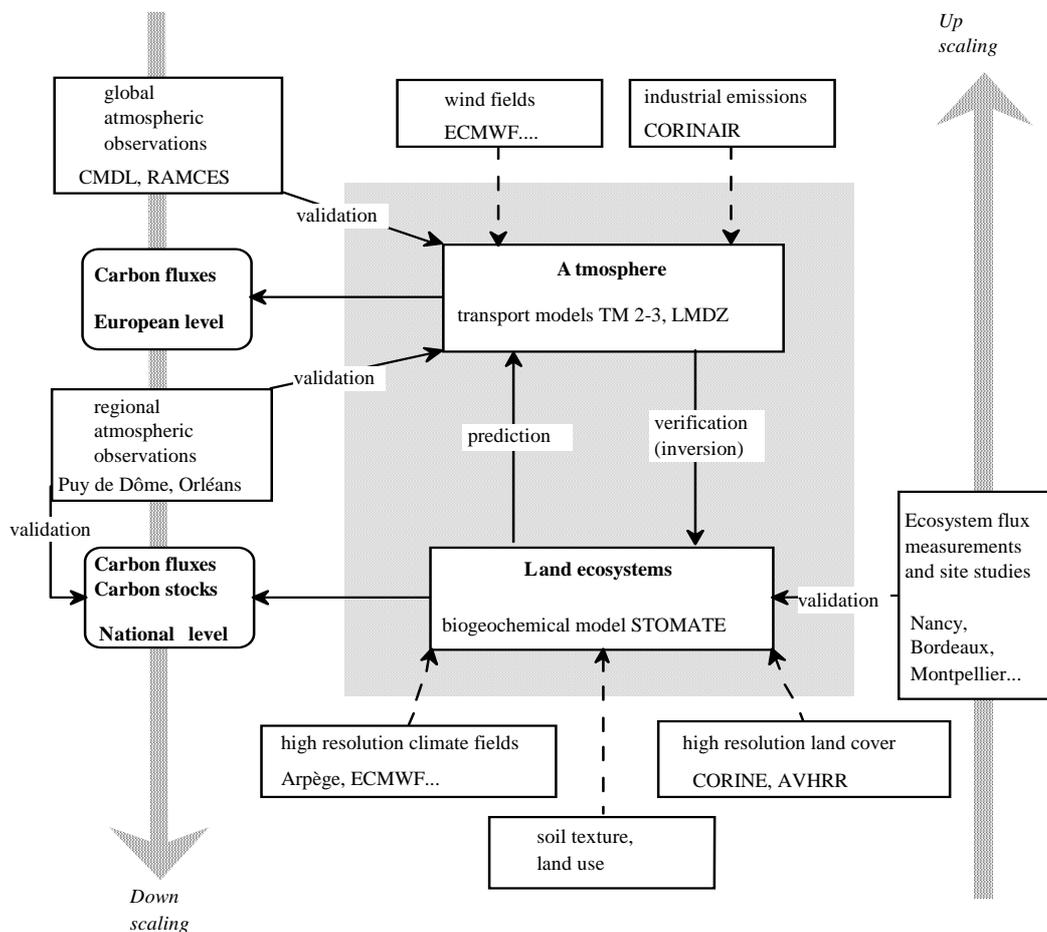


Figure 3.3.1 : Méthodologie générale utilisée pour estimer les flux de CO2. Chaque méthode particulière d'agrégation ou de désagrégation a été testée dans le cadre de CARBO-CONTROLE.

d'améliorer la prédiction des flux sur les **écosystèmes anthropisés de cultures et prairies et les forêts gérées** (collaboration avec le projet CARBOFOR coordonné par D. Lousteau). Notons qu'une description complète du modèle peut être consultée sur (<http://www.ipsl.jussieu.fr>).

## 4. Les résultats

### 4.1. Inversions atmosphériques à l'échelle européenne et nationale:

Nous avons au cours de la première tranche du projet CARBO-CONTROLE, réalisé un **inventaire détaillé des résultats des optimisations inverses publiées** par différents laboratoires internationaux (y compris celles de notre laboratoire) en dégagant les caractéristiques robustes communes des flux de carbone. Nous avons poursuivi ce travail par une **analyse de la variabilité inter annuelle des flux Européens** pour la période 1990-1998 avec le modèle de basse résolution TM2. Dans un deuxième temps nous avons obtenu **de nouvelles estimations des flux Européens à partir de cinq modèles de transport présentant une résolution spatiale accrue pour l'ensemble de l'Europe**. Finalement, durant la dernière phase du projet, nous avons développé **une approche nouvelle permettant d'utiliser les mesures continues du CO<sub>2</sub>** et l'information synoptique sur les flux et le transport qu'elles contiennent. Ces différents points sont développés séparément dans les sections suivantes.

#### 4.1.1. Bilan des estimations inverses de flux en moyenne annuelle

##### *Contexte :*

Toutes les inversions publiées dans les années 90s, prédisent l'existence d'un puits de carbone au nord de l'équateur, d'environ 2 GtC par an, dont au moins la moitié se trouve sur les continents (Figure 4.1.1 [chapitre 3 de IPCC, 2001]). Les différentes estimations des flux à partir des études inverses donnent des résultats concordants en ce qui concerne la répartition des puits et sources agrégées par grandes bandes de latitude. En revanche, lorsque les résultats de modèles sont comparés pour des régions plus petites, comme l'Amérique du Nord, l'Atlantique Nord, ou l'Europe, ils sont très différents. Citons pour exemple la distribution controversée du puits de carbone dans l'hémisphère Nord entre l'Amérique du Nord et l'Eurasie [Fan et al. 1998], [Bousquet et al. 1999]. Nous avons cherché à analyser les raisons de ces différences, afin de dégager les facteurs d'incertitudes majeurs dans les approches inverses. L'objectif principal est d'une part, de cerner les estimations de flux qui peuvent être considérées comme robustes et d'autre part d'individualiser les paramètres les plus sensibles de la méthode inverse. Les résultats sont discutés pour le bilan de carbone de l'Europe.

##### *Simulations réalisées :*

Nous avons réalisé un ensemble de simulations inverses basées sur l'approche Bayésienne décrite précédemment en variant les différentes composantes du système inverse une à une afin de dégager les facteurs principaux d'incertitudes. Ce travail a fait l'objet d'un article [Peylin et al. 2002].

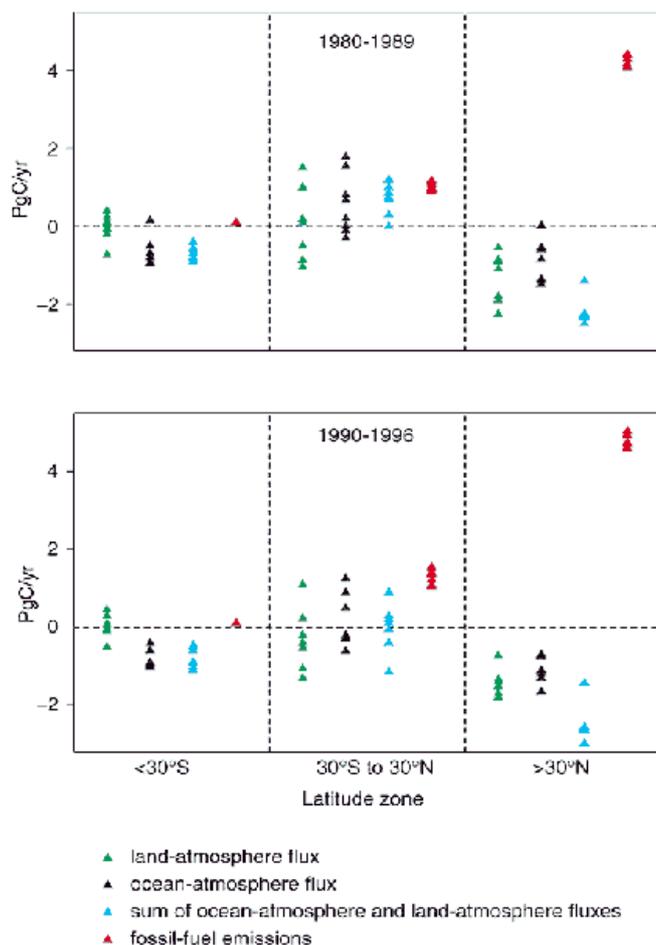


Figure 4.1.1. Résultats d'inversions existants dans la littérature (différents jeux de données, différentes méthodes...) compilés par bande de latitude. On constate l'existence d'un puits de carbone dans l'hémisphère Nord, dont la partition en longitude entre océans et continents reste incertaine.

En outre, les résultats d'une inter-comparaison de modèles inverses, à laquelle nous avons participé, nous ont permis d'estimer plus précisément l'impact sur les flux de l'utilisation de différents modèles de transport atmosphérique [TRANSCOM-3, Gurney et al. 2002]. L'étude conduite au LSCE (Peylin et al. [2002]) utilise trois codes de transport différents : TM2, TM3, et GCTM, alors que l'étude TRANSCOM-3, utilise 15 modèles de transport (dont les trois ci dessus).

Peylin et al. [2002] utilise les mesures de concentrations de CO<sub>2</sub> de 46 stations dont les données ont été moyennées sur deux intervalles de temps : 1990-94 et 1985-1989. La période 1990-1994 correspond à un taux de croissance du CO<sub>2</sub> plus faible que la moyenne décennale, suite à un événement climatique particulier qui est l'éruption du volcan Pinatubo en Juin 1991. La période 1985-1989 est une période où le taux de croissance du CO<sub>2</sub> est proche de la moyenne décennale. Dans l'étude TRANSCOM-3 [Gurney et al. 2002], la période considérée est 1992-1996 avec un jeu de 76 stations.

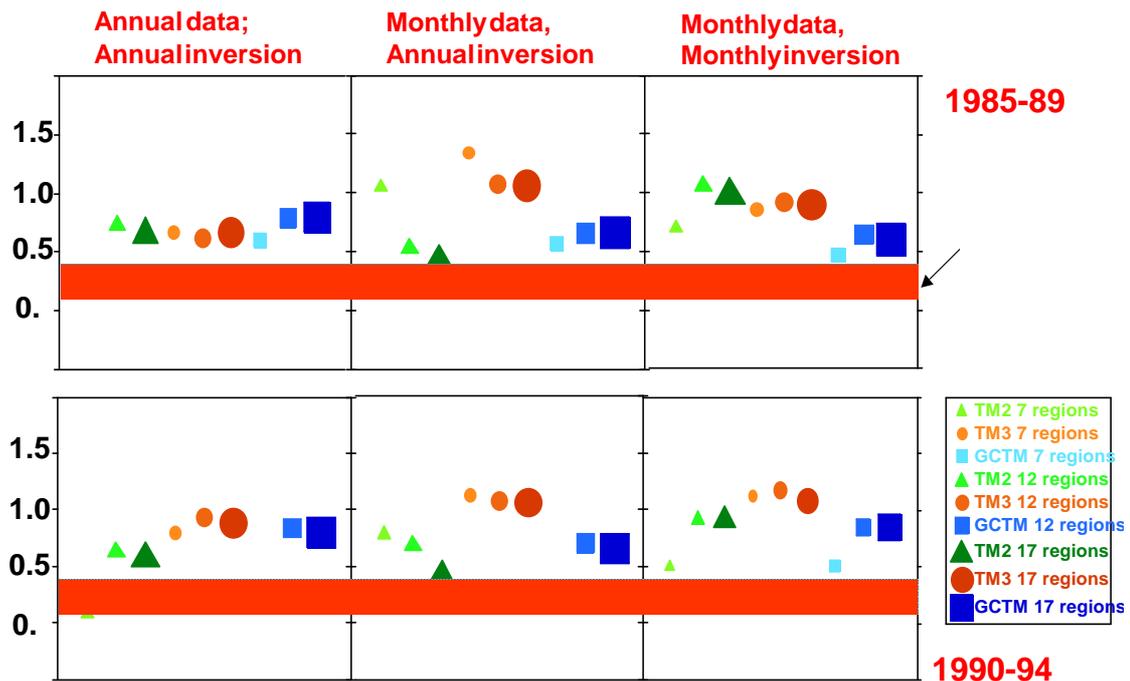


Figure 4.1.2. Résultats de modèles inverses pour le bilan de carbone Européen. Trois modèles de transport (triangles, ronds et carrés) ont été utilisés, ainsi que trois jeux de 7, 12 ou 17 régions (taille des symboles proportionnelle au nombre de régions). Chaque graphe représente des paramètres différents de l'inversion des flux (de gauche à droite : sources annuelles déterminées par des concentrations annuelles, sources annuelles par des concentrations mensuelles et sources mensuelles par des concentrations mensuelles). L'intervalle en couleur correspond à l'estimation indépendante obtenue à partir d'inventaires de biomasse et de carbone sol pour les forêts des pays de l'Europe des 15 (moyenne 0.2 GtC par an). Convention >0 pour un puits de CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Le nombre de régions considérées est un paramètre qui a été varié entre 7, 12 et 17 régions dans Peylin et al [2002]. Deux degrés de discrétisation temporelle des sources et des concentrations ont été étudiés : annuel ou mensuel. D'un côté, les méthodes utilisant des observations moyennes annuelles permettent de réduire l'incertitude due au transport atmosphérique par rapport au cas mensuel (les diagnostics annuels étant les plus robustes). D'un autre côté, ces méthodes dépendent fortement des distributions saisonnières a priori des sources, distributions encore très incertaines. L'étude de Gurney et al. [2002] considère 22 régions (11 océans et 11 continents) et des sources annuelles. Nous avons utilisé une distribution a priori des sources et puits de CO<sub>2</sub> pour chaque région. Celle-ci correspond aux flux d'échanges air-mer estimés par Takahshi et al. [1999] ainsi que pour les continents au flux nets biosphériques prédit par le modèle de surface SiB2 (Peylin et al. [2002]), ou par le modèle CASA (Gurney et al. [2002]). Les flux dus aux combustions fossiles [Andres et al., 1996] sont soit optimisés avec une erreur très faible (Peylin et al.), soit pré-soustraits des observations (Gurney et al.).

#### Résultats :

L'objectif de CARBO-CONTROLE était d'utiliser les résultats d'inversions pour en déduire les flux Européens qui sont résumés sur les figures 4.1.2 et 4.1.3. Le **continent Européen est dans tous les cas de figure un puits net de CO<sub>2</sub> atmosphérique**, avec d'importantes différences selon les paramètres de l'inversion. **La valeur moyenne est de 0.7 GtC par an** avec un écart type de  $\pm 0.6$  GtC pour la période 1985-1989 (Peylin et al., 2002). On constate

aussi que l'inversion de sources annuelles avec des données mensuelles (Figures du milieu) est plus sensible aux différences entre les codes de transport. Les différences entre les modèles de transport atmosphériques et celles liées au nombre de régions utilisées ont un écart type qui correspond à une erreur "externe", comparable dans le cas de l'Europe à l'erreur "interne" bayésienne associée au résultat de chaque inversion. L'erreur interne est principalement fonction de l'erreur des observations et de la capacité du réseau de mesures d'apporter des informations sur la région pour laquelle on cherche à optimiser le flux. Pour les régions continentales, le réseau utilisé ne permet donc pas encore de réduire significativement les incertitudes et ce compte tenu du peu de stations continentales assimilées dans ces deux études. La figure 4.1.3 présente les résultats du projet TRANSCOM-3 pour l'Europe (Gurney et al., 2002). La **moyenne des 15 inversions fournit un puits de carbone en Europe de 0.6 GtC par an** avec un écart type "externe" de  $\pm 0.35$  GtC. La précision interne moyenne de chaque inversion est de l'ordre de  $\pm 0.4$  GtC par an. Cela indique en première approximation que les différences entre codes de transport font jeu égal avec le manque de données atmosphériques dans l'incertitude que l'on estime sur le flux Européen.

Enfin les résultats de l'approche atmosphérique ont été comparés à ceux des inventaires forestiers et de données de carbone sol compilés pour les forêts Européennes [ECCP, 2001]. On constate que le puits donné par les inversions est compatible dans son intervalle d'erreur avec les données des inventaires, mais que sa valeur moyenne est environ deux fois plus importante. Existe t'il des écosystèmes non traités par les inventaires (prairies, cultures) qui absorbent du carbone et permettraient d'expliquer cette différence ? Une autre cause possible est la différence liée au fait que les inversions concernent l'Europe Géographique (jusqu'à l'Oural) tandis que les inventaires ne concernent que les pays de l'Europe des 15.

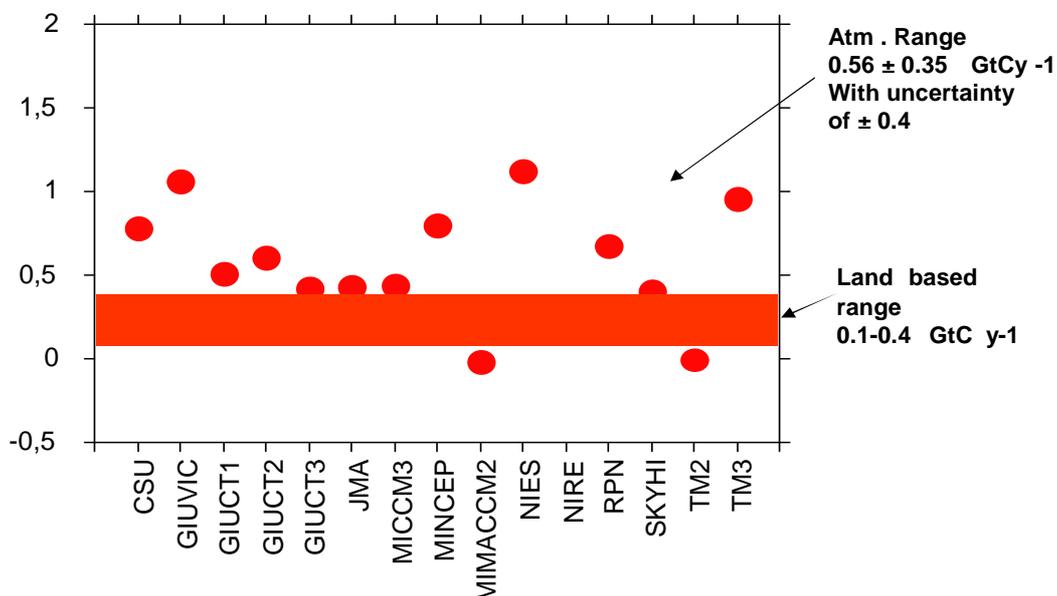


Figure 4.1.3. Flux de CO<sub>2</sub> (convention >0 indique un puits de carbone) en Europe pour la période 1992-1996, calculés avec la même inversion des sources annuelles appliquée à 15 modèles de transport différents (TRANSCOM-3, Gurney et al. 2001). L'intervalle en couleur indique la valeur obtenue à partir des inventaires de biomasse pour les forêts de l'Europe des 15.

#### 4.1.2. Variabilité inter annuelle des flux Européens

Une partie des différences entre les estimations inverses discutées précédemment pour l'Europe (ou pour d'autres continents) provient aussi du fait d'assimiler des observations atmosphériques pour des périodes différentes. En effet, le puits moyen de carbone présente de large fluctuations en fonction des événements climatiques majeurs tel que les oscillations El-Nino ou l'éruption volcanique du mont Pinatubo en 1991. Nous avons donc cherché à analyser ces variations inter annuelles en réalisant des inversions sur une longue période prenant en compte les variations au cours du temps des gradients de concentration entre stations. La méthodologie reste similaire à celle appliquée sur des observations moyennes, la complexité résidant essentiellement dans la taille du problème inverse et donc la taille des matrices à inverser.

Nous avons réalisé un ensemble de simulations inverses basées sur l'utilisation du modèle TM2 basse résolution, en faisant varier différents paramètres de la procédure inverse (i.e., nombre d'observations, valeurs des incertitudes a priori, nombre de régions considérées, ...). Ce travail avait donné lieu initialement à une publication où les flux étaient discutés principalement par grande bande de latitude (Bousquet et al., 2000). Nous avons dans le cadre de ce projet affiné cette étude en prenant en compte un plus grand nombre de stations dans l'hémisphère nord, afin de pouvoir discuter les variations inter annuelles des flux Européens. Ces flux ont été aussi directement comparés avec les variations de flux calculés par deux modèles du fonctionnement de la biosphère (modèles « up-scaling » SLAVE et LPJ). La

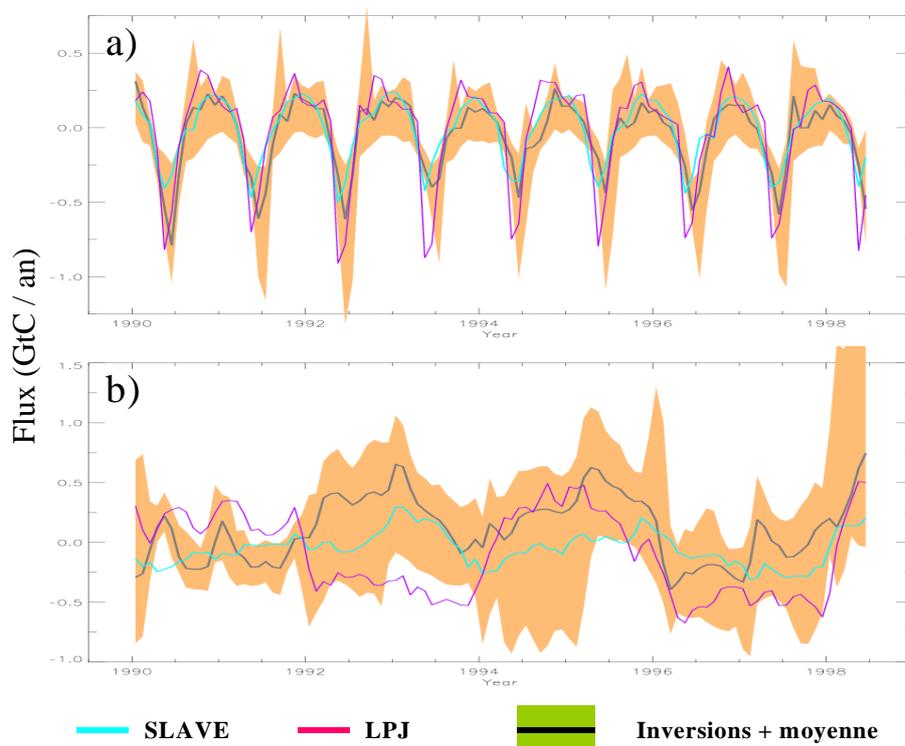


Figure 4.1.4 : Résultats de différents modèles inverses (zone grisé plus courbe moyenne en noir) et de 2 modèles du fonctionnement de la biosphère (SLAVE et LPJ) pour les variations inter-annuelles (90-98) du bilan de carbone Européen : a) variations des flux en moyenne mensuelle, et b) variations des mêmes flux après retrait du cycle saisonnier (moyenne mobile). Les valeurs positive correspondent à un puits de carbone moins fort que la valeur moyenne pour toute la période.

comparaison directe entre ces deux approches est détaillée dans un article qui vient d'être accepté (Peylin et al., 2004).

Les estimations inverses produisent des variations inter annuelles du flux de CO<sub>2</sub> (figure 4.1.4b) relativement fortes, +/- 0.5 GtC par an, avec cependant une forte incertitude (zone grisée étendue). De manière générale, nous constatons une diminution du puits (anomalie positive) pour la période 92-95, période correspondant à un long épisode de faible El-Nino. La comparaison avec les estimations directes des modèles SLAVE et LPJ montre un début d'accord prometteur. L'amplitude des variations simulées par LPJ est similaire à celle des inversions avec toutefois une opposition de phase pour la période 92-94, tandis que l'amplitude simulée par SLAVE est plus faible. Le bon accord entre les deux types d'approche, notamment pour la période 94-98, nous a permis d'identifier, à travers l'analyse des simulations directes, les processus climatiques et édaphiques contrôlant ces variations. Pour les moyennes et hautes latitudes, le modèle LPJ semble privilégier un contrôle des variations du flux nets biosphériques par des variations de la respiration hétérotrophe des écosystèmes, variations elles même induites par des changements de température. Ce résultat reste néanmoins préliminaire car d'autres mécanismes non présents dans les modèles biogéochimiques pourraient avoir des effets similaires ou compensatoires. Néanmoins, le début de convergence entre les modèles directs et les approches inverses pour la variabilité des flux de carbone est très prometteur. Notons aussi que cette convergence, bien que peu visible pour l'Europe, est encore plus frappante en moyenne zonale.

#### *4.1.3. Nouvelles estimations des flux moyens Européens à l'aide de modèles haute résolution*

##### ***Méthodologie***

Comme nous l'avons décrit précédemment, l'amélioration des estimations du puits de carbone Européen, nécessitait l'utilisation de modèles de transport à plus hautes résolution ainsi que d'un découpage régional plus fin que ceux utilisés jusqu'alors. Dans ce contexte nous avons utilisé 4 modèles présentant une résolution accrue sur l'Europe en partenariat avec d'autres instituts Européens. Deux de ces modèles sont à domaine limité et ne couvre qu'une partie de l'hémisphère nord. Pour ces modèles « méso-échelle », il a donc été nécessaire de les forcer aux limites du domaine avec les sorties d'un modèle global (TM3 pour ces travaux). En revanche le modèle que nous avons plus directement utilisé, LMDz permet la définition d'une grille zoomée sur l'Europe avec une résolution de moins de 100km au centre du zoom. Ce modèle reste un modèle global ce qui permet donc de traiter le problème inverse dans son ensemble et donc de tenir compte de tous les flux de CO<sub>2</sub> à la surface de la terre. Ces différents schémas de transport haute résolution nous ont permis d'assimiler l'ensemble des mesures Européennes de CO<sub>2</sub>, ce qui n'était pas le cas avec l'utilisation de modèles basse résolution (particularité géographique de certains sites impossible à simuler pour ces derniers). Dans le cadre de ce projet commun, nous pouvons donc étudier l'incertitude liée au transport atmosphérique sur l'estimation inverse des flux Européens de CO<sub>2</sub>.

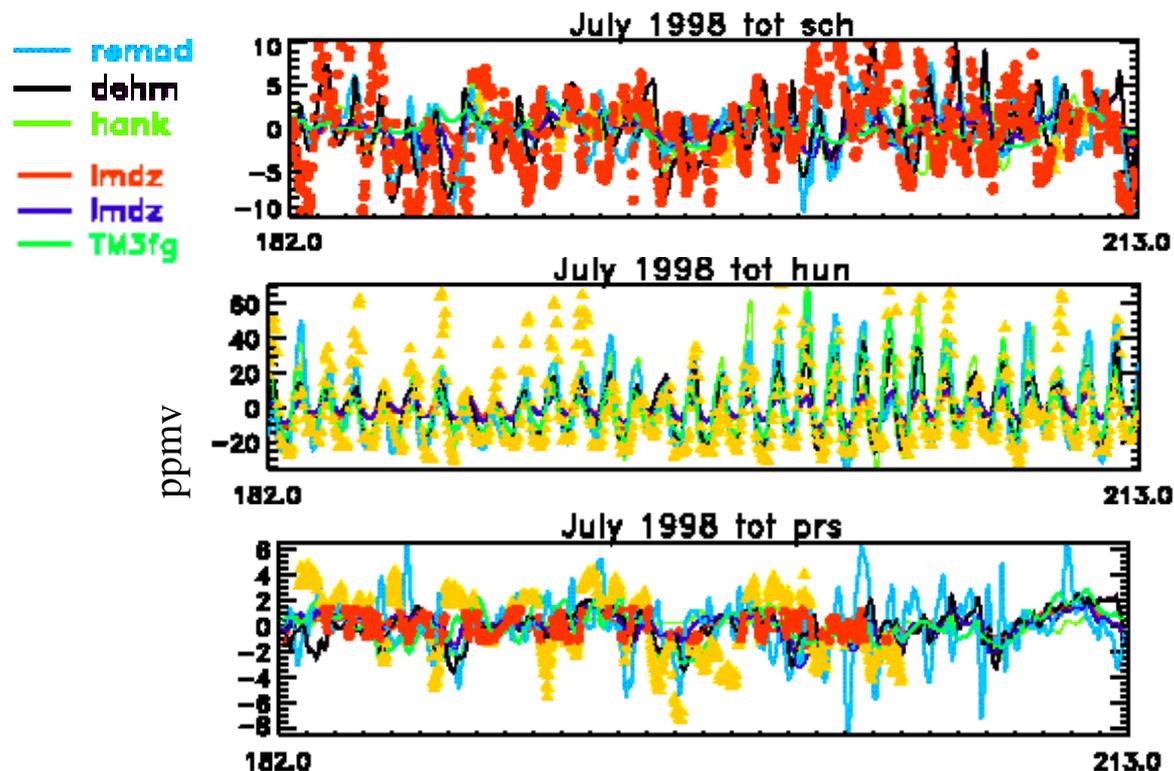


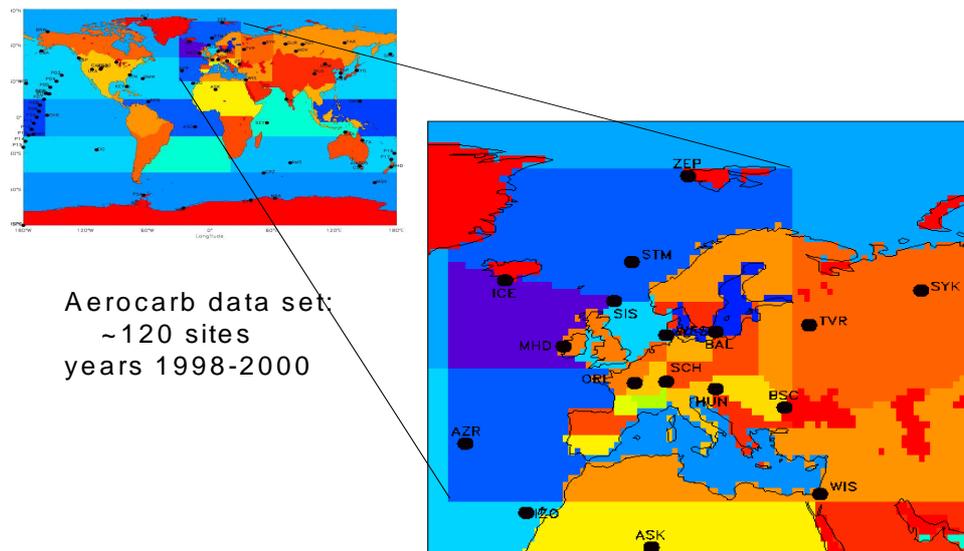
Figure 4.1.5 : Simulation des concentrations de CO<sub>2</sub> pour 5 modèles différents (2 versions de LMDz) à 3 stations Européennes : Schauinsland en Allemagne (SCH), HUN en hongrie et Plateau Rosa (PRS) en Italie. Les mesures horaires sont représentées par les triangles jaunes.

Table 1: Les 4 modèles utilisés.

	REMO	LMDz	DEHM	TM3
Domain	Europe	Global with zoom over Europe	Northern hemisphere/ Europe	Global
Resolution	.5x.5 deg.	1.2x0.8 deg in zoom/ 7x5 deg outside the zoom	150x150 km/ 50x50 km	4x5 deg
Number of Vertical levels	20	19	20	19
Alt. of Lowest level	60 m	150 m	80 m	82m

### Simulations directes :

Dans un premier temps, nous avons comparé les simulations directes des modèles utilisés pour dégager les problèmes majeurs de chaque modèle. Cette étape est essentielle avant de réaliser l'inversion des flux de CO<sub>2</sub> et ce pour anticiper tout biais systématique. La figure 4.1.5 compare les concentrations modélisées par les différents modèles de la table 1 à trois stations Européennes en Juillet. Pour la station de Schauinsland (montagne en Allemagne), nous observons un cycle diurne marqué, mais beaucoup plus faible qu'à la station de Hongrie (Tour de Flux). Dans les deux cas, les concentrations simulées sont en bien meilleur accord avec les observations durant la journée que durant la nuit. En effet les fortes concentrations de nuit sont très difficiles à simuler, compte tenu du rôle critique de la couche limite nocturne dont la stabilité reste encore très mal représentée dans la plupart des modèles. Cependant les modèles méso-échelles produisent un meilleur accord pour ce qui est de l'amplitude du cycle diurne avec les observations que les modèles globaux (incluant LMDz). Pour la station d'altitude (Plateau Rosa, PRS), les événements synoptiques, dominent les variations observées. Dans ce cas la performance des modèles bien qu'encourageante reste à améliorer. D'une manière générale, l'ensemble de ces caractéristiques est encourageant pour l'utilisation



Aerocarb data set:  
~120 sites  
years 1998-2000

Figure 4.1.6 : Limites des régions utilisées pour estimer les flux de CO<sub>2</sub> sur l'Europe à l'aide d'une approche inverse du transport atmosphérique. L'Europe est divisée en un ensemble de petites régions cohérentes d'un point de vue géopolitique et écologique, tandis que le reste du monde est divisé en grandes régions (approche classique). Les points noirs représentent les stations utilisées dans l'inversion.

de tels modèles dans une procédure inverse, et plus spécialement si l'on sélectionne les données de jour.

### Estimations inverses

La procédure inverse reste dans son principe similaire à celle décrite précédemment, avec cependant quelques particularités pour les modèles à domaine limité. Nous avons défini un nouvel ensemble de petites régions adapté à l'estimation inverse des flux sur l'Europe (figure 4.1.6). En effet l'utilisation de grandes régions est une source potentielle d'erreur, liée à la nécessité de prescrire une distribution spatiale a priori des flux de CO<sub>2</sub>, distribution encore très incertaine. Nous avons réalisé un ensemble de simulations inverses, pour une année moyenne (période 1998-2001) avec un pas de temps mensuel en utilisant les sites

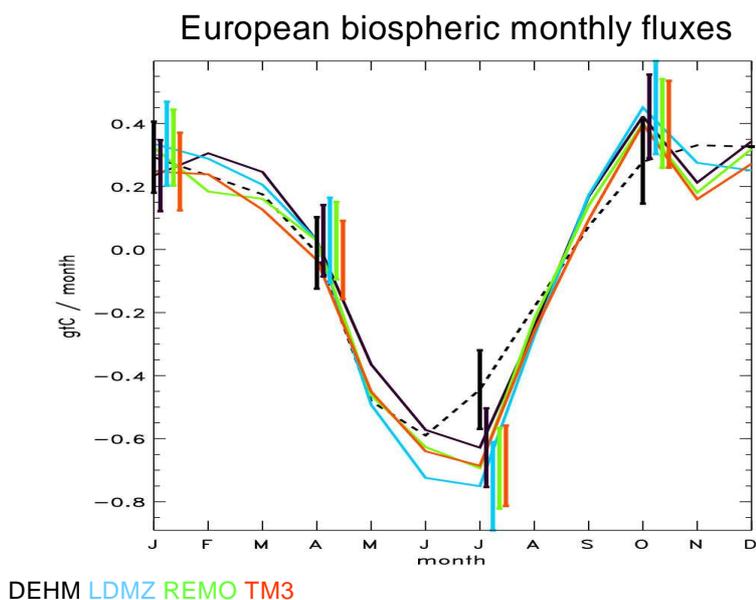


Figure 4.1.7 : Flux a priori (pointillés) et optimisé par la procédure inverse pour les 4 modèles. Les barres d'erreurs correspondent à l'incertitude estimée par l'inversion.

continentaux reportés sur la figure 4.1.6. En utilisant différents modèles nous pouvons donc obtenir une estimation de l'incertitude liée au transport atmosphérique, incertitude autrement très difficile à quantifier (figure 4.1.7). Sur le panel de droite de la figure 4.1.8 nous avons un découpage sub-continental du puits annuel de carbone sur l'Europe. Pour chaque modèle, les rectangles nous donnent la valeur estimée du flux annuel de carbone. La barre d'erreur correspond à l'incertitude a posteriori estimée par l'inversion (erreur liée au réseau de mesures principalement). L'amplitude de cette erreur donne une mesure de la contrainte apportée par les observations atmosphériques. Il est intéressant de noter que les différences entre les modèles restent en moyenne plus petites que la moyenne des erreurs retournée par l'inversion elle-même.

Nous obtenons un gradient positif de l'ouest vers l'est, avec l'Europe de l'ouest présentant un puits assez fort et l'Europe de l'Est présentant une source. Ce résultat est cependant très dépendant du réseau de stations utilisé et plus particulièrement des profils verticaux obtenus par avions en Sibérie. Des analyses en cours plus poussées permettront de déterminer la robustesse d'un tel partage du puits net de carbone entre les différents écosystèmes Européens. Un grand nombre de tests de sensibilité a été réalisé pour cet exercice inverse. Nous avons notamment remarqué que les modèles méso-échelles produisent une réduction d'erreur plus forte que les modèles globaux mais pour un domaine plus limité autour des stations de mesures. Ceci correspond au fait que ces modèles possèdent une grille plus fine sur l'Europe. : 50 km contre 100 ou 200 km pour les modèles globaux. D'autres problèmes ont aussi été considérés telles que la structure des erreurs a priori (soit constante soit proportionnelles à la GPP pour les régions terrestres), l'influence de la sélection diurne des sorties des modèles, etc.... La synthèse de ces résultats sera publiée dans un article en cours de rédaction (Rivier et al, en préparation 2004).

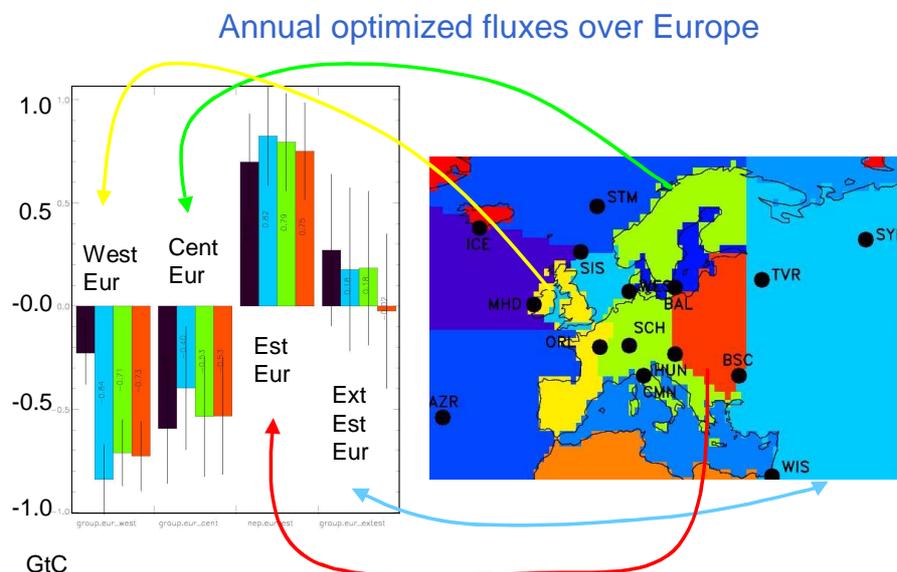
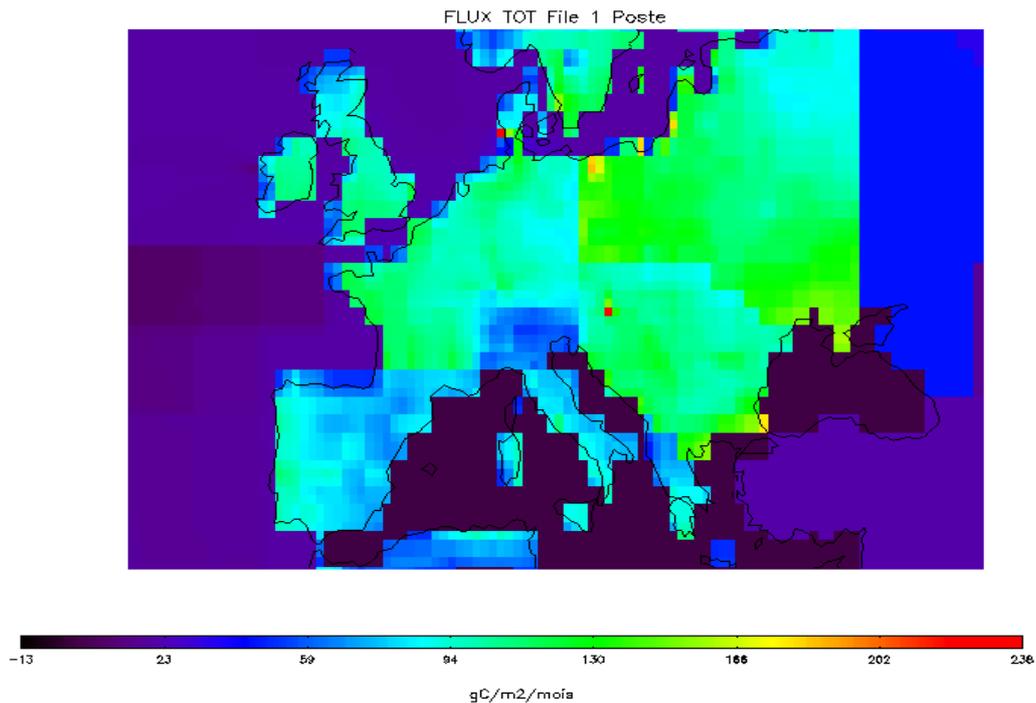


Figure 4.1.8: Flux de carbone en GtC par an pour un découpage de l'Europe, (voir texte pour descriptif des courbes).

#### 4.1.3. Inversion des mesures continues de CO<sub>2</sub> sur l'Europe

Les inversions réalisés jusqu'à ce jour ne prennent en compte que des observations mensuelles de CO<sub>2</sub> et n'utilisent donc pas toute l'information des mesures continues,

information tant sur le transport synoptique des masses d'air que sur les variations journalières (voir horaire) des sources et puits régionaux. Cette information est détectable avec plus de précision parce que le transport atmosphérique est moins diffusif sur les échelles synoptiques que sur les échelles mensuelles et au delà. Or il s'avère que nous disposons depuis quelques années de plus de 10 stations continues sur l'Europe. Cependant, il convient pour assimiler ces mesures continues d'utiliser des modèles hautes résolutions ainsi qu'une discrétisation en régions (et en temps) plus fine que celle couramment utilisée. Dans ce contexte, nous avons utilisé le modèle LMDz avec un zoom sur l'Europe comme



*Figure 4.1.9 : Première estimation (préliminaire) des flux européens pour le mois de novembre 1998 optimisés pixel par pixel avec le modèle LMDz en utilisant les mesures en continues sur l'Europe.*

précédemment ainsi que le principe de réversibilité du transport atmosphérique (équivalent à l'adjoint du modèle) pour déterminer l'influence de chaque maille du modèle sur les concentrations aux stations. Nous avons de plus considéré les observations continues selon des moyennes journalières.

L'intégration de ces nouvelles caractéristiques dans l'ensemble de la chaîne d'inversion a nécessité de nombreuses modifications du code inverse et nous commençons seulement à obtenir des estimations de flux pour chaque maille du modèle sur l'Europe, jour à jour. Une telle approche a cependant été réalisée pour une période restreinte de 1 mois (mois de novembre 1998) dans le but de tester l'ensemble de la chaîne inverse. De nombreuses difficultés tant scientifiques que techniques sont apparues lors de ces développements, notamment concernant la régularisation du problème inverse très fortement sous contraint (1000 flux différents correspondant aux 1000 mailles Européennes pour seulement 6 à 8 stations). Pour régulariser l'inversion nous avons introduit non seulement des flux a priori mais aussi des corrélations entre les différentes erreurs associées aux flux a priori. La prise en

compte de ces corrélations permet de propager l'information d'une maille à une autre et d'ajuster l'ensemble des flux Européens. La définition de ces corrélations reste un problème difficile et nous avons dans un premier temps utilisé les sorties de différents modèles biosphériques pour les calculer. Enfin, nous avons aussi mis au point une méthode pour prendre en compte directement l'influence des conditions initiales dans la résolution du problème inverse. En effet l'optimisation des flux pour une période courte de 1 mois dépend aussi fortement des gradients initiaux de concentrations dans l'atmosphère au début du mois.

Nous présentons donc seulement les premières estimations de flux pour le mois de novembre 1998 pour l'Europe (figure 4.1.9). Ces estimations à l'échelle de la maille du modèle et combinant les mesures en continu de 6 stations Européennes, sont à la pointe des développements récents en terme d'optimisation inverse. Si les valeurs des flux sont encore en cours d'analyse, cette approche est très prometteuse et nous comptons la poursuivre très fortement durant l'année 2004. Pour cela nous comptons soumettre un projet similaire à CARBO-CONTROLE pour la 2<sup>ème</sup> tranche du GICC.

#### ***4.2. Echelle nationale : campagne de mesure en continu d'une durée de un an du CO<sub>2</sub>, CO et Radon à l'Observatoire du Puy de Dôme.***

Le développement récent des stations de mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique en milieu continental a permis de mettre en évidence la très forte variabilité de ce gaz en raison de la proximité des sources/puits de carbone, et de la complexité du transport des masses d'air. Le projet CARBOCONTROLE a permis d'initier en 2001 des suivis de CO<sub>2</sub> en France dans les observatoires du Puy-de-Dôme et de Saclay, qui font désormais partie du SO/ORE RAMCES au même titre que l'observatoire de Mace-Head. En raison de la très forte variabilité du CO<sub>2</sub> atmosphérique observée en Europe, la régionalisation des flux de carbone nécessite un réseau d'observatoires avec des mesures de CO<sub>2</sub> en continu et calibrées à 0.1 ppm près. Le développement d'un tel réseau en Europe est une pièce essentielle du projet européen CARBOEUROPE-IP dans lequel les observatoires du LSCE jouent un rôle prépondérant (coordination de la partie atmosphérique).

L'observatoire du Puy de Dôme (OPGC) à 1465 m d'altitude a été choisi comme 'démonstrateur' en raison de sa situation géographique au centre de la France, sous l'influence dominante de flux d'Ouest et Nord/Ouest (Figure 4.2.1), et susceptible d'échantillonner les sources et puits continentaux de CO<sub>2</sub> à l'échelle régionale. L'analyseur CO<sub>2</sub> est actuellement architecturé autour d'un analyseur Infra Rouge Non Dispersif commercial de type LICOR 6252 dont les performances ont été améliorées par la régulation des paramètres physiques et l'ajout d'un piège cryogénique (Cryoplongeur amenant la température à -60°C) éliminant la vapeur d'eau contenu dans l'air qui perturbe la mesure.

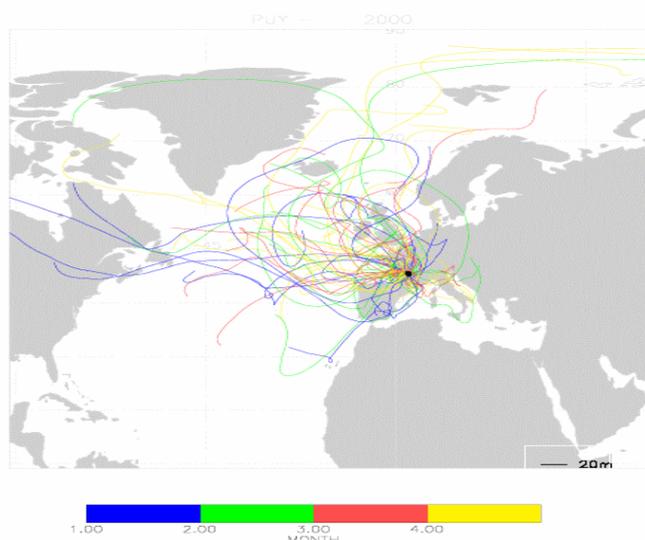


Figure 4.2.1: Rétro trajectoires à 5 jours pour le site du Puy de Dôme calculées en 2000 avec une fréquence d'une rétro tous les 5 jours. Les couleurs correspondent à la saison: bleu pour l'hiver (DJF), vert pour le printemps (MAM), rouge pour l'été (JJA) et jaune pour l'automne (SON).

Le suivi de la stabilité de l'instrument se fait par injection de gaz de référence dans l'analyseur, opération réalisée entre une fois par heure à une fois par jour.

L'étalonnage de l'analyseur est effectué par passage successif de 4 à 8 gaz étalon. Ces standards de travail sont étalonnés par une échelle primaire détenue par le LSCE à Gif-sur-Yvette. La fréquence d'étalonnage est comprise entre plusieurs fois par jour à 1 fois par an pour la fréquence d'étalonnage.

Cet appareil et les gaz étalons nécessaires à des mesures continues ont été installés à l'OPGC en novembre 2000, en collaboration avec P. Laj et J-M. Pichon du LaMP. Le protocole de mesure est identique à celui des deux autres observatoires du réseau RAMCES et permet d'atteindre une précision de l'ordre de 0.1 ppm. La surveillance et la maintenance de l'analyseur a été assurée conjointement par le LaMP et le LSCE. Un analyseur de <sup>222</sup>Rn a été mis en place au Puy-de-Dôme en 2002, complétant ainsi cet observatoire.

Les mesures représentées sur la Figure 4.2.2 témoignent des caractéristiques différentes des trois observatoires du LSCE situés en milieu océanique, rural et péri-urbain. L'amplitude de la variation saisonnière du CO<sub>2</sub> est relativement plus forte à Saclay par rapport au Puy de Dôme et Mace Head (Figures 4.2.3 et 4.2.4), mais on note surtout une très forte différence des trois observatoires pour les variations de CO<sub>2</sub> à l'échelle diurne et synoptique. Cette variabilité est potentiellement la plus importante pour la régionalisation des flux de carbone car elle est directement liée à la distribution régionale des sources et puits. Elle reste cependant difficile à interpréter en raison de l'imbrication très forte des contributions des flux anthropiques et biosphériques; et de la diffusion des masses d'air (cycle diurne de la CLA, et transport synoptique). Un exemple de la variabilité du CO<sub>2</sub> à l'échelle de quelques heures à quelques jours est fourni sur la Figure 4.2.5. On distingue pour le CO<sub>2</sub> des cycles diurnes plus ou moins marqués (~2 à 20 ppm) et une augmentation régulière des teneurs du 7 au 16 juillet 2003. Les concentrations atmosphériques de CO, carbone-suie et <sup>222</sup>Rn présentent de fortes similitudes.

Ces trois traceurs indiquent une augmentation progressive des concentrations du 6 au 16 juillet puis une chute rapide du 16 au 18 juillet. Cette variabilité indique que les masses d'air prélevées au sommet du Puy de Dôme ont une origine marine début et mi-juillet, et une origine continentale entre ces deux périodes. L'origine des masses d'air est confirmée par les rétro-trajectoires calculées à partir du modèle HYSPLIT4-NOAA (Figure 4.2.5).

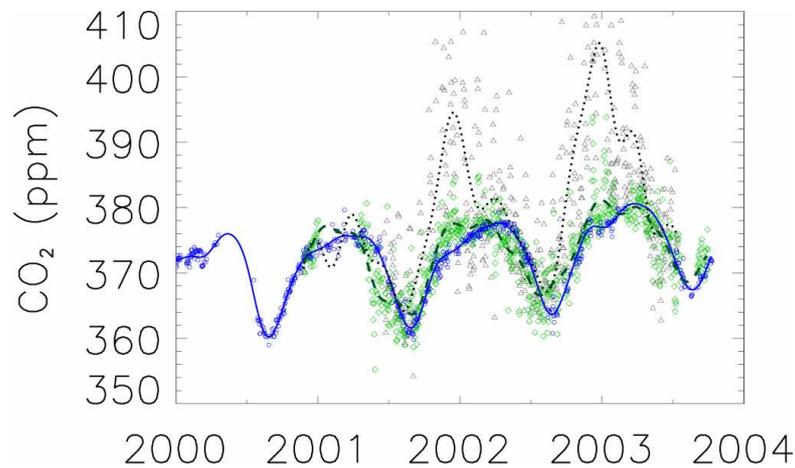


Figure 4.2.2: Mesures en continu du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans les observatoires de Mace-Head (cercles bleus), Puy de Dôme (losanges verts) et Saclay (triangles gris)

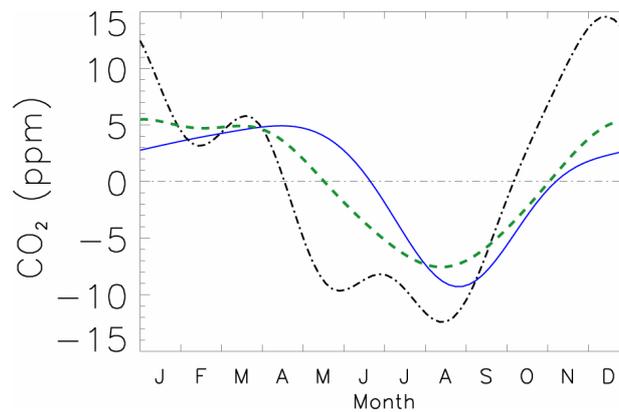


Figure 4.2.3: Cycles saisonniers moyens du CO<sub>2</sub> dans les observatoires de Mace-Head (trait bleu), Puy de Dôme (tirets vert) et Saclay (pointilles gris)

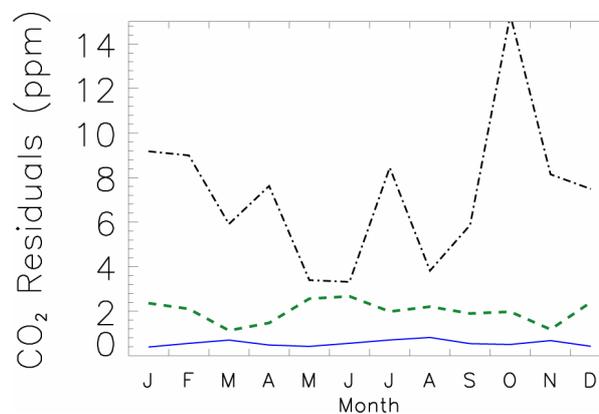


Figure 4.2.4: Variations résiduelles de CO<sub>2</sub> dans les observatoires de Mace Head (trait bleu), Puy de Dôme (tirets vert) et Saclay (pointilles gris)

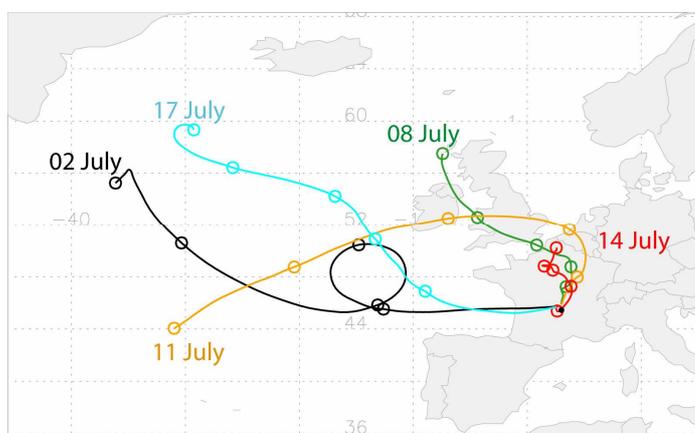
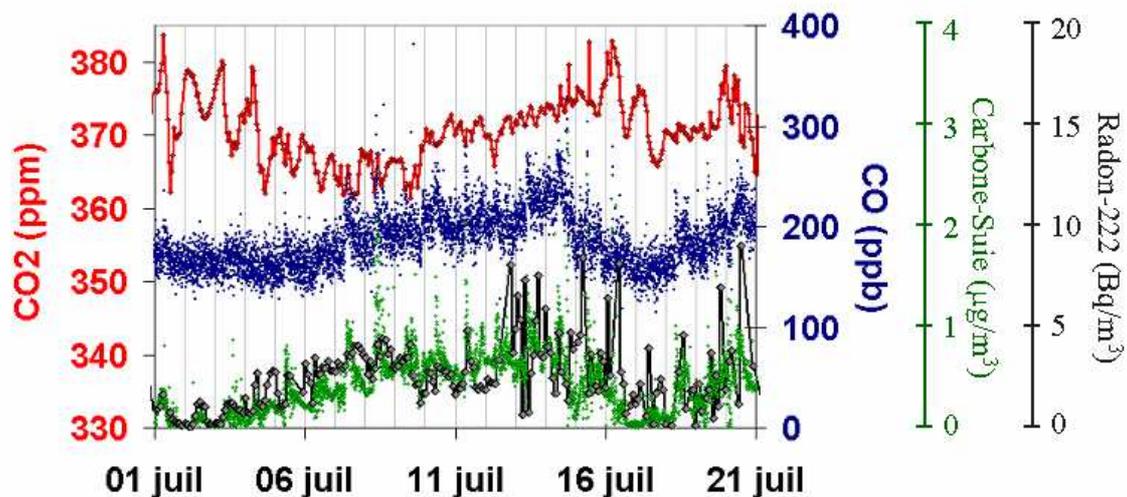


Figure 4.2.5: Haut : Suivi du  $\text{CO}_2$  (rouge),  $\text{CO}$  (bleu), carbone-suie (vert) et  $^{222}\text{Rn}$  (gris) à l'observatoire du Puy de Dôme en juillet 2003. Bas : Rétro-trajectoires à 5 jours (modèle Hysplit4/NOAA) pour 4 jours (0hrTU) en juillet 2003.

Ce réseau de mesure (observatoires de Mace-Head, Puy de Dôme et Saclay ; mesures aéroportées à Orléans ; et prélèvements discontinus au Pic du Midi et en Catalogne) sera complété dans les deux prochaines années par deux sites de mesure en continu sur deux hautes tours de télécommunication (Régions d'Orléans et Toulouse). Ces sites de mesure seront développés dans le cadre de projets européens (XIOTTO et CARBOEUROPE-IP). Le développement des sites de mesure en continu du  $\text{CO}_2$  atmosphérique en France va ainsi nous donner une opportunité unique de mettre en place une estimation des flux régionaux de carbone par l'approche atmosphérique.

### 4.3. Echelle régionale : vérification atmosphérique des cadastres des émissions de $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$ et $\text{SF}_6$ pour la région parisienne

#### Approche utilisée :

Le site de Gif sur Yvette, localisé au Sud Ouest de Paris (Figure 4.3.1), est sous le vent des émissions franciliennes pendant 20 à 30% du temps (vents de Nord-est). Notre objectif est de mesurer systématiquement l'accumulation nocturne des gaz traces dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA) lors d'épisodes de pollution détecté par les mesures de  $\text{CO}$ , afin de

quantifier les émissions anthropiques en Île-de-France. Dans cette approche, le  $^{222}\text{Rn}$  est utilisé comme un composé de référence dont la source continentale connue, est supposée homogène.

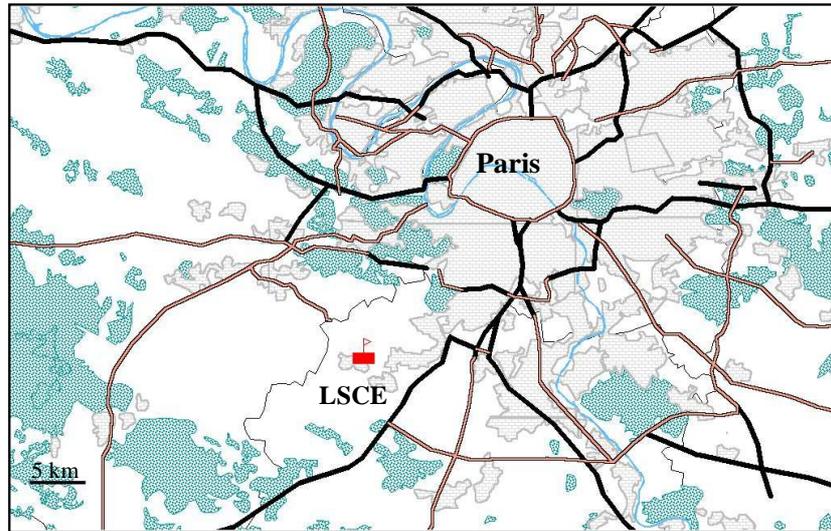


Figure 4.3.1. Carte de la région de Gif avec en noir les principales routes, en vert les zones forestières, et les gris les zones urbanisées.

Dans le cadre du projet CARBOCONTROLE, nous avons mis en place le suivi en continu du  $^{222}\text{Rn}$  et des principaux gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) à partir d'analyseurs déjà existants au LSCE (chromatographie en phase gazeuse pour le  $\text{CH}_4$  et  $\text{CO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}$  et spectrométrie alpha pour le  $^{222}\text{Rn}$ ). Nous avons installé une ligne de prélèvement de 12m afin d'échantillonner l'air ambiant. La programmation des séquences d'analyse du GC a permis d'alterner les mesures de gaz étalons, d'échantillons prélevés dans le cadre du réseau RAMCES, et l'air ambiant permettant un suivi semi-continu à Gif (Pépin et al., 2002). L'air ambiant est prélevé à un débit de  $5\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$  pour assurer un rinçage suffisant de la ligne de prélèvement. Toutes les 20min, un échantillon d'air ambiant est prélevé et séché dans un bain d'alcool refroidi à  $-60^\circ\text{C}$ . La reproductibilité des mesures est de  $\pm 0.045$  ppm pour le  $\text{CO}_2$ ,  $\pm 0.65$  ppb pour le  $\text{CH}_4$ , et  $\pm 0.40$  ppb pour le  $\text{N}_2\text{O}$ .

Nous avons étudié l'accumulation nocturne du Radon, du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$  et sélectionné les épisodes entre 6PM et 6AM. Si on assume que la hauteur de la couche de mélange ( $\bar{H}$ ) est constante durant cette période, on peut évaluer le taux d'augmentation des concentrations des gaz traces ( $\Delta C_x(t)/\Delta t$ ) par l'équation:

$$\frac{\Delta C_x(t)}{\Delta t} = \frac{\bar{j}_x}{\bar{H}} \quad (1a)$$

où  $\bar{j}_x$  représente le flux de surface de l'espèce x. Dans cette approche on considère comme négligeable l'intrusion d'air de la troposphère libre vers la couche de surface. Dans le cas du  $^{222}\text{Rn}$ , il faut prendre en compte la décroissance radioactive dans l'atmosphère:

$$\frac{\Delta C_x(t)}{\Delta t} = \frac{\bar{j}_x}{\bar{H}} - \lambda C_i(t) \quad (1b)$$

Sur la période de septembre à décembre 2001 nous avons systématiquement calculé les corrélations entre les accumulations nocturnes de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> avec celle du <sup>222</sup>Rn. Les évènements avec un facteur de corrélation (r<sup>2</sup>) inférieur à 0.5 ont été rejetés. Pour les périodes sélectionnées il est possible de s'affranchir de la hauteur de la couche de mélange qui est inconnue en faisant le rapport des équations 1a et 1b (considérant que  $\lambda C_{222} \ll \Delta C_{222}/\Delta t$ ):

$$\bar{j}_x = \bar{j}_{222} \frac{\Delta C_x}{\Delta C_{222}} \left( 1 - \frac{\lambda_{222} C_{222}}{\Delta C_{222}/\Delta t} \right) \quad (2)$$

Ceci nous permet d'estimer les flux de CO<sub>2</sub> moyennant la connaissance des flux de radon. Le flux moyen de Radon pour la France est estimé à 76.5 Bq.m<sup>-3</sup> [Eckhardt, 1990]. Le facteur de correction qui prend en compte la décroissance radioactive du Radon (le terme entre parenthèse dans l'équation 2) correspond à une réduction des flux estimés de l'ordre de 3% [Schmidt et al., 2001].

### Résultats :

Les flux de CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> estimés pour les évènements sélectionnés entre septembre et décembre 2001 sont résumés dans le tableau 4.3.1 et la figure 4.3.2

June 2002

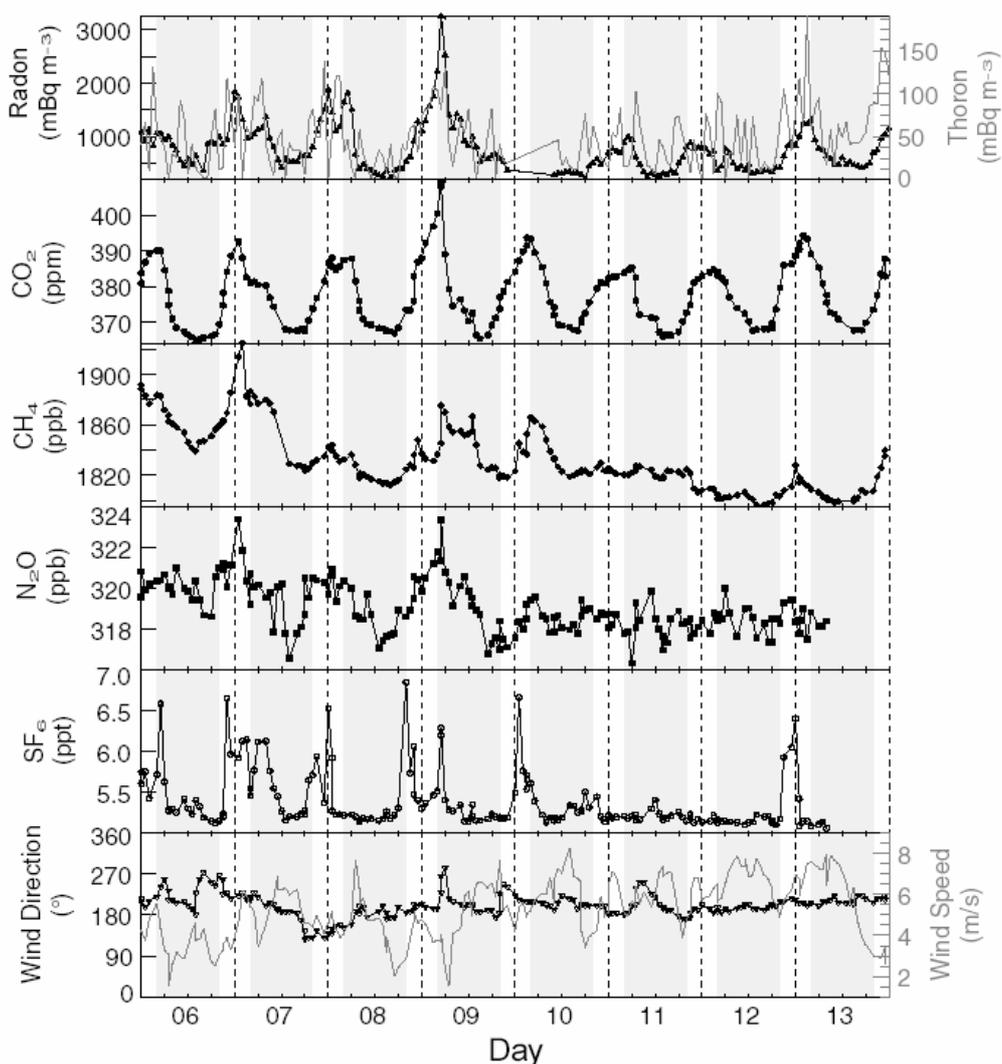


Figure 4.3.2: Suivi du CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub> et <sup>222</sup>Rn à Gif en juin 2002

Table 4.3.1. Estimation des flux d'Île-de-France à partir de l'Observatoire de Gif

Gaz	Gif	France CITEPA 2000	GIF	Île-de-France CITEPA 1995
CO <sub>2</sub>	110±20	20	306±27	105
CH <sub>4</sub>	1.3±0.25	0.5	1.4±0.25	1.2
N <sub>2</sub> O (*10 <sup>3</sup> )	85±22	38	115±28	55
SF <sub>6</sub> (*10 <sup>3</sup> )	0.025±0.01	0.01	0.27±0.08	-

Flux: gC/m<sup>2</sup>/mois (CO<sub>2</sub>) or gX/m<sup>2</sup>/mois (gaz X) ; Moyennes annuelles (sep. 01 – aug. 02)  
 Les résultats obtenus par la méthode Radon peuvent être comparés avec les cadastres des

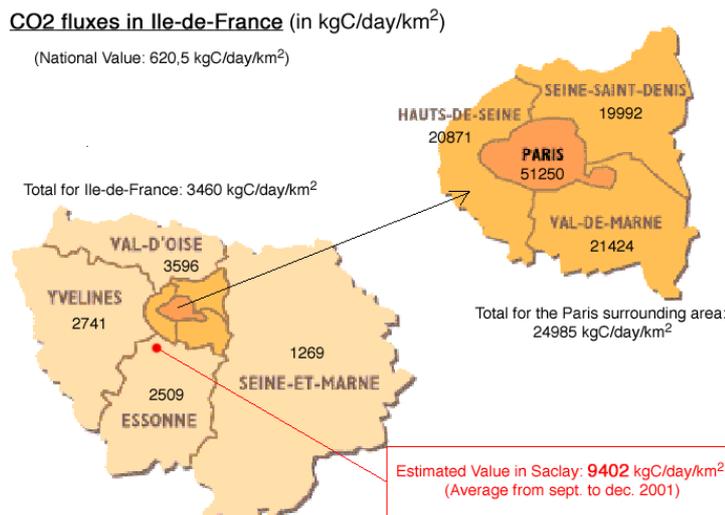
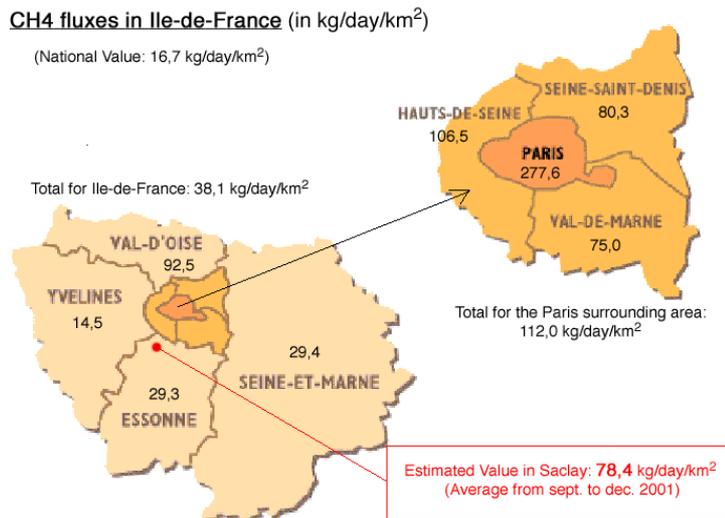


Figure 4.3.3: Cadastres d'émission du CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> en Île-de-France (source: CITEPA).

sources en région Ile de France. Nous avons utilisés pour cette comparaison les émissions estimées en moyenne annuelle pour l'année 1995 par le CITEPA (Figure 4.3.3). Il ressort de cette comparaison que les estimations de flux faites pour la période sep/dec 2001 à partir des mesures de Gif sont supérieures d'un facteur 2 et 4 à la moyenne de l'Île-de-France respectivement pour le CH<sub>4</sub> et le CO<sub>2</sub>. Cependant, les cadastres du CITEPA indiquent des flux nettement plus importants dans la partie de l'Île-de-France, qui est la principale zone d'influence pour les évènements analysés à Gif pour lesquels le vent était quasi systématiquement du Nord/Est (Figure 4.3.4). La valeur des flux mesurée à Gif est intermédiaire avec celle donnée par les cadastres de Paris et de l'Essonne.

Afin de mieux appréhender la contribution du CO<sub>2</sub> anthropique, nous avons procédé à une série d'expériences en région parisienne entre 2000 et 2003. Nous tentons d'utiliser le CO comme marqueur de cette source de CO<sub>2</sub> en caractérisant le rapport CO/CO<sub>2</sub>.

Ce ratio a progressé  $1.1 \cdot 10^{-3} \pm 0.3$  (pour les sites ruraux) jusqu'à  $6.6 \cdot 10^{-3} \pm 2.1$  dans le centre de Paris. Des valeurs bien plus élevées ont été déterminées dans des aires bien particulières, tels les tunnels du périphérique parisien. Les régressions CO/CO<sub>2</sub> nous ont permis de classer les ratio CO/CO<sub>2</sub> en trois catégories : une classe A influencée par les flux biogéniques, une classe B dominée par les émissions des transports routiers et une classe C qui représente les émissions globales en région parisienne. Ainsi, le ratio CO/CO<sub>2</sub> pourra être utilisé à l'avenir pour déconvoluer les mesures du CO<sub>2</sub> atmosphériques effectuées à Gif.

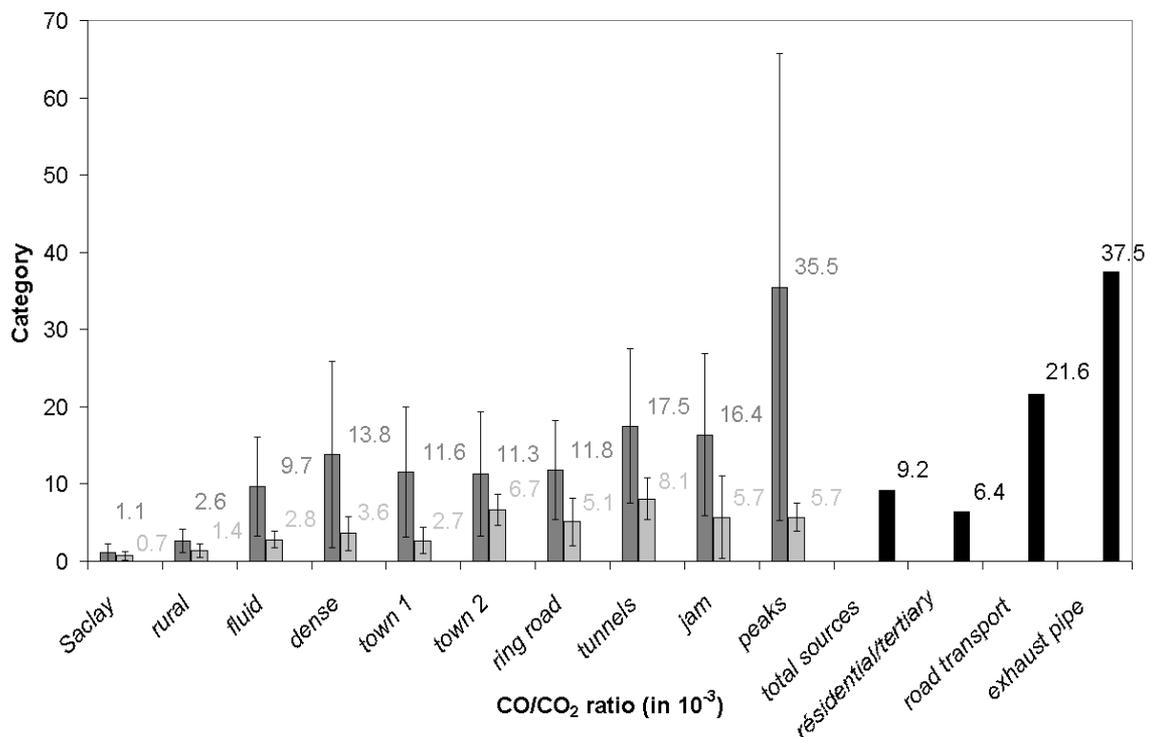


Figure 4.3.4 : Comparaison des ratios CO/CO<sub>2</sub> avec les inventaires d'émission (en gris clair, le ratio atmosphérique, en gris foncé le ratio des émissions issu des mesures et en noir le ratio issu des inventaires d'AIRPARIF).

## 4.4 Modélisation des flux et des stocks de carbone nationaux avec le modèle biogéochimique ORCHIDEE

### 4.4.1 Amélioration des paramètres de forçages

#### *Données climatiques :*

Dans le cadre du projet Européen ATEAM il a été possible de récupérer un jeu de données climatiques mensuelle sur l'ensemble du 20ème siècle sur une partie de l'Europe des 15 (qui inclus la France) à une résolution de 10'x10' (soit environ 400km<sup>2</sup>). Ce jeu de données a été réalisé en combinant une climatologie sur 30 ans à 10' réalisée par W. Cramer en compilant des données de stations, avec les données globales du CRU sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle à la résolution du 1/2 degré réalisé. Ces données représentent une résolution 6 fois supérieure aux données de ré-analyses du centre européen dont nous disposions jusqu'alors. Grâce à leur résolution, ces données permettent de résoudre de façon beaucoup plus fine la variabilité spatiale du climat liée en particulier à l'orographie qui est évidemment un facteur très important sur la France. En revanche, ces données ne sont disponible que mensuellement. Nous avons alors combinées ces données avec les ré-analyses ERA15 dont nous disposions (qui sont elle disponibles toutes les 6h) afin de restituer une pseudo variabilité journalière.

#### *Carte de Couverture végétale :*

Dans le cadre de ce projet nous avons acquis la carte de couverture végétale CORINE land-cover. Cette carte réalisée dans le cadre d'un projet Européen à partir de photo interprétation d'images Landsat et Spot offre une couverture à une résolution de 250m avec une précision inégalée jusqu'à ce jour. A partir de cette carte digitale, nous avons réalisé une table de correspondance entre les 40 classes de végétation initialement présente dans la carte et les 13 PFT's d'ORCHIDEE. Ces données initialement en projection Lambert on été projetées sur la grille des données climatiques 10' en calculant la proportion de chaque PFT dans chaque point de grille. A titre d'exemple, la figure 4.4.1 montre pour chaque point de grille le PFT majoritaire.

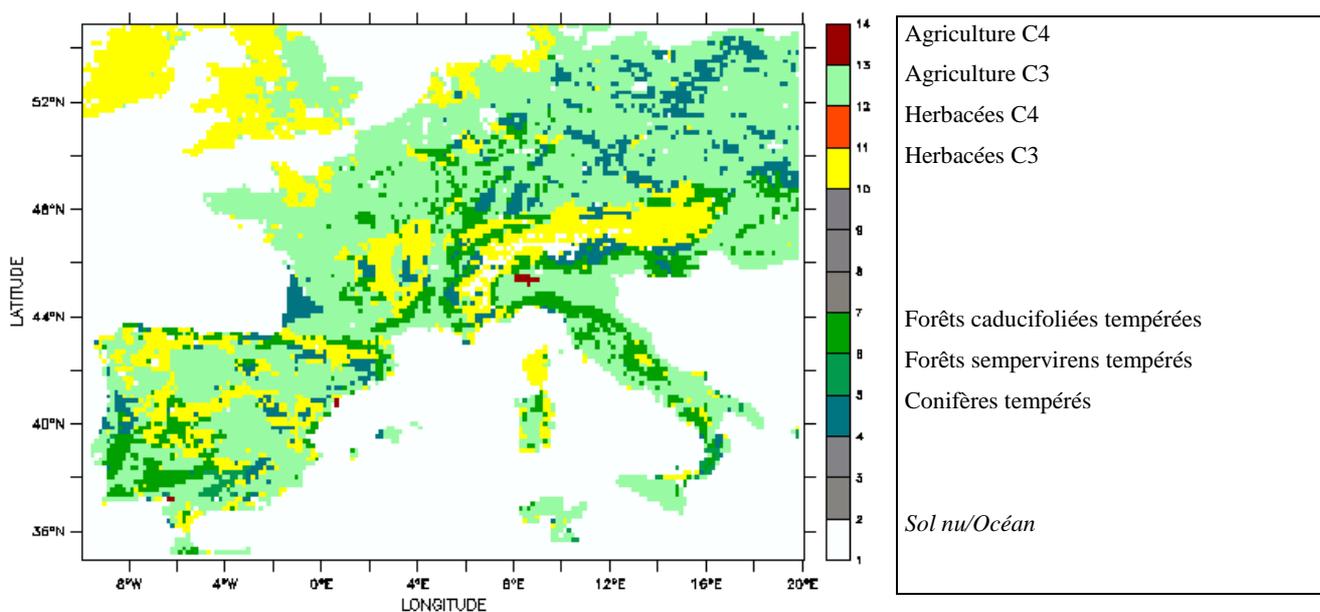


Figure 4.4.1 - PFT dominants obtenus à partir de la carte CORINE land cover

La Figure 4.4.2 montre une comparaison de la production primaire annuelle climatologique simulée par ORCHIDEE avec le forçage initial (carte IGBP et données climatiques ECMWF à 1°) et la simulation obtenue avec les nouvelles données de forçage. Cette comparaison montre tout d'abord l'apport de l'utilisation de données climatiques haute résolution qui permet une prédiction beaucoup plus précise de la production en particulier dans les zones de relief. Ensuite, on note l'apport de la nouvelle carte de végétation qui fournit une description beaucoup plus précise de la végétation (en particulier au niveau de la séparation entre cultures et prairies ou forêts) qui conduisent à un changement notable sur la production estimée.

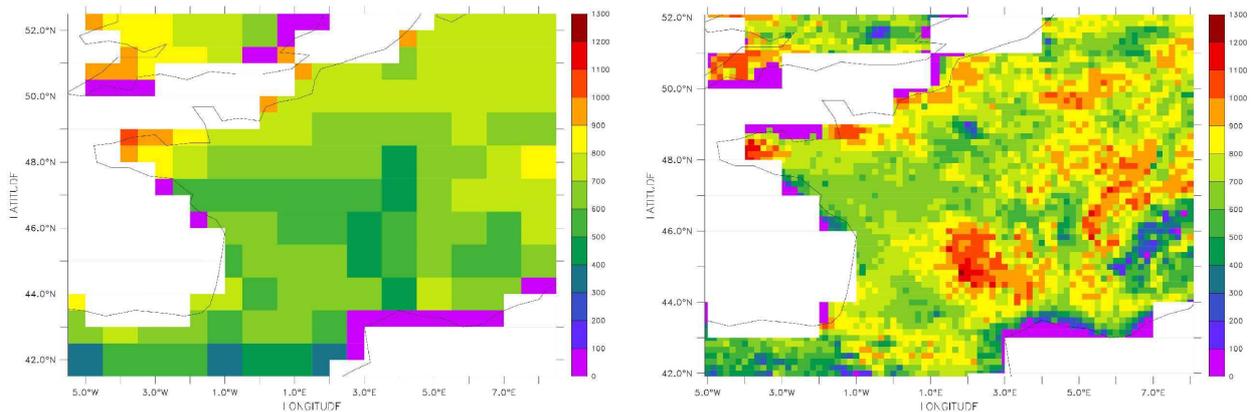


Figure 4.4.2 : Production primaire nette annuelle simulée par ORCHIDEE avec le forçage à 1° et la carte IGBP (à gauche) et avec le forçage 10' et la carte CORINE (à droite).

#### 4.4.2 Simulation des flux interannuels de CO<sub>2</sub> sur le 20<sup>ème</sup> siècle avec ORCHIDEE

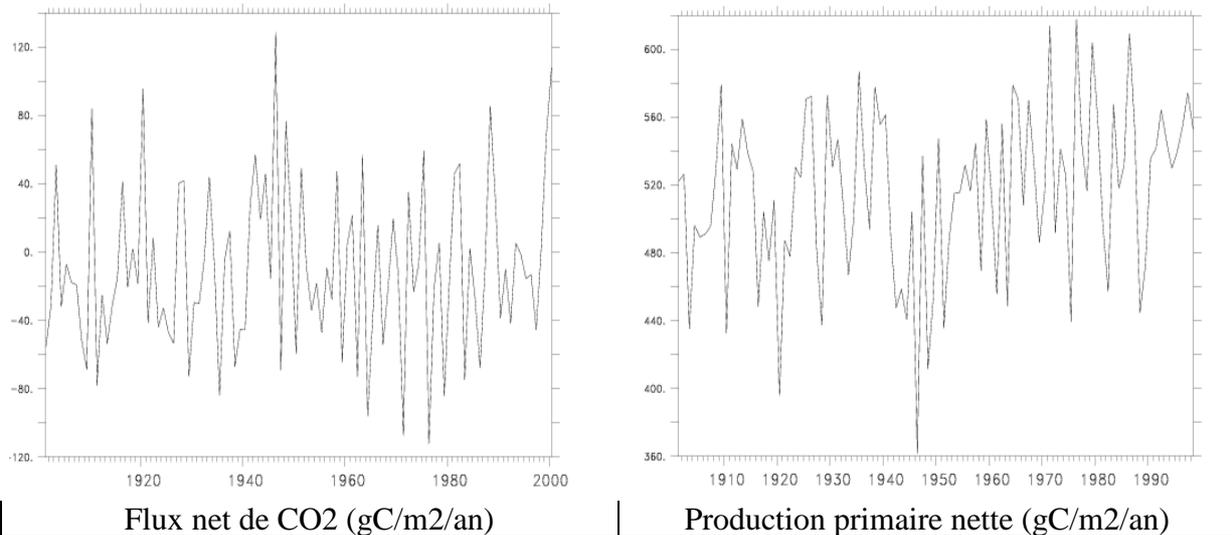
A partir des nouveaux champs décrits dans le chapitre précédent, nous avons réalisés une première simulation des flux de CO<sub>2</sub> interannuels sur l'Europe avec la Version actuelle du modèle ORCHIDEE. La mise à l'équilibre du modèle a été faite de la manière suivante :

- 1/ première simulation de 200 ans sur la première année de données (1860) pour atteindre un état d'équilibre stationnaire de la biomasse.
- 2/ simulation de 80 ans en bouclant deux fois sur les données des 40 premières années (1860-1900) pour obtenir un pseudo équilibre avec les données interannuelles.

A partir de l'état d'équilibre obtenu, la simulation d'un siècle (1901-2000) a été effectuée. La figure 4.4.3 montre la variation interannuelle du flux net de CO<sub>2</sub> moyen et de la production primaire nette. Un flux net négatif représente un puits biosphérique, à l'inverse une valeur positive une source. On note tout d'abord la forte variabilité interannuelle à haute fréquence. On peut noter également qu'aucune tendance n'est réellement visible avant 1940. En revanche une légère tendance est visible après cette période ou l'on observe un accroissement de la production primaire. Des années exceptionnelles chaudes et sèches comme 1947 ou 1976 apparaissent très clairement comme étant très faiblement productives. A titre d'illustration, la figure 4.4.4 montre la production primaire nette pendant les 3 mois d'été (Juin, Juillet, Août) pour les années 1976 et 1977 ainsi que la différence entre celles-ci. La grande sécheresse de 1976 est resté dans la mémoire de tous et on voit ici que le modèle reproduit bien la situation dramatique en terme de production végétale de cette année en comparaison de l'année suivante qui au contraire avait été plutôt bonne. Dans la différence, entre les deux années, les zones en rouge indiquent un déficit de production en 1976.

Notons aussi que l'année 1947 apparaît comme la moins productive du siècle. Ceci n'est pas le cas pour l'année 1976 dont la productivité estimée n'est pas beaucoup plus faible que celle

correspondant à d'autres années (comme 1986) également chaudes mais moins exceptionnelles. Ce phénomène s'explique lorsque l'on étudie la variabilité spatiale de la production primaire. La valeur représentée est en effet une moyenne sur l'ensemble de l'Europe. Or l'on peut noter que la réduction de la production en 1976 est surtout visible dans le nord de l'Europe alors qu'en 1947 le phénomène est beaucoup plus global.



*Figure 4.4.3: Variation interannuel du flux net de CO2 et de la production primaire moyen sur l'Europe*

#### *4.4.3 Validation / calibration d'ORCHIDEE à l'aide de mesures ponctuelles et de modèles locaux.*

Dans le cadre du projet CARBO-CONTROLE en 2001, nous avons mis l'accent sur la prise en compte des zones agricoles dans le modèle ORCHIDEE. Ce choix résulte d'une priorité scientifique car ce sont avant tout les cultures qui sont prises en compte de la manière la moins réaliste dans ORCHIDEE.

Pour ce faire, en collaboration avec l'INRA d'Avignon et l'équipe de Bernard Seguin, nous avons entamé une comparaison détaillée et quantitative des résultats du modèle générique ORCHIDEE avec ceux du modèle STICS (spécialisé cultures) pour les zones agricoles. Le modèle STICS développé par l'INRA a pour vocation primaire d'estimer le rendement de différents types de culture. Il offre l'avantage sur ORCHIDEE pour les zones cultivées de simuler de façon beaucoup plus réaliste le fonctionnement des cultures et prend en compte l'itinéraire technique de la culture (dates de semis, fertilisation, irrigation) ce que ne permet pas ORCHIDEE. Si ce modèle a été conçu pour travailler à l'échelle de la parcelle, il est en revanche générique et permet de simuler la majorité des types de cultures présents en France. Il apparaît donc bien adapté à une généralisation à l'échelle nationale. Il ne calcule pas en revanche directement les flux de carbone. Notre objectif à terme est donc de définir un modèle hybride entre ORCHIDEE et STICS. La stratégie adoptée est de chercher à rester le plus près possible des processus d'ORCHIDEE afin d'avoir le maximum de cohérence avec les flux simulés pour les autres écosystèmes. D'un point de vue technique, de par la complexité du modèle STICS et afin de pouvoir suivre les évolutions futures de STICS, plutôt que de chercher à intégrer STICS au code d'ORCHIDEE, il a été décidé d'effectuer un couplage des deux modèles (les deux modèles fonctionnent en parallèle en s'échangeant un ensemble de variables à chaque pas de temps).

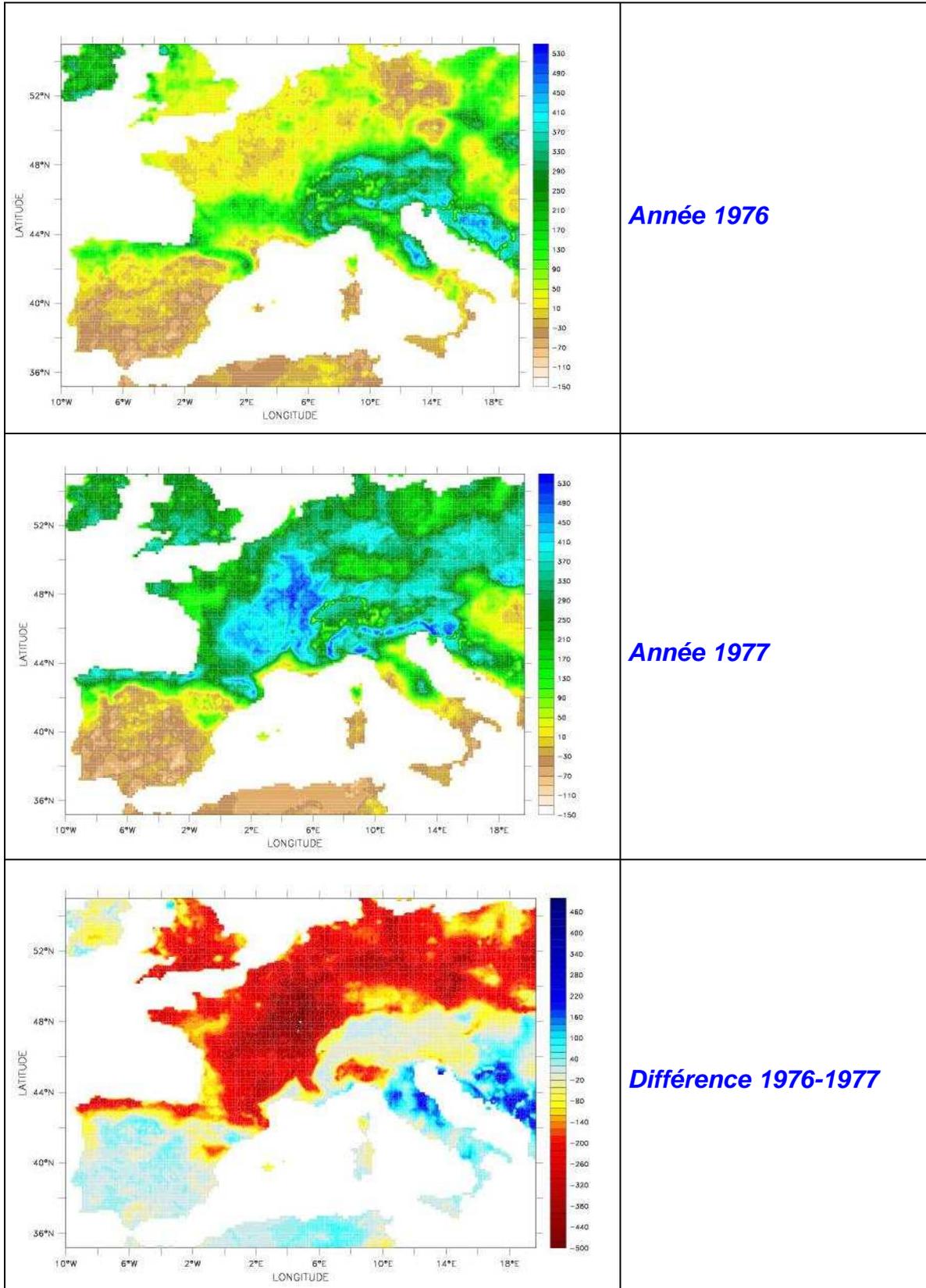


Figure 4.4.4: Production primaire nette pour les 3 mois d'été (Juin Juillet Aout) (gC/m<sup>2</sup>/ 3mois) en 1976 et 1977 et différence entre les 2 années.

Nous avons dans un premier temps réalisé des simulations sur sites (culture de blé et de maïs) ou nous disposions de mesures in-situ (LAI et biomasse) forcés par les mêmes champs météorologiques. La figure 4.4.5 montre le LAI et la biomasse simulée par les deux modèles pour une culture de blé comparée aux observations.

Comme on pouvait s'y attendre, le modèle ORCHIDEE donne de mauvais résultats par comparaison à STICS. On note principalement la différence d'évolution du LAI. ORCHIDEE simule les cultures comme des prairies naturelles ce qui conduit à un cycle végétatif très long et un LAI assez faible alors que sur une culture de blé d'hiver le cycle est très court et très intense. Au vu de ces résultats, il apparaît illusoire d'espérer pouvoir simuler le LAI correctement en calibrant les paramètres d'ORCHIDEE. Il a donc été décidé de forcer le LAI d'ORCHIDEE avec les sorties de STICS. De même le profil racinaire simulé par STICS est beaucoup plus complexe que celui d'ORCHIDEE qui est une simple exponentielle, les racines dans STICS descendant beaucoup plus profondément dans le sol. Ceci conduit à une sous estimation du flux de transpiration dans ORCHIDEE, et l'on a donc décidé également de forcer le profil racinaire d'ORCHIDEE. Enfin, la hauteur des cultures dans ORCHIDEE est également nettement plus faible que celle de STICS ce qui joue fortement sur la rugosité de surface, cette hauteur sera donc également forcée par STICS.

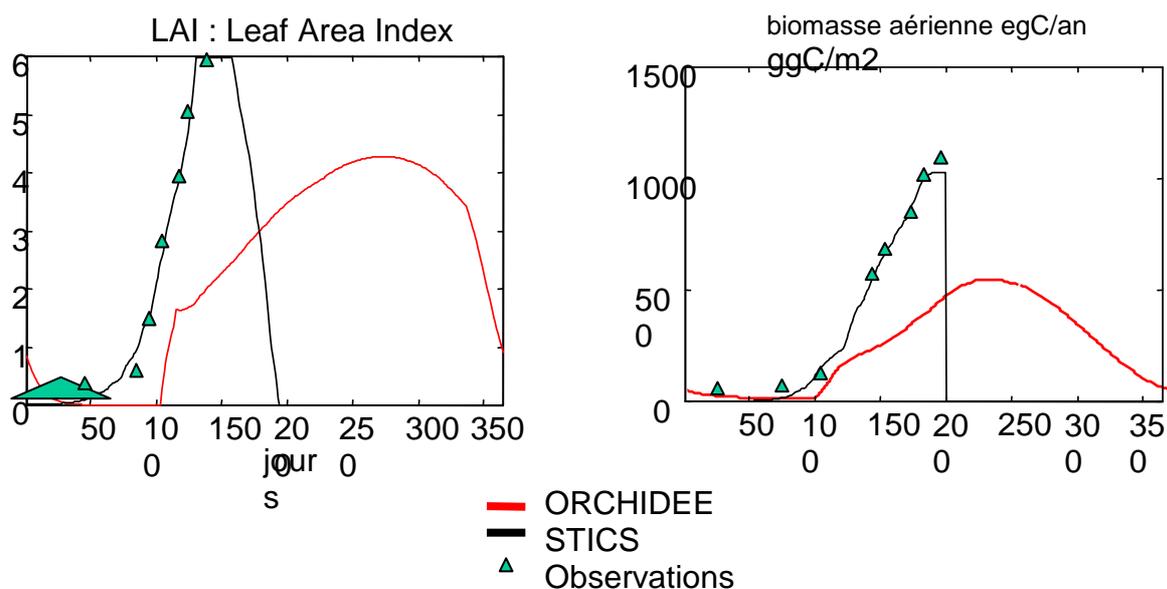


Figure 4.4.5: Indice foliaire et biomasse aérienne (gC/an) simulée par les deux modèles comparés aux observations.

Par contre, comme précisé plus haut nous avons cherché à garder les autres paramètres d'ORCHIDEE à leur valeur initiale. L'objectif était alors de voir si en calibrant les paramètres d'ORCHIDEE pour les processus comme la photosynthèse ou le bilan d'eau il était possible de simuler correctement les variables comme la biomasse ou la transpiration. La figure 4.4.6 montre la biomasse totale et l'évapotranspiration simulées par STICS et le modèle hybride STICS/ORCHIDEE (i.e ORCHIDEE forcé en LAI, profil racinaire et hauteur de végétation et recalibré) pour une culture de blé et de maïs. Nous voyons donc maintenant que pour 2 cultures contrastées, on obtient des simulations tout à fait correctes avec notre modèle hybride.

L'ensemble des sites étudiés précédemment représentait des cultures bien fertilisées donc sans carences azotées. Une comparaison a donc été effectuée sur un site non fertilisé. La figure 4.4.7 montre à nouveau la biomasse simulée par STICS et le modèle hybride. Dans ce cas le modèle hybride surestime fortement la biomasse car ne simule pas le cycle de l'azote contrairement à STICS.

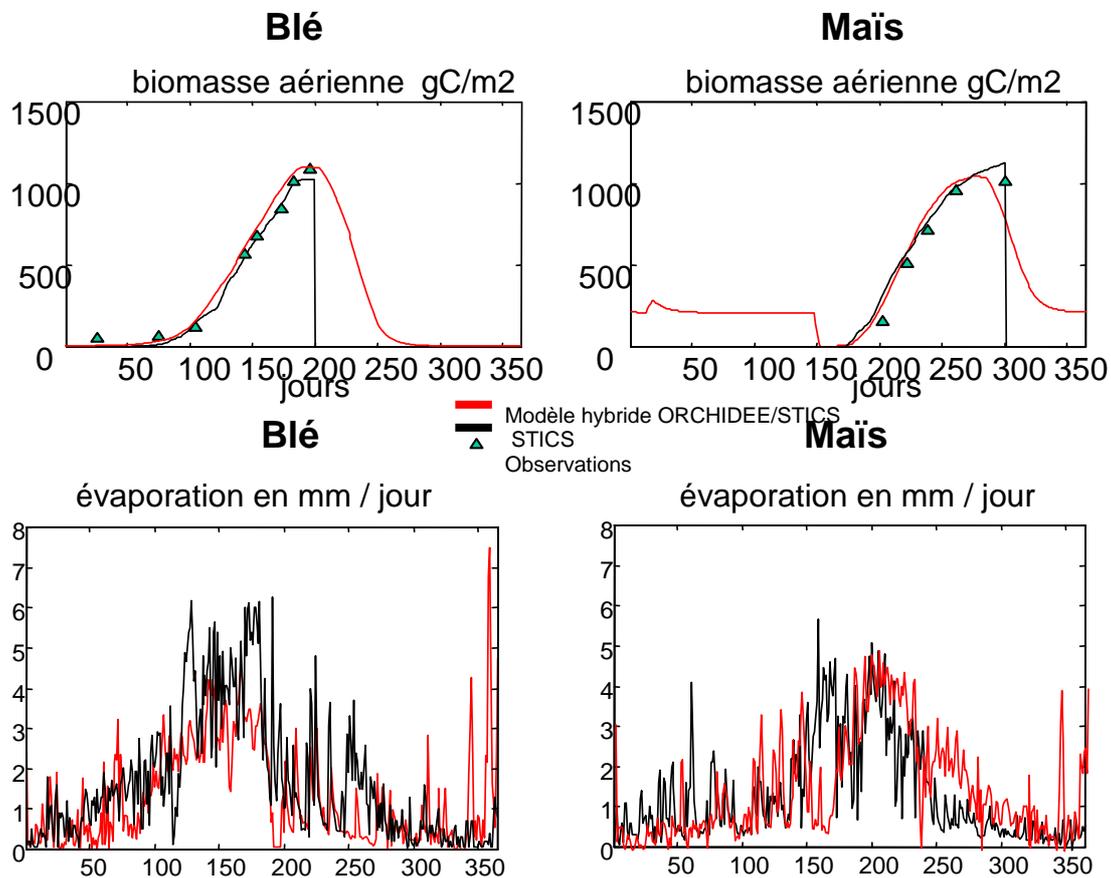


Figure 4.4.6: biomasse et évapotranspiration simulée par STICS et le modèle hybride pour un site de blé et de maïs.

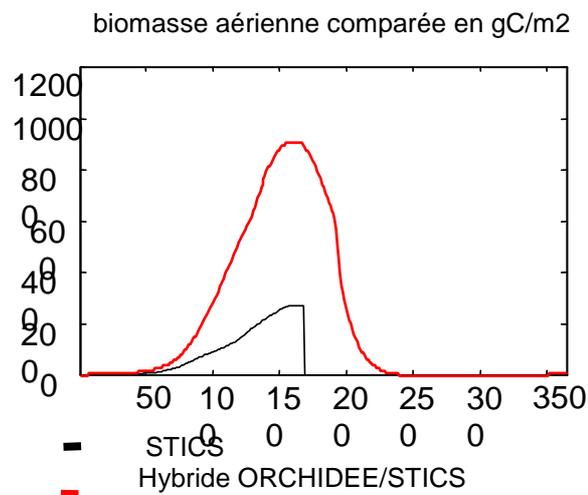


Figure 4.4.7 : comparaison STICS et modèle hybride sur un site de culture non fertilisé.

STICS simule un stress azoté au cours de la saison de croissance, une variable qui a été utilisée comme facteur réducteur de la photosynthèse dans le modèle hybride. La figure 4.4.8 montre le résultat de la simulation dans le cas où ce stress est pris en compte dans le modèle hybride : nous parvenons alors correctement à simuler la biomasse pour une culture non fertilisée.

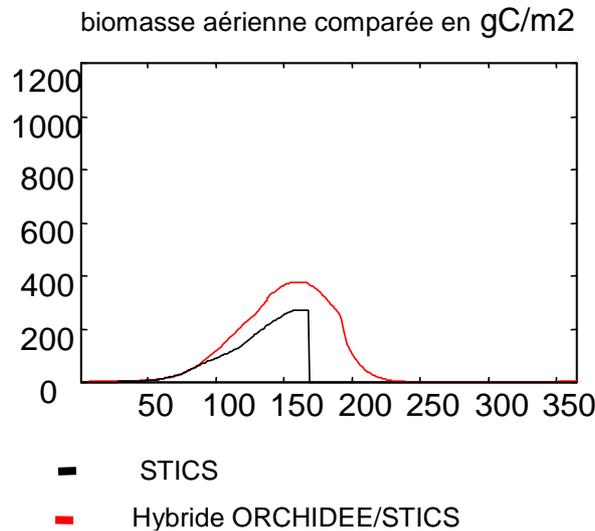


Figure 4.4.8: Comparaison STICS et modèle hybride sur le site non fertilisé après prise en compte du stress azoté.

#### **Application préliminaire de ORCHIDEE/STICS à l'ensemble de l'Europe :**

Une fois le modèle hybride ORCHIDEE/STICS mis au point, un ensemble de simulations sur l'Europe et pour le 20<sup>ème</sup> siècle a été réalisé (travail très récent) en se focalisant bien évidemment sur les cultures. Il s'agissait d'évaluer l'impact de trois paramètres fondamentaux qui ont évolué au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, sur la production des cultures et ainsi leur rôle sur le cycle du carbone : le climat, la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et les pratiques culturales. 3 simulations ont ainsi été réalisées :

1. La première en gardant un climat constant en ne faisant varier que la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Le climat et les pratiques culturales sont celles de l'année 2000.
2. La seconde en faisant varier le CO<sub>2</sub> et le climat, les pratiques culturales étant toujours celle de 2000.
3. La troisième en faisant varier le CO<sub>2</sub>, le climat et les pratiques culturale.

Pour cette dernière simulation, il a été nécessaire de définir un scénario d'évolution des pratiques culturales. Il n'existe malheureusement que peu d'information sur l'évolution de ces pratiques au cours du siècle, nous avons donc dû construire un scénario théorique réaliste et appliqué de façon similaire à l'ensemble de l'Europe en se basant sur l'expertise de l'INRA. Pour ce faire nous avons choisis les conditions suivantes : avant 1960, les pratiques sont considérées comme constantes sachant que ces dernières ont fortement évolué essentiellement après cette date. On considère alors avant 1960 l'application d'une quantité constante d'engrais organique sans irrigation. Après cette date, l'engrais devient inorganique et augmente de façon constante ainsi que l'irrigation. On considère également un changement de type de semences après 1980. Enfin, tout au long du siècle on considère un accroissement de l'allocation de la production de biomasse vers les grains (et donc l'export de biomasse) pour refléter l'amélioration de sélection des semences.

La figure 4.4.9 montre l'évolution de la production des cultures de blé pour les 3 scénarios. On note pour le scénario CO<sub>2</sub> seul un léger accroissement de la productivité lié à l'effet de fertilisation du CO<sub>2</sub>. Pour le second scénario (CO<sub>2</sub>+climat), hormis l'introduction d'une forte variabilité interannuelle liée à celle du climat, on note peu de changements et la tendance à long terme est similaire à celle liée au cas CO<sub>2</sub> seul. L'effet notamment de l'accroissement de température semble avoir eu peu d'impact sur la productivité. On retrouve ainsi les résultats très similaires à ceux obtenus précédemment sur l'ensemble des écosystèmes à l'aide du modèle ORCHIDEE standard.

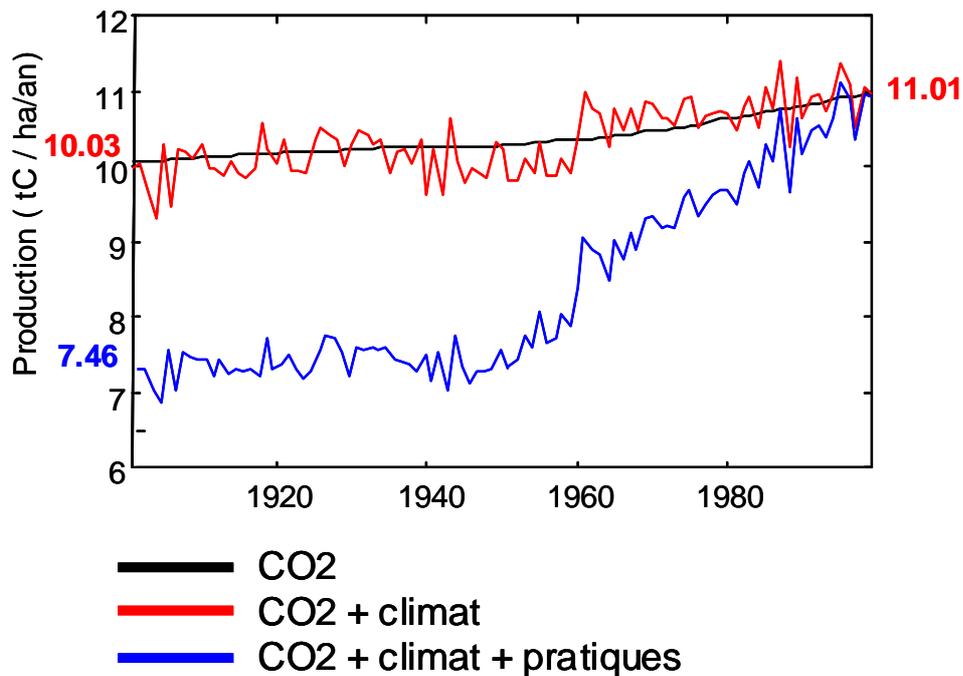


Figure 4.4.9: Evolution de la production du blé pour les 3 scénarios (CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>+climat, CO<sub>2</sub>+climat+pratiques)

Dans le 3<sup>ème</sup> scénario (CO<sub>2</sub>+climat+pratique culturale) on note une très forte augmentation de la productivité sur le siècle qui atteint presque un doublement. La figure 4.4.10 montre l'évolution des rendements agricoles obtenus à partir de statistiques de la FAO, statistiques qui reflètent une évolution très similaire à celle simulée par le modèle et valide ainsi notre approche. On constate donc que la plus grande variabilité de productivité sur le siècle sur les cultures est liée à l'évolution des pratiques culturales.

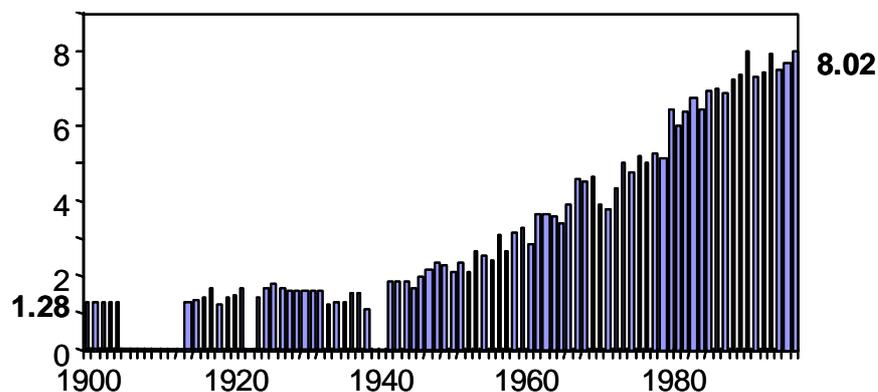


Figure 4.4.10: Rendement moyen du blé (source FAO)

## 5- Conclusion et perspectives

### 5.1. Modélisation inverse atmosphérique

Les objectifs initiaux du projet, à savoir une synthèse des connaissances sur les inversions de flux de CO<sub>2</sub> et leurs incertitudes ainsi qu'un diagnostic des sources et puits de carbone pour l'Europe en utilisant de nouvelles mesures continentales et différents schémas de transport atmosphérique, ont été largement réalisés.

Nous avons montré qu'avec les données mensuelles du réseau global de stations de mesure du CO<sub>2</sub>, il est certes possible d'obtenir une estimation des flux Européens, mais que les erreurs liées au manque de stations continentales sont de l'ordre de grandeur de la moyenne des flux. Nous avons de plus quantifié la part relative 1) des erreurs sur le transport, 2) du choix du type de discrétisation spatiale et temporelle dans le schéma inverse, ainsi que 3) des erreurs d'observation, dans l'incertitude estimée par la procédure inverse. Ces différents résultats sont détaillés dans un article (Peylin et al. [2002]).

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé un ensemble de simulations inverses nouvelles basées sur l'utilisation de modèles de transport atmosphérique à résolution spatiale plus fine sur l'Europe. Dans ce sens nous avons utilisé des modèles à domaine limité, centrés sur l'Europe de l'Ouest. Si l'ensemble des modèles estiment un puits de carbone sur l'Europe d'environ 0.5-0.7 GtC par an, la répartition spatiale reste très incertaine et dépendante des stations de mesures utilisées. Nous avons obtenu un puits de carbone marqué pour l'Europe de l'Ouest alors que l'Europe de l'Est est plus neutre. Ce résultat reste très préliminaire et il convient de l'affiner en utilisant un plus grand nombre de mesures atmosphériques ainsi qu'en améliorant le transport vertical dans les modèles, paramètre essentiel pour bien représenter les stations continentales proches des sources et puits de carbone.

Finalement, pour aller plus loin, nous avons montré qu'il est nécessaire de disposer de mesures en continu du CO<sub>2</sub>, comme pour la station que nous avons installé au Puy de Dôme. En effet, les mesures continues contiennent une information synoptique sur le transport et les puits et sources régionaux. Cette information est détectable avec plus de précision parce que le transport atmosphérique est moins diffusif sur les échelles synoptiques que sur les échelles mensuelles et au delà. En Europe, il existe maintenant plus de 10 stations en continu, ce qui permet de contraindre le problème de l'inversion des sources et puits de CO<sub>2</sub>. En revanche, l'utilisation des mesures continues requiert des modèles à plus haute résolution et une discrétisation en régions (et en temps) plus fine que les grandes régions couramment utilisées. Nous avons commencé à utiliser le modèle LMDz avec un zoom sur l'Europe de l'Ouest correspondant à une maille de moins de 100km. Dans ce contexte, nous avons mis au point une nouvelle approche inverse permettant d'estimer les flux de CO<sub>2</sub> pour toutes les mailles du modèle de transport et pour un pas de temps journalier, en utilisant donc des moyennes journalières des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>. De plus nous avons utilisé le principe de réversibilité du transport atmosphérique (équivalent à l'adjoint du modèle) pour déterminer l'influence de chaque maille du modèle sur les concentrations aux stations. Cette nouvelle approche inverse à haute résolution devrait déboucher sur une estimation des flux compatible avec les frontières de chaque pays en Europe de l'Ouest.

Ainsi, de nombreux progrès sont encore possibles quant à l'application des méthodes inverses pour mieux contraindre les flux de CO<sub>2</sub> Européens et Nationaux. Il conviendra en effet :

- d'intensifier le réseau de mesure en continu à la surface et en altitude (vol avions) du CO<sub>2</sub> pour la France et l'Europe en général.
- de raffiner les paramétrisations du transport atmosphérique, notamment du mélange vertical (convection/diffusion turbulente), afin de mieux représenter le cycle diurne des concentrations dans la couche limite atmosphérique.
- d'inclure de nouvelles contraintes additionnelles sous forme de structure spatiale et temporelle des flux a priori de carbone, issues de simulations les plus réalistes possibles avec un modèle biogéochimique tel qu'ORCHIDEE.

## **5.2. Modélisation des flux et des stocks de carbone nationaux avec le modèle biogéochimique ORCHIDEE**

L'essentiel des objectifs que l'on s'étaient fixés dans le cadre du projet on été réalisés à savoir :

- fournir une première estimation des stocks et flux de carbone à l'échelle de l'Europe grâce à un modèle de processus.
- travailler d'une part sur l'amélioration du modèle ORCHIDEE et sur les données de forçage pour affiner les prédictions.

Sur certains points il a même été possible d'aller plus loin que les objectifs initiaux, prévoyant seulement des simulations européennes à une échelle du degré sur la période couverte par les ré-analyses ERA15 (1982-1993). Or il a été possible de réaliser des simulations sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle et à une résolution beaucoup plus fine (10').

Au bilan la constitution d'un nouveau jeu de donnée à haute précision sur l'Europe a pu être réalisé. Il permet d'une part une représentation beaucoup plus réaliste de la couverture végétale et d'autre part par une meilleure résolution des variables climatiques, une meilleure représentation de la variabilité spatiale climatique en particulier liée à l'orographie. Ce nouveau jeu de données à permis d'anticiper l'étude de la variabilité interannuelle des flux de CO<sub>2</sub> étude qui a pu être réalisé sur ce jeu de données climatiques.

Une première simulation à l'échelle de 10' a pu être réalisée sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette simulation montre la forte variabilité interannuelle de la production végétale liée au climat. On remarque également que l'on reproduit correctement le changement de productivité liée aux évènements extrême comme les sécheresses de 1947 et 1976 en pouvant de plus évaluer leur impact régional. Dans le cadre de ce projet, il a également été possible de développer un nouveau modèle hybride ORCHIDEE/STICS qui permet une représentation beaucoup plus réaliste des cultures et qui permet, en plus, de prendre en compte les pratiques agricoles. Une première simulation réalisée sur le 20<sup>ème</sup> siècle montre la prépondérance des changements des pratiques culturelles sur la production des cultures en Europe. Sachant que les cultures représentent 30% de la surface totale de l'Europe, cette étude met en évidence la nécessité de prendre en compte les pratiques culturelles si l'on veut reproduire correctement le cycle du carbone. Il est à noter que cette étude a pu être réalisée grâce au prolongement du projet de 6 mois, les simulations nécessitant l'utilisation du nouveau supercalculateur du CEA mis en place en octobre.

Les perspectives de cette étude sont évidemment nombreuses. Les simulations obtenues reste préliminaires et nécessite d'être poursuivi. Différents axes sont envisageables :

- De nouveau jeux de données devraient être disponibles prochainement permettant d'affiner encore les prédictions du modèle. En particulier Météo France a développé

au niveau français un jeu de données climatique à très haute résolution (8km au lieu des 20km actuel) de données journalières (et non plus mensuelles) ce qui offre un forçage climatique beaucoup plus réaliste. De même au niveau couvert végétal, les cartes actuelles ne distinguent qu'un type « terre arable » qui ne permet pas de différencier les type de cultures ce qui devient nécessaire avec le nouveau modèle ORCHIDEE/STICS. De même il est important d'affiner la définition des pratiques culturales en particulier en définissant des statistiques régionalisées (les pratiques culturales étaient dans cette étude supposée constantes sur tout le territoire).

- Une validation accrue des résultats notamment grâce au réseau de tour de flux est nécessaire. La limitation actuelle de ce type de validation était liée au fait que le forçage climatique restait à une échelle très grossière comparée aux « footprint » des tours de flux qui sont typiquement de quelques kilomètres. La résolution des nouveaux jeux de données devient maintenant compatible avec ce type de donnée. A ce titre l'étude de l'année 2003 sera extrêmement intéressante puisque qu'elle représente une année de forte sécheresse et probablement assez représentative des étés futurs. Or on a vu que le modèle ORCHIDEE reproduit a priori assez bien ce type de situation pour les années comme 1976 ou 1947 mais il n'y avait pas à l'époque de mesures (soit terrain soit satellite) pour valider le modèle.
- L'intercomparaison de différents modèles biosphérique pour les simulations sur la France serait également intéressante car il est difficile d'évaluer l'erreur liée à un modèle comme ORCHIDEE. Un ensemble de simulation permet dans une certaine mesure d'obtenir une barre d'erreur sur les simulations et également d'évaluer quels processus et quelles conditions climatiques génèrent les plus fortes incertitudes.

## 6. Rapports, publications, thèses, sites Internet, et autres valorisations de l'étude

**Les publications pour lesquelles le programme GICC a eut une implication directe, sont listées ci dessous. La contribution de *CARBO-CONTROLE* à chacune d'entre elles, est rajoutée entre parenthèse et en caractères gras.**

K. Gurney, R. M. Law, A. S. Denning, P. J. Rayner, D. Baker, P. Bousquet, L. Bruhwiler, Y. Chen, P. Ciais, S. Fan, I. Y. Fung, M. Gloor, M. Heimann, K. Higuchi, J. John, T. S. Maksyutov, K. Masarie, P. Peylin, M. Prather, B. C. Pak, J. Randerson, J. Sarmiento, S. Taguchi, T. Takahashi, C. Yuen, Towards robust regional estimates of annual mean CO<sub>2</sub> sources and sinks, *Nature*, 415, 626-630, 2002. **(30%)**

D.S. Schimel, J.I. House, K.A. Hibbard, P. Bousquet, P. Ciais, P. Peylin, B.H. Braswell, M.J. Apps, D. Baker, A. Bondeau, J. Canadell, G. Churkina, W. Cramer, A.S. Denning, C.B. Field, P. Friedlingstein, C. Goodale M. Heimann, R.A. Houghton, J.M. Melillo, B. Moore III, D. Murdiyarso, I. Noble, S.W. Pacala, I.C. Prentice, M.R. Raupach, P.J. Rayner, R.J. Scholes, W.L. Steffen, C. Wirth, Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems, *Nature*, Novembre, 2001. **(10%)**

S. W. Pacala, G. C. Hurtt, D. Baker, P. Peylin, R. A. Houghton, R. A. Birdsey, L. Heath, E. T. Sundquist, R. F. Stallard, P. Ciais, P. Moorcroft, J. P. Caspersen, E. Shevliakova, B. Moore, G. Kohlmaier, E. Holland, M. Gloor, M. E. Harmon, S.-M. Fan, J. L. Sarmiento, C. L. Goodale, D.

Schimel, and C. B. Field, Consistent Land- and Atmosphere-Based U.S. Carbon Sink Estimates, *Science*, 292, 2316-2320, 2001. **(10%)**

Pepin, L., Schmidt, M., Ramonet, M., Worthy D.E.J and P. Ciais, 2002. A new Gas Chromatographic Experiment to Analyze Greenhouse Gases in Flask Samples and in Ambient Air in the Region of Saclay. *Notes Instrumentales de l'IPSL. Note n°13, septembre 2001.* **(50%)**

P. Peylin, P. Bousquet et P. Ciais, Inverse Modeling of Atmospheric Carbon Dioxide Fluxes, *Science – Technical comment* (response), 294-259, October 12 2001. **(10%)**

P. Peylin, D Baker, P. Bousquet, J. Sarmiento, et P Ciais, Influence of atmospheric transport uncertainty on annual mean versus seasonal inversions of atmospheric CO<sub>2</sub> data, *J. Geoph. Res.*, 107, D19, 2002. **(20%)**

P. Bousquet, P. Peylin, P. Ciais, C. Lequere, P. Friedlingstein, et P.Tans, Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, *Science*, 290, 1342-1346, 2000. **(30%)**

P. Peylin, P. Bousquet, C. Lequere, S. Sitch, P. Friedlingstein, G. McKinley, N. Gruber, P. rayner, P. Ciais, Multiple constraints on regional CO<sub>2</sub> flux variations over land and oceans, *Glo change Biology*, sous presse, 2003. **(30%)**

L. Rivier, P. Bousquet, P. Peylin, P. Ciais, M. Heimann, C. Gills, M. Gloor, European inverse estimate of carbon fluxes using 5 different transport models, *JGR*, to be submitted, 2003. **(100 %)**

Sadois, C., Estimation des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> en région parisienne, 2002. *D.E.A. Chimie de la Pollution Atmosphérique et Physique de l'Environnement, Univ. Paris 7. En cours.* **(100%)**

Valant C., Schmidt M. and Ramonet M., 2003. Mesure par chromatographie en phase gazeuse du monoxyde de carbone (CO) présent à l'état de trace dans l'atmosphère, *Rapport interne.* (100%).

AIRPARIF, sources DRIRE Ile-de-France/AIRPARIF 1998. *Bilan des émissions en Ile-de-France, 2000,* **(50%)**.

Braud H., Bousquet P. and Ramonet M., 2003. CO/CO<sub>2</sub> ratio in urban atmosphere: Example of the agglomeration of Paris, France, *en preparation,* **(50%)**.

Sites web en liaison avec le projet :

AEROCARB : [www.aerocarb.cnrs-gif.fr](http://www.aerocarb.cnrs-gif.fr)

TACOS : [www.tacos.cnrs-gif.fr](http://www.tacos.cnrs-gif.fr)

CARBOEUROPE : <http://www.bgc-jena.mpg.de/public/carboeur/>

Global-View : [www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html](http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/globalview/index.html)

WMO-GAW : <http://www.wmo.ch/index-en.html>

Documentation du modèle ORCHIDEE : <http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipl>

## 7. Disponibilité des données :

Les données issues des enregistrements du Puy-de-Dôme et de la station de Gif sur Yvette sont organisées en base de donnée pour le réseau RAMCES. Elles sont disponibles sur demande ([ramonet@lsce.saclay.cea.fr](mailto:ramonet@lsce.saclay.cea.fr)) Elles vont être communiquées à l'Organisation Mondiale de la Météorologie et à la base de données internationale GLOBAL-VIEW-CO2 qui génère des produits pour les modélisateurs (moyennes, lissages). Aucune demande spécifique ne sera faite auprès du GICC.

Les sorties du modèle ORCHIDEE représentent un volume de données trop important pour être entièrement archivé. Les sorties sont au format NETCDF. Nous archivons les moyennes mensuelles en chaque point de grille et les séries horaires pour des sites (EUROFLUX, ...). Les résultats de modèle pour la simulation longue 1901-2000 sont disponibles sur demande ([viovy@lsce.saclay.cea.fr](mailto:viovy@lsce.saclay.cea.fr)).

Les résultats des simulations inverses ont été publiés (ou sont en cours de publication) dans des revues scientifiques (voir section 6.). Ils sont directement disponibles sur demande ([peylin@lsce.saclay.cea.fr](mailto:peylin@lsce.saclay.cea.fr)).

## 8. Résultats qui mériteraient d'être valorisés dans le site Internet GICC

Les figures et le texte du rapport pourraient être mis à disposition sur le site internet du GICC. Il est possible d'effectuer une animation des variations de flux biopshériques au cours des 100 dernières années, et de la placer sur le site internet. De plus l'évolution de la production primaire totale sur le 20<sup>ème</sup> siècle (pour la France) est une courbe directement valorisable.

Les résultats de modélisation inverse peuvent faire l'objet d'une page spécifique du site internet avec les résultats pour l'Europe de l'Article *Bousquet et al. 2000* paru dans Science.