

**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***

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

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

## 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.cnrs.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

Les objectifs du projet CARBO-CONTROLE sont d'estimer les flux de carbone à l'échelle Européenne et Nationale à l'aide d'une approche intégrée où sont utilisées 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.

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.

Le projet CARBOCONTROLE a démarré depuis deux ans, et nous sommes maintenant dans la 3<sup>ème</sup> année. Ce rapport présente l'activité du projet à T+24 mois. Outre l'exposé point par point des résultats obtenus conformément aux objectifs du projet (section 5) nous mettons l'accent sur les méthodologies employées (sections 4 et 5), 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 un an au puy de Dome a été réalisé en collaboration avec le LAMP (Clermont- Ferrand), et se poursuit actuellement.

Nous avons prévu dans le document initial 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'écosystème.

Pour répondre à cet objectif, nous proposons d'utiliser des modèles tri-dimensionnels 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 effectué de nouveaux calculs des flux Européens avec trois modèles de transport pour estimer les flux Européens (TM2, TM3, GCTM)** en mode "inverse", c'est à dire contraints directement par les observations. Les objectifs initiaux ont été dépassés puisque, initialement seulement un modèle (TM2) était prévu.

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 du suivi du Radon-222 permettra plus directement d'estimer les flux.

En ce qui concerne la biosphère continentale, nous avons proposé d'utiliser des champs climatiques et des données satellitaires 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. **Les simulations proposées avec ORCHIDEE ont été accomplies, en particulier une simulation longue à haute résolution pour la période 1901-2000.** Une comparaison avec des observations (flux, biomasse) est en cours. En outre, nous sommes partis de notre modèle générique ORCHIDEE pour l'améliorer à partir de modèles spécifiques dans les zones de culture (STICS) et de prairies (PASIM), en collaboration avec les groupes de l'INRA.

### 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 (voir section 3.2) 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.**

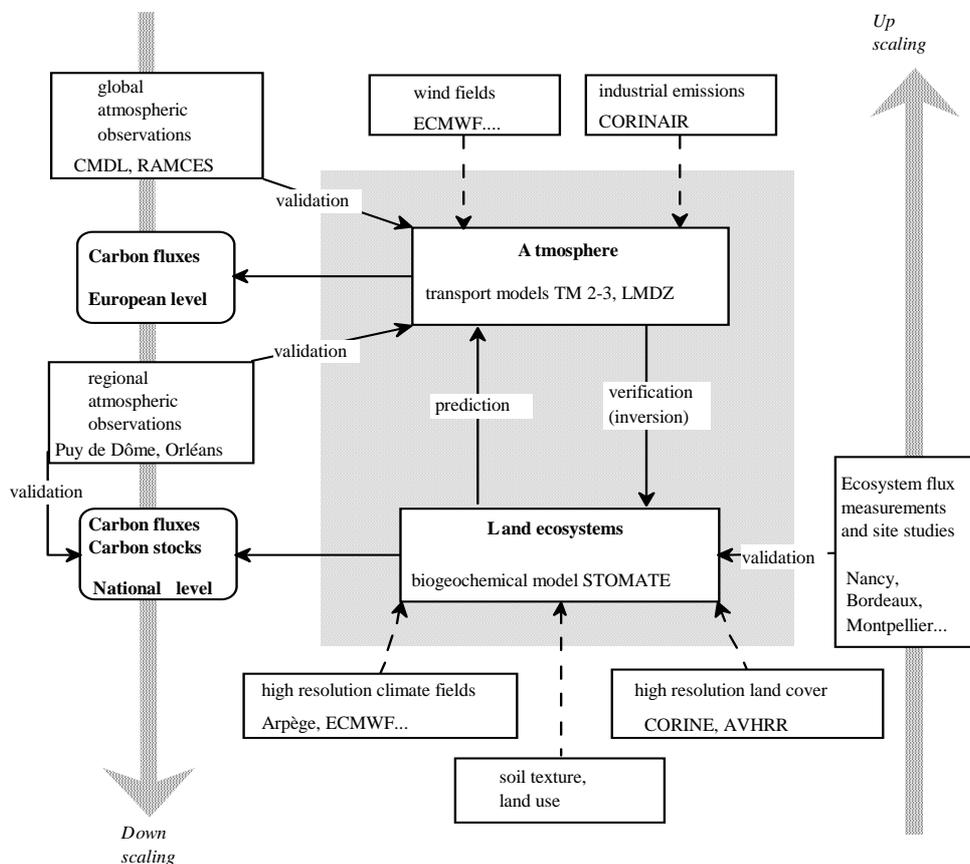
A l'échelle de l'Europe le premier point fait l'objet d'un projet spécifique coordonné au LSCE (TACOS-Infrastructure) depuis le 1<sup>er</sup> nov. 2001 dans le cadre du 5<sup>ème</sup> PCRD. En ce qui concerne le développement du réseau de mesure en milieu continental, la difficulté est de trouver des 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. **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 cet analyse il s'agit de comprendre les processus à l'origine des variabilités observés, pour séparer dans la 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 **démarrer deux sites de mesure pilotes au Puy de Dôme et à Gif**. Le suivi en continu à ces deux stations 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. 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...). Ce travail est actuellement en cours dans la deuxième tranche du projet. La méthodologie que nous avons adoptée dans l'analyse des données consiste à analyser des rétrotrajectoires, et à corrélérer les variations de CO<sub>2</sub> à celles d'autres traceurs atmosphériques tels que le Radon-222, le CO, le SF<sub>6</sub>, ou les aérosols carbonés. L'étude des corrélations entre le Radon-222 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, une estimation des flux régionaux de ces composés, qui apporte une **verification atmosphérique des cadastres d'émissions** développés par le CITEPA en Ile de France.

### **3.1. Modélisation inverse atmosphérique**

La modélisation inverse est une approche dite « top-down » qui utilise les données de CO<sub>2</sub> atmosphériques d'un réseau global. Cette approche consiste à déterminer la combinaison optimale des flux de CO<sub>2</sub> sur des grandes régions, 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. Les résultats obtenus sont fonction de la densité des stations atmosphériques, de l'erreur associée aux mesures, d'une ébauche des flux, et bien sur du code de transport utilisé. L'approche inverse Bayésienne que nous avons adoptée dans le cadre du projet CARBOCONTROLE 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 liée au transport atmosphérique, et leur impact sur les flux inversés, nous avons utilisé plusieurs modèles de transport. La méthodologie utilisée dans CARBOCONTROLE 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 :



*Méthodologie générale utilisée pour estimer les flux de CO<sub>2</sub>. Chaque méthode particulière d'agrégation ou de désagrégation a été testée dans le cadre de CARBO-CONTROLE.*

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

La modélisation directe dite « bottom-up » 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.

Pour étudier le rôle de la biosphère dans le cycle du carbone sur les échelles interannuelles à décennales, nous avons utilisé le modèle ORCHIDEE développé à l'IPSL en collaboration avec les laboratoires du LEV (Orsay), LET et CESBIO (Toulouse). Le modèle ORCHIDEE est un modèle des surfaces continentales global. ORCHIDEE est en fait composé de 3 sous modèles : SECHIBA qui calcule les processus rapides d'échanges entre biosphère et atmosphère (bilan énergétique, bilan hydrique, quantité de mouvement et photosynthèse). 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. Un troisième modèle peut également être activé qui calcule la dynamique de la végétation. Mais la végétation peut aussi être prescrite, ce qui est le cas dans le cadre de ce projet. ORCHIDEE prend en compte la distribution de 13 types de plantes fonctionnelles (PFT).

Les variables de forçage du modèle sont des champs météorologiques de température à la surface, précipitation, humidité, rayonnement, vents, pression, ainsi que les types de

végétation et des données relatives au type de sol. Il s'agit d'un modèle qui simule le comportement d'une plante « moyenne » pour chaque biome, il n'y a donc pas d'échelle caractéristique du modèle puisque d'éventuelles interactions entre biomes ne sont pas prise en compte. En revanche, lorsque plusieurs biomes sont présents à l'intérieur d'une grille, chaque biome est traité séparément et seul les flux sont moyennés en proportion de la surface couverte par chaque biome. Une description complète du modèle peut être consultée sur (<http://www.ipsl.jussieu.fr>). Le modèle ORCHIDEE a été initialement conçu pour des application à l'échelle globale avec une définition assez grossière des grands types d'écosystèmes. La méthodologie spécifiquement développée dans CARBOCONTROLE, en collaboration étroite avec deux autres projets du GICC, consiste à **améliorer les mécanismes pris en compte dans le modèle afin de pouvoir réduire les incertitudes sur les flux à l'échelle de la France**. Il s'agit plus spécifiquement d'améliorer la prédiction des flux sur les **écosystèmes anthropisés de cultures et pariries** (travail en cours dans la deuxième tranche du projet) et forêts gérées (en cours dans le cadre du projet CARBOFOR coordonné par D. Lousteau).

## 4. Les résultats

### 4.1. Echelle Européenne : Inversions atmosphériques

Un rapport détaillé des résultats des modèles inverses a été fourni à T+12. Nous en rappelons les principaux résultats ci dessous, et présentons de nouvelles estimations pour l'Europe. 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.

#### 4.1.1. Contexte

Toutes les inversions 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 5 dans le chapitre 3 de IPCC, 2001]. 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.

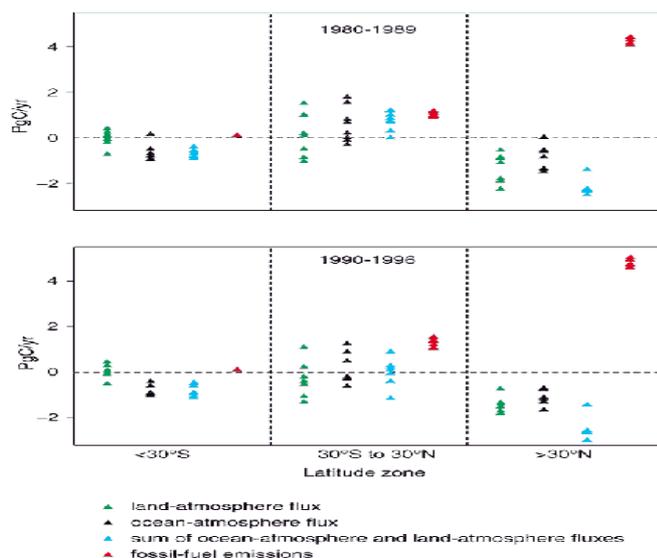


Figure 1. Résultats d'inversions existants dans la littérature (différents jeux de données, différentes méthodes...) compilés par bande de latitude. On constate l'existence d'un puits de carbone dans l'hémisphère Nord, dont la partition en longitude entre océans et continents reste incertaine.

#### 4.1.2. Jeux de simulations

Nous avons réalisé un ensemble de simulations inverses basées sur l'approche dite Bayésienne et de synthèse [Enting et al. 1995]. Celle-ci consiste à rechercher une combinaison linéaire des flux pour chaque région, telle que le champ de concentration modélisé, s'accorde au mieux avec les observations au sens des moindres carrés. Cette technique permet en outre d'estimer une erreur pour chaque flux et de prendre en compte une valeur a priori des flux dans l'estimation inverse. Ce travail a fait l'objet d'un article [Peylin et al. 2002]. En outre, les résultats d'une intercomparaison récente 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.

Dans l'étude de Peylin et al. [2002], les mesures de concentrations de CO<sub>2</sub>, proviennent 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.

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. Le cas non physique d'une optimisation des

sources mensuelles à partir de concentrations annuelles n'a pas été traité. L'étude de Gurney et al. [2002] considère 22 régions (11 océans et 11 continents).

Dans Peylin et al. , trois codes de transport atmosphérique tri-dimensionnels différents ont été utilisés pour le calcul des concentrations de CO<sub>2</sub> aux différentes stations : TM2, TM3, et GCTM. Dans Gurney et al., 15 modèles de transport (dont les trois ci dessus) ont été utilisés.

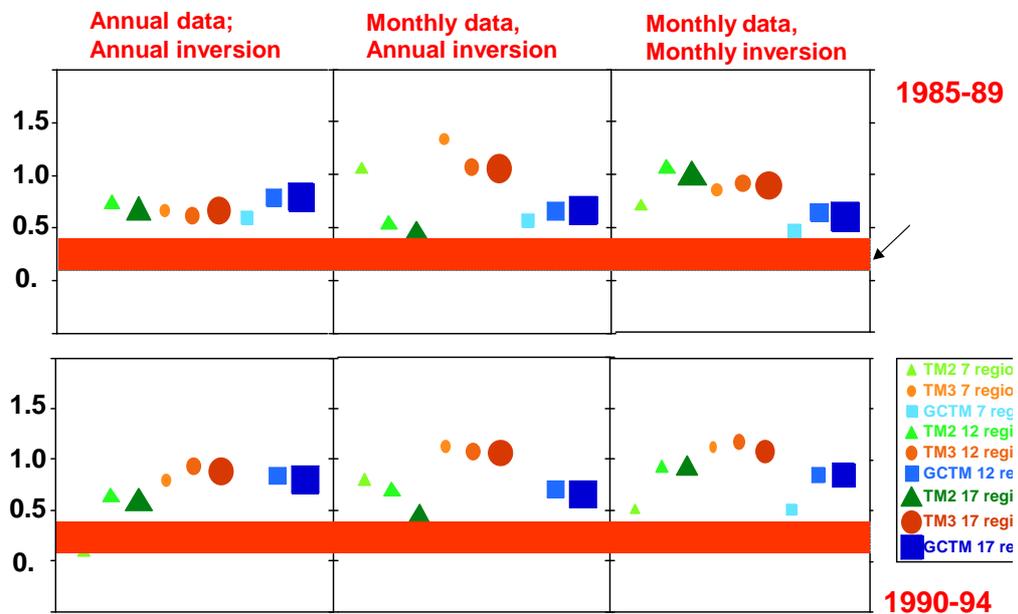


Figure 2. Résultats de modèles inverses pour le bilan de carbone Européen. Trois modèles de transport (triangles, ronds et carrés) ont été utilisés, ainsi que trois jeux de 7, 12 ou 17 régions (taille des symboles proportionnelle au nombre de régions). Chaque graphe représente des paramètres différents 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. Source : Peylin et al. [2001]

L'ébauche Les sources et puits de CO<sub>2</sub> qui sont inversés correspondent aux flux d'échanges air-mer (Takahshi et al. 1999), et aux flux biosphériques de photosynthèse et de respiration définis soit par le modèle de surface SiB2 dans Peylin et al. [2002], soit par le modèle CASA dans Gurney et al. [2002]. Notons que seul le flux net (photosynthèse + respiration) est discuté. 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.). Enfin, des contraintes additionnelles imposent que la somme globale de toutes sources, ajoutée au flux fossile soit égale aux taux de croissance moyen annuel du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

#### 4.1.3. Estimation des flux Européens

L'objectif de CARBOCONTROLE était d'utiliser les résultats d'inversions pour déduire les flux Européens. Cet objectif a été atteint et les résultats sont résumés sur les figures 2 et 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 actuel ne permet pas encore de réduire plus les incertitudes car peu de stations continentales sont assimilées dans les modèles de transport.

La figure 3 présente, toujours pour l'Europe, les résultats d'une inversion où les sources sont optimisés annuellement avec 15 modèles de transport différents (Gurney et al., 2002), à partir du même jeu de stations atmosphériques dans le cadre du projet TRANSCOM-3. **La moyenne de ces 15 inversions donne 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 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.

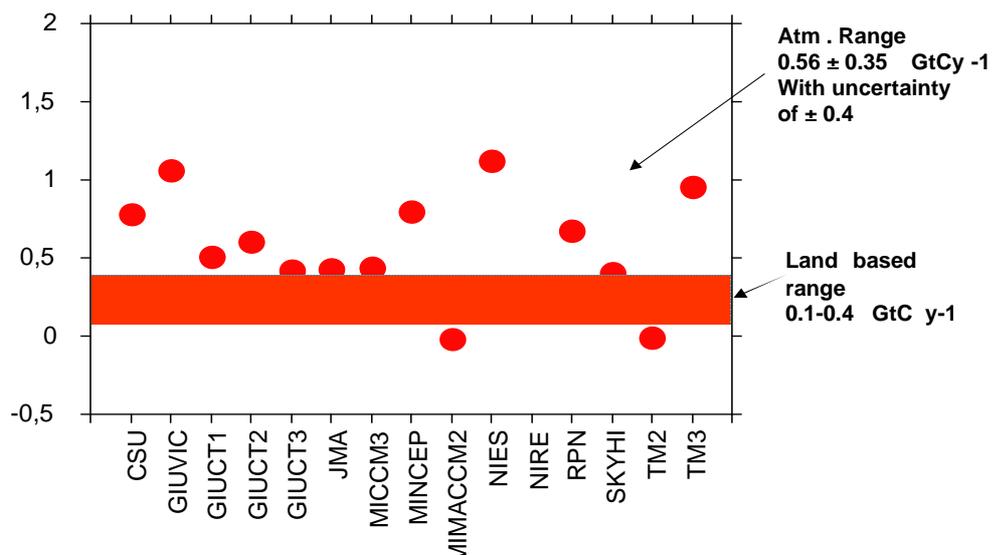


Figure 3. Flux de CO2 (convention >0 indique un puits de carbone) en Europe pour la période 1992-1996, calculés avec la même inversion des sources annuelles appliquée à 15 modèles de transport différents (TRANSCOM-3, Gurney et al. 2001). L'intervalle en couleur indique la valeur obtenue à partir des inventaires de biomasse pour les forêts de l'Europe des 15.

## 4.2. 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.

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), et susceptible d'échantillonner les sources et puits continentaux de CO<sub>2</sub> à l'échelle régionale. Nous avons construit un analyseur à haute précision du CO<sub>2</sub> atmosphérique, à partir d'un instrument Licor 6252. Cet appareil et les gaz étalons nécessaires à des mesures en continu 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 observatoires du réseau RAMCES du LSCE et permet d'atteindre une précision de l'ordre de 0.1 ppm. Un problème survenu fin 2000 sur l'analyseur n'a pu être réparé qu'en avril 2001. Depuis cette date, le système fonctionne sans interruption, en dépit des orages importants qui ont touché l'observatoire durant l'été 2001 (Figure 5). La surveillance et la maintenance de l'analyseur a été assurée conjointement par le LaMP et le LSCE.

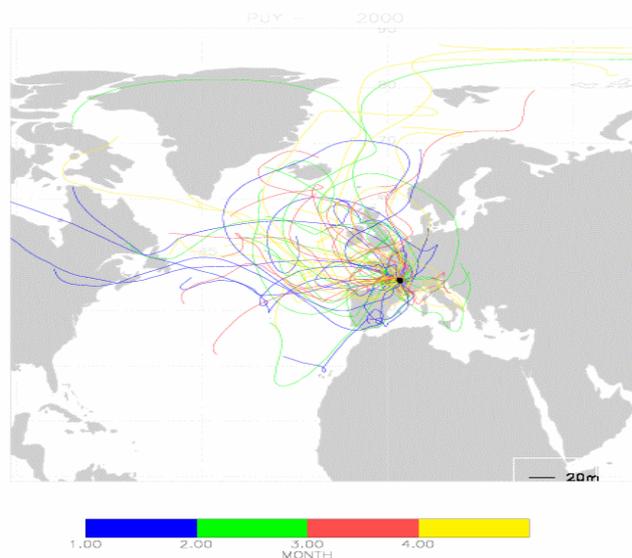


Figure 4: Rétrotrajectoires à 5 jours pour le site du Puy de Dôme calculées en 2000 avec une fréquence d'une rétro tous les 5 jours. Les couleurs correspondent à la saison: bleu pour l'hiver (DJF), vert pour le printemps (MAM), rouge pour l'été (JJA) et jaune pour l'automne (SON).

L'enregistrement obtenu en 2001 (Figure 5) indique une amplitude saisonnière de l'ordre de 15 ppm avec des valeurs moyennes généralement plus élevées que celles observées à l'observatoire de Mace Head sur le côté Ouest de l'Irlande. Ce décalage traduit l'influence des sources continentales anthropiques et biosphériques particulièrement importantes en automne et hiver. A l'inverse au printemps 2001 les valeurs moyennes au Puy de Dôme sont inférieures à celles de Mace Head, traduisant l'influence du puits biosphérique associé à l'assimilation de carbone par les écosystèmes en France.

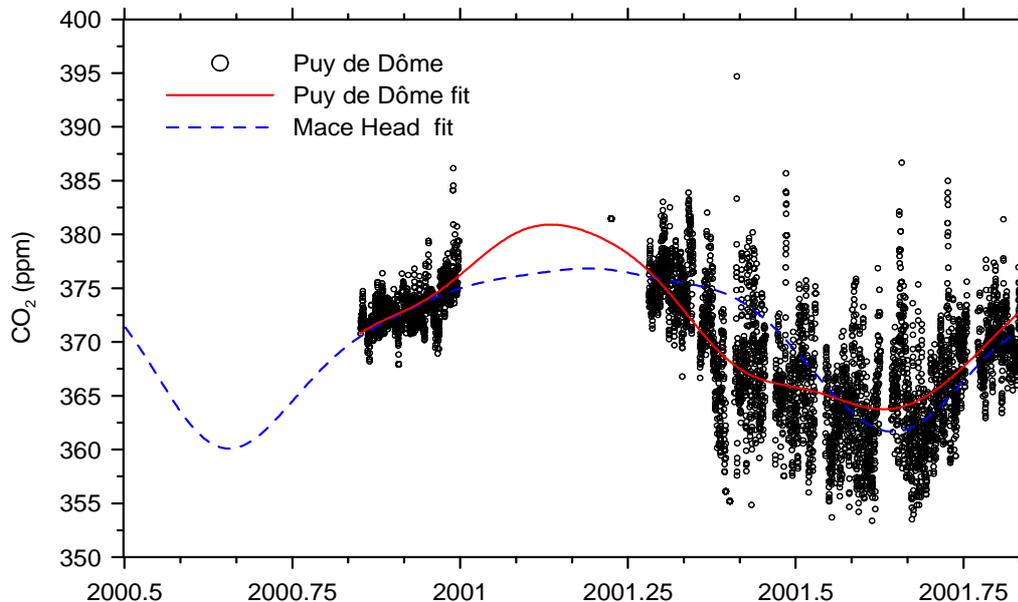


Figure 5. Suivi du CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'Observatoire du Puy de Dôme en 2001

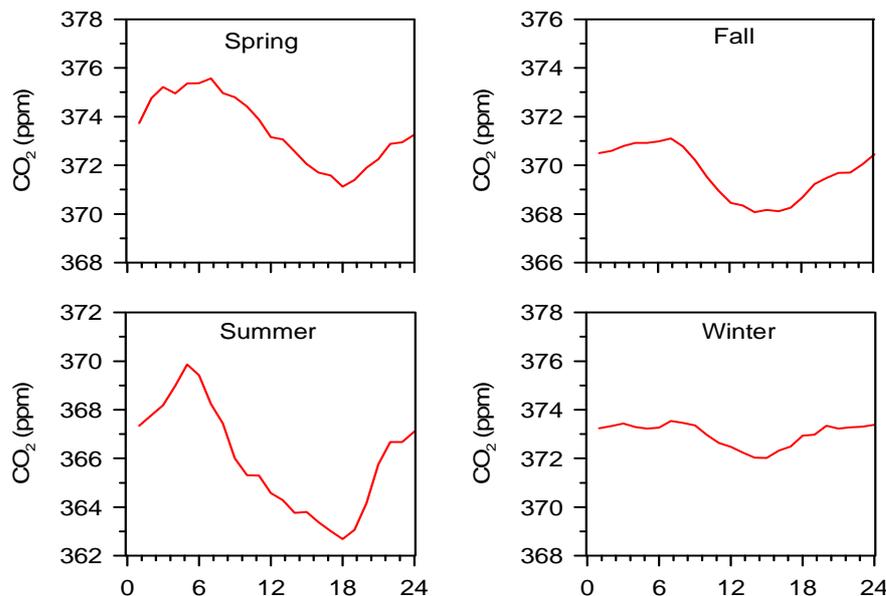


Figure 6: Cycles diurnes du CO<sub>2</sub> atmosphérique au Puy de Dôme moyennés sur chaque saison (heures TU).

La variabilité diurne du CO<sub>2</sub> a été calculée pour chaque saison (Figure 6). Elle est maximale en été (7 ppm d'amplitude) lorsque l'activité de la végétation est maximale. En hiver les flux biosphériques sont faibles, et le transport vertical moins intense. De ce fait l'observatoire du Puy de Dôme se retrouve au dessus de la couche de mélange atmosphérique et donc isolé des sources et puits locaux. La variabilité diurne du CO<sub>2</sub> atmosphérique est alors de l'ordre de 1.5 ppm. Les mesures de Radar ST réalisées au Puy de Dôme seront utilisées pour estimer la hauteur de la CLA, paramètre essentiel pour comprendre la diffusion du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Par ailleurs la comparaison de la variabilité du CO<sub>2</sub> avec celle d'autres traceurs atmosphériques permet de mieux comprendre les liens complexes entre les flux locaux et régionaux, la dynamique atmosphérique et les concentrations mesurées. Ainsi l'analyse de la

période du 3-10 août 2001 avec une circulation d'ouest, indique un cycle diurne du CO<sub>2</sub> typique de la saison estivale avec une amplitude d'une dizaine de ppm et un minimum en milieu de d'après midi. Les aérosols carbonés présentent également un cycle diurne régulier, anti-corrélé avec celui du CO<sub>2</sub>. La raison de cette relation CO<sub>2</sub>/BC doit être recherchée dans la dynamique diurne de l'intensité du transport vertical. Durant la journée le mélange vertical est intense et la couche limite atmosphérique bien développée jusqu'à des altitudes de l'ordre de 1000 à 2000m (à confirmer avec l'analyse des données du Radar ST). L'observatoire du Puy de Dôme est donc soumis à l'influence des flux de surface locaux et régionaux engendrant un minimum de CO<sub>2</sub> (puits biosphérique) et un maximum de BC (émissions anthropiques). Par contre durant la nuit le sommet du Puy de Dôme est systématiquement localisée dans la troposphère libre. Les mesures sont alors représentatives d'une échelle beaucoup plus large, peu ou pas perturbées par les influences locales. En hiver le cycle diurne des flux de CO<sub>2</sub> et de la CLA sont beaucoup moins développés, ce qui se traduit par une faible variabilité diurne des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Par contre l'atmosphère stratifiée hivernale est plus propice a des pics de pollution tel que celui observé le 27/28 novembre 2001, et qui se traduit par une forte augmentation de CO<sub>2</sub>, de BC et du nombre de particules associée avec une baisse d'ozone. **L'installation d'un analyseur de Radon-222 en mars 2002 permettra une analyse quantitative des émissions de CO<sub>2</sub> lors de ce type d'évènements.**

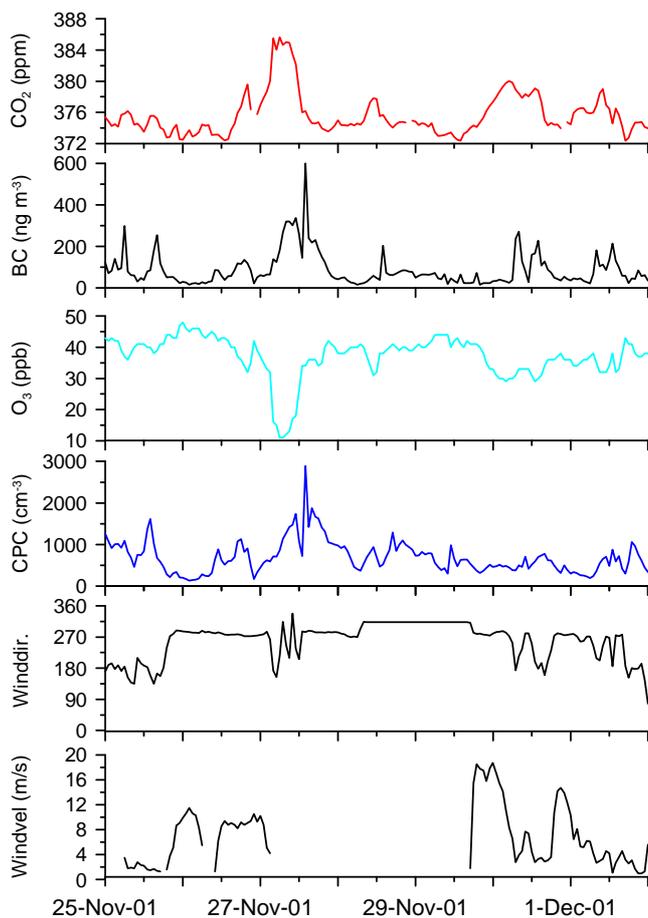


Figure 8A: Suivi du CO<sub>2</sub>, des aérosols carbonés de l'ozone, du nombre de particules, et de la direction et vitesse du vent au Puy de Dôme du 25 nov au 2 déc 2001.

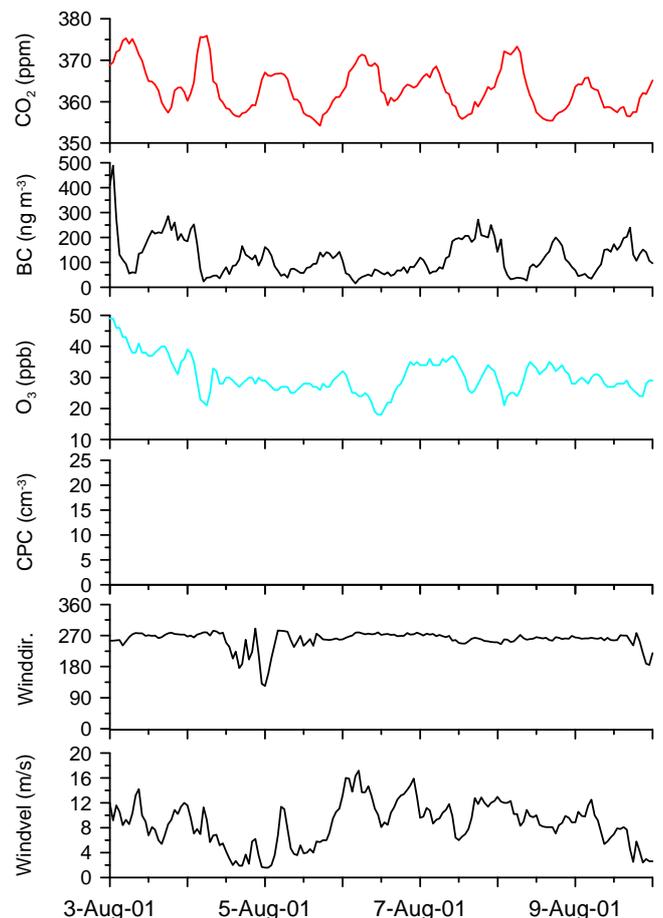


Figure 8B: Suivi du CO<sub>2</sub>, des aérosols carbonés de l'ozone, du nombre de particules, et de la direction et vitesse du vent au Puy de Dôme du 3 au 10 août 2001.

### 4.3. Echelle régionale : vérification atmosphérique des cadastres 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

Le site de Gif localisé au Sud Ouest de Paris (Figure 9) 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 CLA lors de ces épisodes afin de quantifier les émissions anthropiques en Ile de France**. Dans cette approche le Radon-222 est utilisé comme un composé de référence dont la source continentale connue, est supposée homogène.

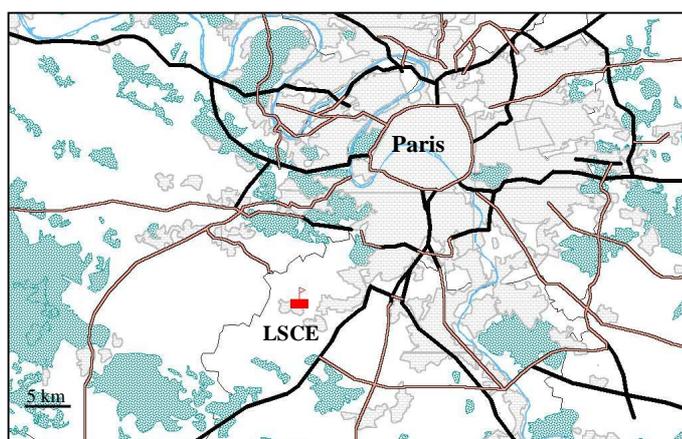


Figure 9. Carte de la région de Gif avec en noir les principales routes, en vert les zones forestières, et les gris les zones urbanisées.

Dans le cadre du projet CARBOCONTROLE nous avons mis en place le suivi en continu du Radon-222 et des principaux gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) à partir d'analyseurs déjà existants au LSCE (chromatographie en phase gazeuse pour le CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O et spectrométrie alpha pour le Radon-222). 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 5l/min 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 -50°C. La reproductibilité des mesures est de ±0.045 ppm pour le CO<sub>2</sub>, ±0.65 ppb pour le CH<sub>4</sub>, et ±0.40 ppb pour le N<sub>2</sub>O.

Les mesures obtenues entre juin et décembre 2001 sont présentés sur la figure 10. Une série de tests effectués sur les analyseurs en septembre et octobre n'a pas permis un suivi continu durant cette période. Les mesures de Radon-222 en juin/juillet 2001 sont sous-estimées en raison d'un problème sur la régulation du débit de la pompe de prélèvement. Ces mesures sont en cours de correction et ne sont pas analysées dans ce rapport. Les cycles diurnes moyens représentés sur la figure 10 indique une bonne corrélation entre les différentes espèces mesurées. Nous avons calculé l'accumulation nocturne pour chaque espèce entre 18h et 6h du matin.

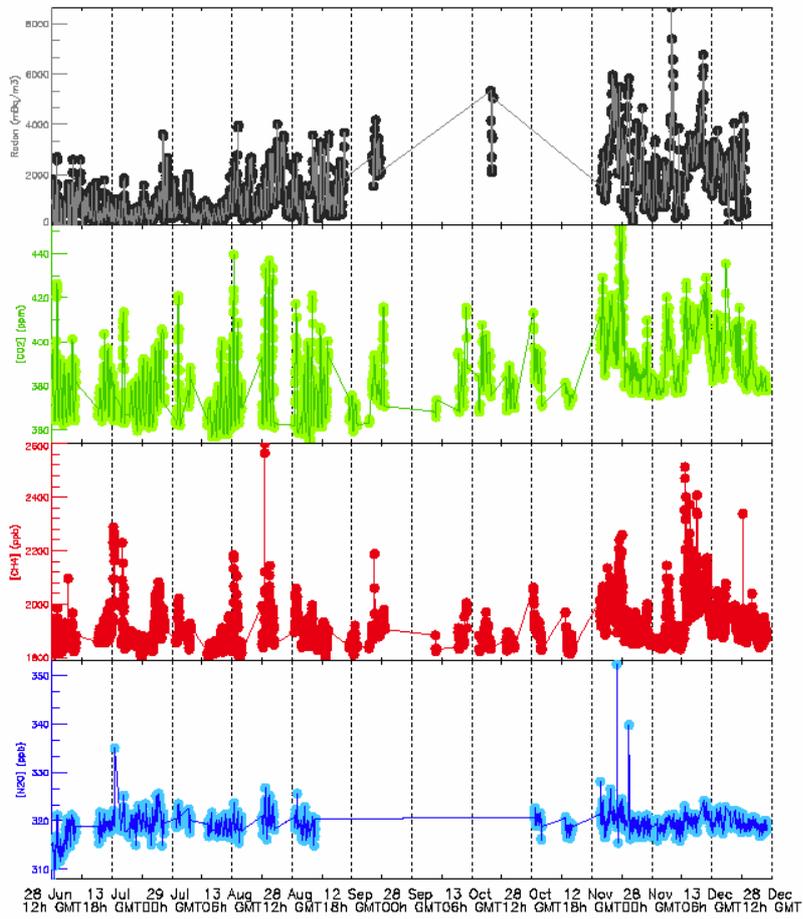


Figure 10. Suivi semi continu du Radon-222, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O à Gif de juin 2001 à décembre 2001.

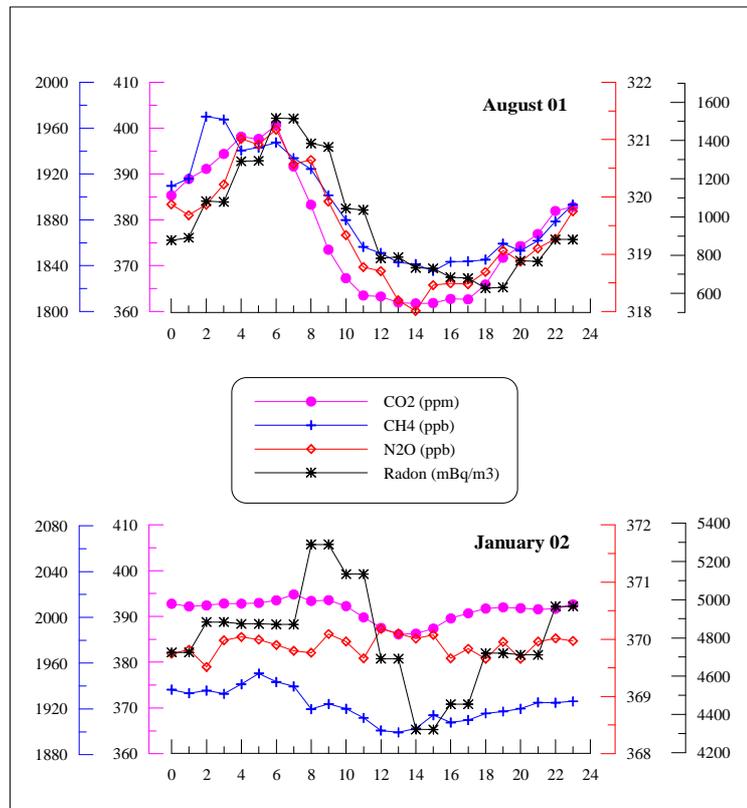


Figure 11 : Cycles diurnes moyens du CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et Radon-222 à Gif en août 2001 et janvier 2002.

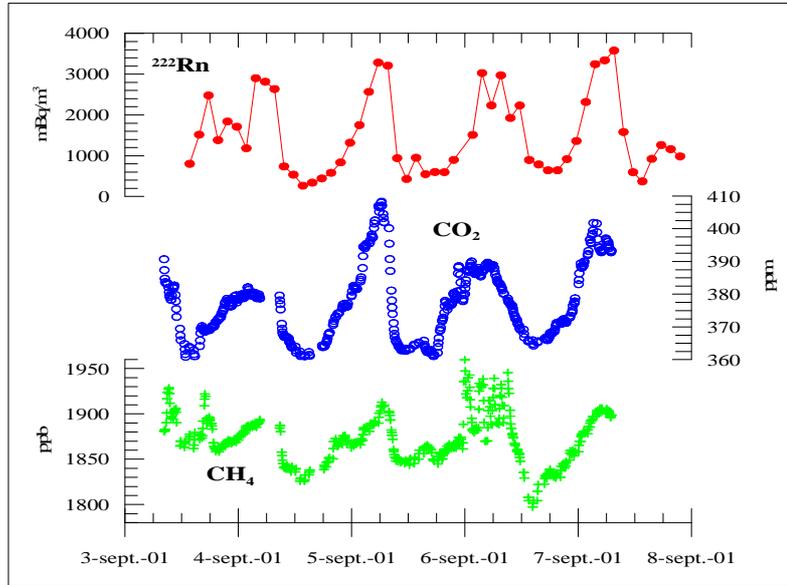


Figure 12. Suivi du Radon-222, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> à Gif du 3 au 8 septembre 2001.

La figure 12 représente les concentrations de Radon-222, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> sur la période du 3 au 8 septembre 2001. Chaque espèce présente un cycle diurne bien marqué. Les gaz s'accumulent dans l'atmosphère à partir de la fin d'après midi (6PM TU) jusqu'à 6 heures du matin. Cette accumulation est due à l'inversion de température qui se produit la nuit, provoquant une barrière à la diffusion des gaz émis à la surface. Au lever du soleil l'inversion de température disparaît et les concentrations des gaz augmentent rapidement. Dans le cas du CO<sub>2</sub> l'assimilation du carbone par la végétation durant la journée (au printemps et été) contribue également à la baisse de concentration observée dans l'atmosphère.

Nous avons étudié l'accumulation nocturne du Radon, du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> 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 Radon-222 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 Radon-222. Les événements avec un facteur de corrélation ( $r^2$ ) 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  $\lambda C_{222} \ll \Delta C_{222}/\Delta t$ ):

$$\overline{j_x} = \overline{j_{222}} \frac{\Delta C_x}{\Delta C_{222}} \left( 1 - \frac{\lambda_{222} C_{222}}{\Delta C_{222} / \Delta t} \right) \quad (2)$$

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]. Les flux de CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> estimés pour les événements sélectionnés entre septembre et décembre 2001 sont résumés dans les tableaux 1 et 2.

Date	Direction (°)	Vitesse (m/s)	Pente (Bq/m3/ppm)	r <sup>2</sup>	Flux N (10 <sup>3</sup> kgC/km <sup>2</sup> /j)
4 sept 2001	74.6	11.4	15.0	0.9	14 14.3
5 sept 2001	73.2	13.7	7.8	0.6	13 7.4
6 sept 2001	85.6	12.8	10.4	0.8	15 9.9
16 nov 2001	89.4	4.3	10.0	0.8	15 9.6
26 nov 2001	92.7	3.7	13.9	0.9	15 13.3
3 déc 2001	92.3	8.8	2.1	0.8	11 2.0
4 déc 2001	91.1	8.2	9.0	0.7	15 8.6
11 déc 2001	97.6	2.1	4.5	0.9	12 4.3
12 déc 2001	85.2	2.9	10.8	0.6	15 10.3
14 déc 2001	58.7	2.7	9.1	0.6	12 8.6
16 déc 2001	65.6	0.8	15.8	0.6	15 15.1
Moyenne					9.4 ±4

Tableau 1: Flux de CO<sub>2</sub> estimés à partir de l'enregistrement de Radon-222 et CO<sub>2</sub> à Gif.

Date	Direction (°)	Vitesse (m/s)	Pente (Bq/m3/ppm)	r <sup>2</sup>	Flux N (kgCH <sub>4</sub> /km <sup>2</sup> /j)
4 sept 2001	74.6	11.4	17.9	0.9	13 19.9
6 sept 2001	85.6	12.8	25.7	0.9	15 28.6
15 nov 2001	73.9	0.8	66.3	0.6	15 73.8
16 nov 2001	89.4	4.3	151.2	0.7	15 168.3
22 nov 2001	87.1	5.0	10.2	0.7	14 11.4
24 nov 2001	94.9	9.6	40.0	0.7	15 44.5
26 nov 2001	92.7	3.7	54.4	0.8	15 60.6
3 déc 2001	92.3	8.8	6.0	0.7	11 6.6
4 déc 2001	91.1	8.2	89.4	0.8	15 99.5
6 déc 2001	91.5	4.2	178.5	0.5	13 198.7
12 déc 2001	85.2	2.9	135.3	0.9	15 150.6
14 déc 2001	58.7	2.7	64.0	0.7	12 71.3
16 déc 2001	65.6	0.8	107.4	0.7	15 119.5
21 déc 2001	88.7	3.0	40.4	0.7	15 45.0
Moyenne					78.4 ±61

Tableau 2: Flux de CH<sub>4</sub> estimés à partir de l'enregistrement de Radon-222 et CH<sub>4</sub> à Gif.

Les résultats obtenus par la méthode Radon peuvent être comparés avec les cadastres des 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 13A,B). Il ressort de

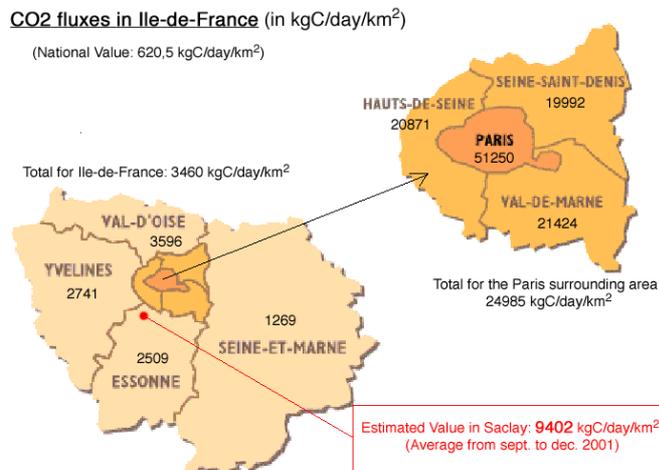


Figure 13B: Cadastres d'émission du CO2 en Ile de France (source: CITEPA).

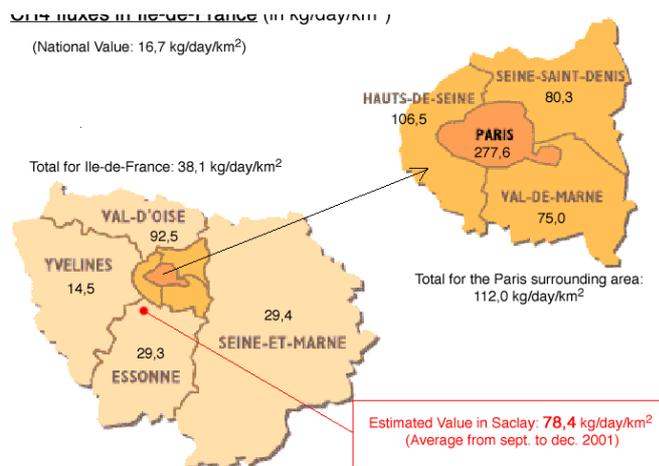


Figure 13A: Cadastres statistiques d'émission du CH4 en Ile de France (source: CITEPA).

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'Ile de France** respectivement pour le CH4 et le CO2. Cependant les cadastres du CITEPA indiquent des flux nettement plus importants dans la partie de l'Ile de France, qui est la principale zone d'influence pour les événements analysés à Gif pour lesquels le vent était quasi systématiquement du Nord/Est (Table 1). La valeur des flux mesurée à Gif est intermédiaire avec celle donnée par les cadastres de Paris et de l'Essonne. Le travail de comparaison cadastres-mesures atmosphériques se poursuit pendant la deuxième tranche du projet, en affinant la distribution spatio-temporelle des cadastres d'émission et en classifiant nos épisodes d'accumulation par secteur d'origine des masses d'air.

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

### **4.4.1 Amélioration des champs de forçages.**

Un des volets de l'étude concernait l'amélioration du forçage du modèle ORCHIDEE sur l'Europe. La disponibilité de ces données qui a pu se faire plus rapidement que prévu, en particulier par l'acquisition d'un nouveau jeu de données climatologiques à haute résolution sur l'Europe a permis de réaliser le premier volet du projet directement avec ces données plutôt qu'avec les données à basses résolutions comme initialement prévu.

**Données climatiques.** W. Cramer et A. Bondeau du P.I.K de Postdam ont réalisés en compilant des données de stations, une climatologie sur l'Europe à une résolution de 10'x10' (soit environ 20km x 20km). Soit une résolution 36 fois supérieure aux données de réanalyses du Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme dont nous disposons 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 disponibles qu'à une résolution temporelle du mois. Nous avons alors combinés ces données avec les réanalyses ERA15 du Centre Européen (qui ont une résolution temporelle de 6h) afin de reconstruire une 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 présentes dans la carte et les 13 PFTs d'ORCHIDEE. Ces données initialement en projection Lambert ont été projetées sur la grille des données climatiques à 10' en calculant la proportion de chaque PFT dans chaque point de grille. A titre d'exemple, la figure 14 montre pour chaque point de grille le PFT majoritaire.

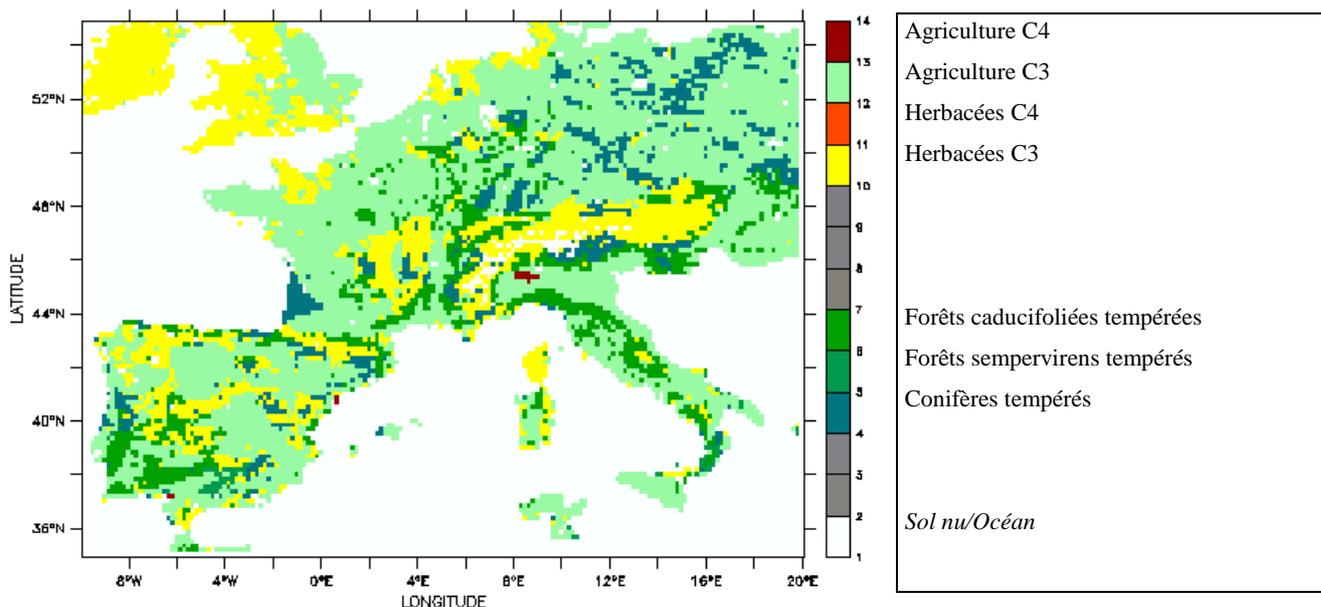


Figure 14 – Distribution des PFTs dominants prescrits à partir de la carte CORINE land cover

La Figure 15 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 météorologiques et couverture végétale à haute résolution. 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. Enfin, la simulation des zones côtières est fortement améliorée (Bretagne par exemple). Avec ces nouvelles données, l'estimation de **la NPP moyenne pour la France est d'environ 650 gC/m<sup>2</sup>/an**.

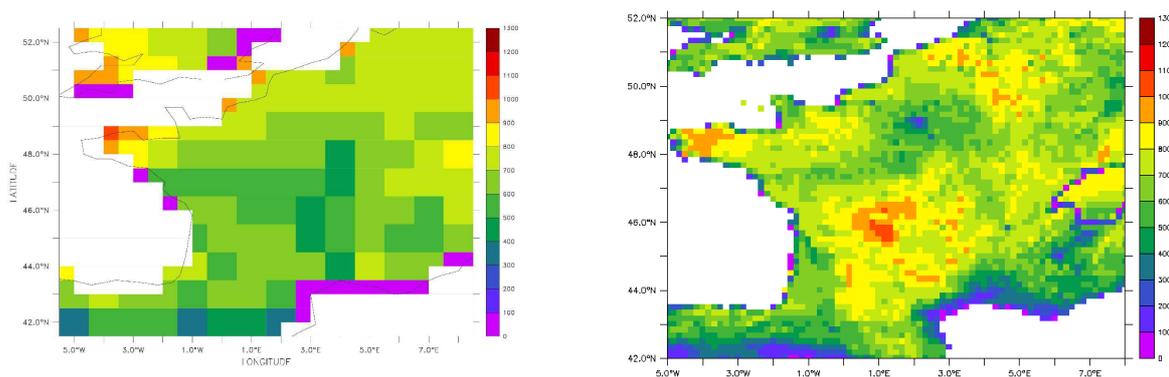


Figure 15: Production primaire nette annuelle simulée par ORCHIDEE avec le forçage 1° et la carte IGBP (à gauche) et avec le forçage haute résolution 10' et la carte CORINE (à droite)

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

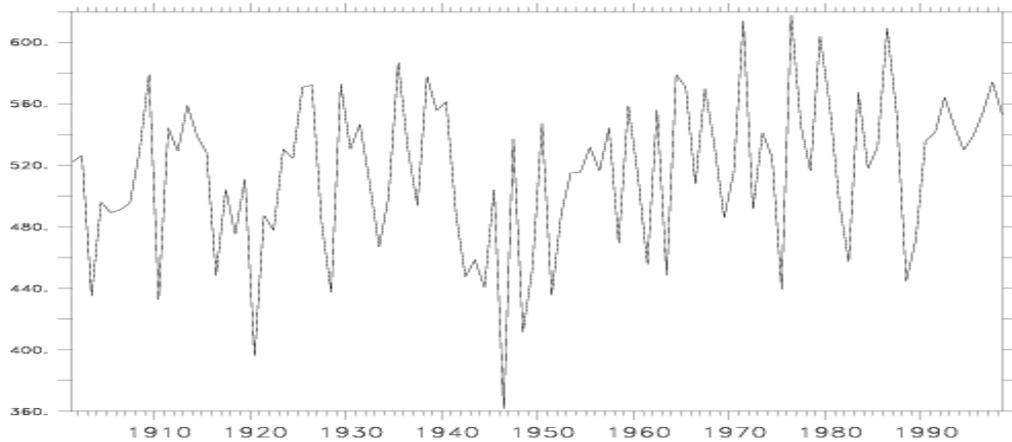


Figure 16. Production primaire nette (gC/m<sup>2</sup>/an) sur la France simulée avec le modèle ORCHIDEE pour la période 1901-2000 (gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>)

A partir des nouveaux champs décrits dans le chapitre précédent, nous avons réalisé une **simulation préliminaire des flux de CO<sub>2</sub> interannuels 1901-2000** sur l'Europe avec ORCHIDEE. La mise à l'équilibre du modèle a été faite de la manière suivante :

1/ run de 200 ans sur la première année de données (1860) pour atteindre un état d'équilibre stationnaire de la biomasse.

2/ run de 80 ans en bouclant deux fois sur les données des 40 premières années (1860-1900) pour obtenir une biosphère équilibrée autour des données interannuelles.

A partir de cet état de pseudo équilibre, la simulation d'un siècle (1901-2000) a été effectuée.

La figure 16 montre la variation interannuelle du flux net de CO<sub>2</sub> moyen et de la production primaire nette moyennés sur l'Europe. Un flux net négatif représente un puits biosphérique, à l'inverse une valeur positive indique une source de CO<sub>2</sub> pour l'atmosphère. On note tout d'abord **la forte variabilité interannuelle**. On peut noter également **qu'aucune tendance n'est réellement visible avant 1940**. En revanche une **légère tendance, visible surtout sur la production primaire est visible après cette période on l'on observe un accroissement de la production primaire nette**.

L'étude d'années spécifiques est également très riche d'informations. A titre d'illustration, la figure 16 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 restée 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 qui est clairement visible sur tout le nord de la France et de l'Europe. En moyenne sur la France, la production des trois mois d'été en 1976 était de 55g C/m<sup>2</sup>, quatre fois moins qu'en 1977 où elle retrouvait une valeur normale de 220 gC/m<sup>2</sup>. Il s'agit ici d'une analyse préliminaire qu'il sera nécessaire de poursuivre dans la deuxième tranche en particulier pour analyser les processus principaux responsables de comportements observés.

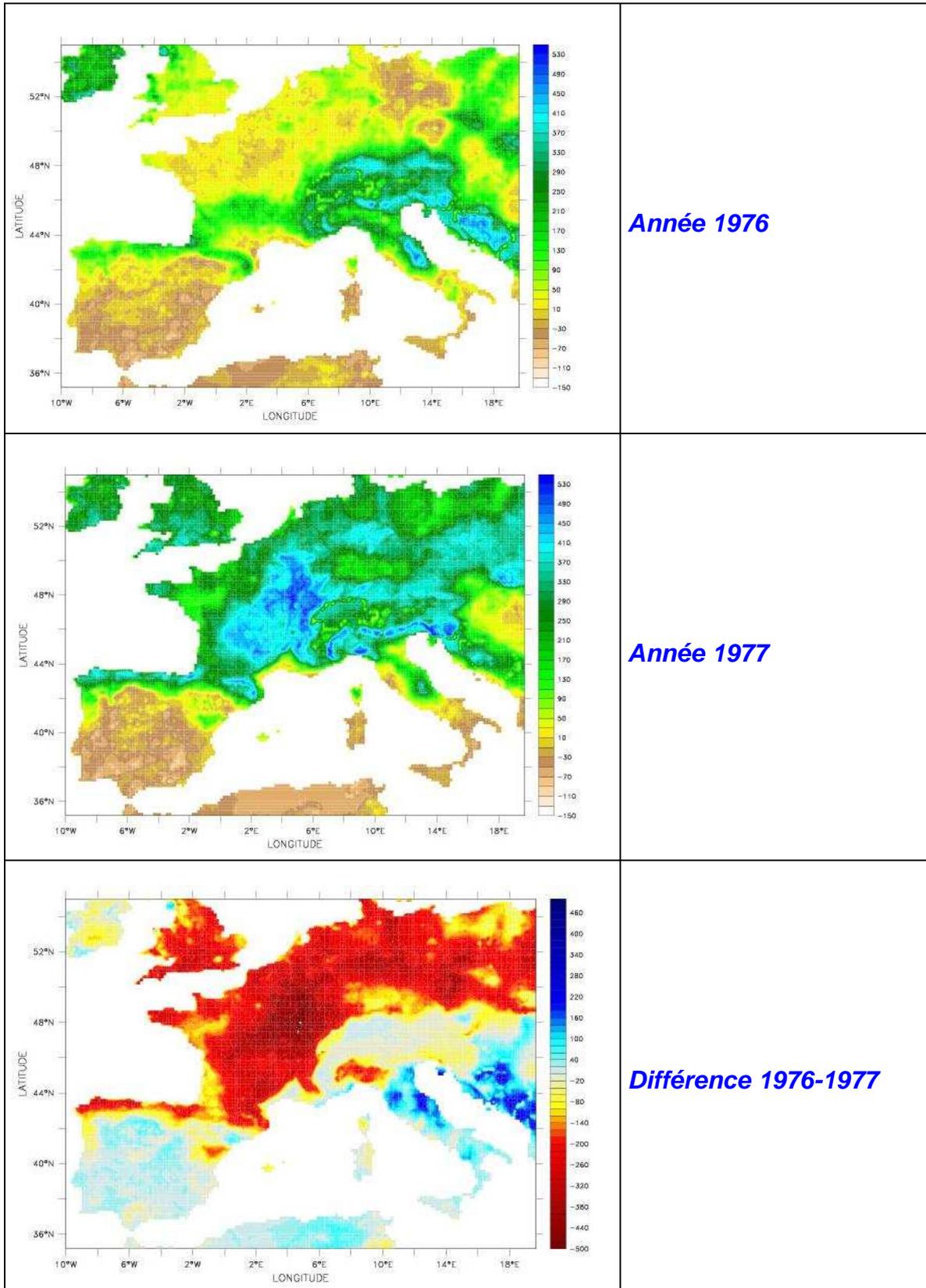


Figure 17: Production primaire nette pour les 3 mois d'été (Juin Juillet Aout) (gC/m<sup>2</sup>/ 3mois) en 1976 et 1977 et différence entre les 2 années.

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

Dans le cadre du projet CARBOCONTROLE 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 : ce sont avant tout les cultures qui sont prises en compte de la manière la moins réaliste dans la version standard d'ORCHIDEE.

Pour ce faire, en collaboration avec l'équipe de Bernard Seguin (INRA, Avignon), nous avons entamée 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).

Nous avons dans un premier temps réalisé des simulations sur sites (culture de blé et de maïs) où nous disposons de mesures in-situ (LAI et biomasse) forcés par les mêmes champs météorologiques. La figure 18 montre le LAI et la biomasse simulée par les deux modèles pour une culture de blé et la comparaison aux observations.

Comme on pouvait s'y attendre ORCHIDEE donne de mauvais résultats face 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 et les racines de STICS descendent beaucoup plus profondément dans le sol que celles d'ORCHIDEE. Ceci conduit à une sous-estimation du flux de transpiration dans ORCHIDEE, on a donc décidé également de forcer le profil racinaire dans 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.

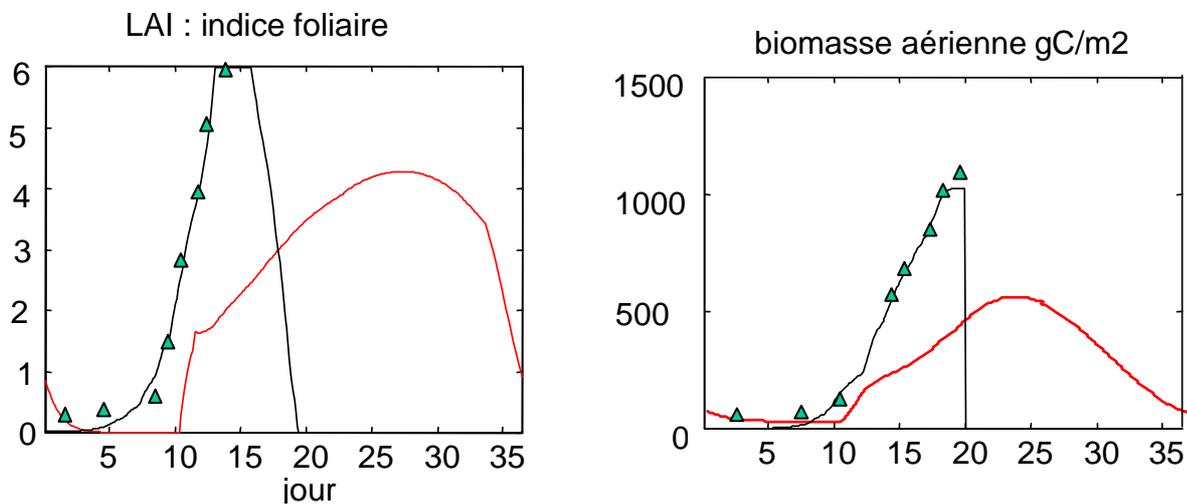


Figure 18 : Indice foliaire et biomasse aérienne (gC/m<sup>2</sup>) simulés par les deux modèles et comparés aux observations pour une culture de blé.

Par contre, comme précisé plus haut **on a cherché à forcer un minimum de paramètres dans ORCHIDEE**. 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 19 montre les biomasse et 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. On voit donc maintenant que **pour deux types de cultures contrastées on obtient des simulation tout à fait correctes avec notre modèle hybride ORCHIDEE forcé par STICS**

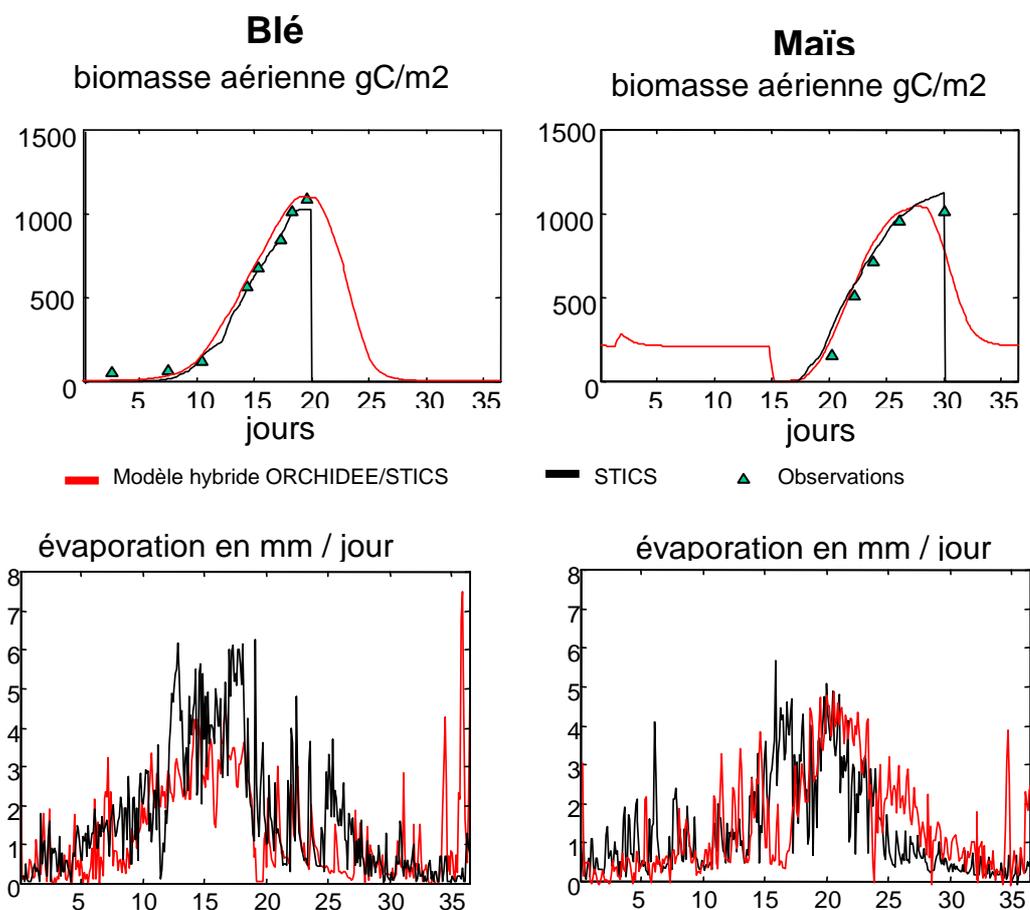


Figure 19: biomasse et évapotranspiration simulée par STICS et le modèle hybride pour un site de blé et un site de maïs.

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 20 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.

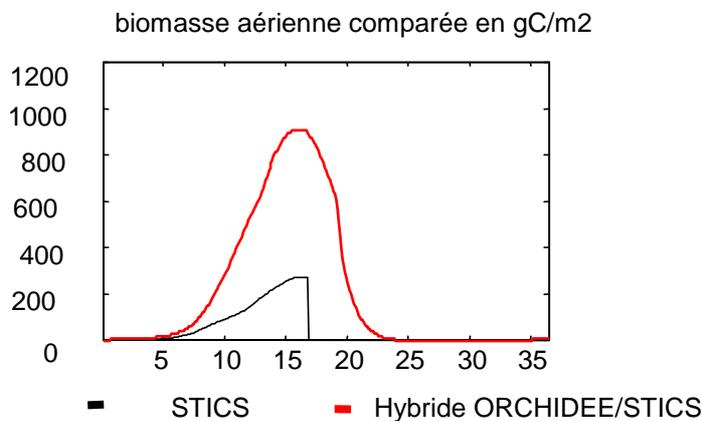


Figure 20: comparaison STICS et modèle hydrique sur un site non fertilisé

STICS simule un stress azoté, cette variable a alors été utilisée comme facteur réducteur de la photosynthèse dans le modèle hybride. La figure 21 montre le résultat de la simulation dans le cas où ce stress est pris en compte dans le modèle hybride, on parvient alors à simuler correctement la biomasse pour une culture non fertilisée.

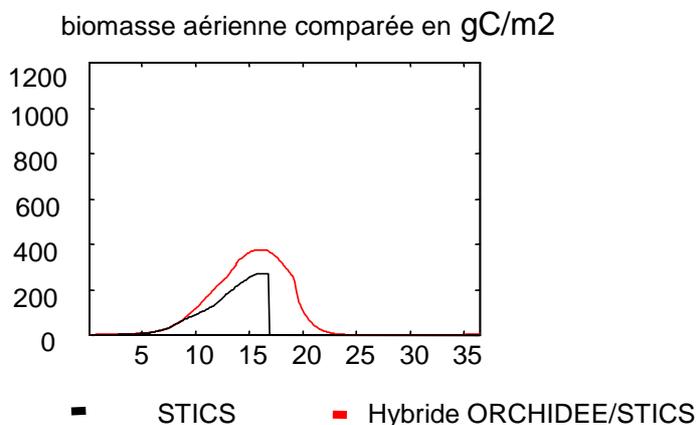


Figure 21: Comparaison STICS et modèle hybride sur le site non fertilisé après prise en compte du stress azoté

## **5- Conclusion et perspectives**

### **5.1. Modélisation inverse atmosphérique**

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 des stations continentales sont de l'ordre de grandeur de la moyenne des flux. Pour aller plus loin, il faut 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. 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 les modèles LMDZ et REMO qui ont une maille de 50km en Europe. En perspective, nous souhaitons appliquer 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.

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

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 variable climatiques, une meilleure représentation de la variabilité spatiale climatique en particulier liée à l'orographie. Ce nouveau jeu de donné à permis d'anticiper l'étude de la variabilité interannuelle des flux de CO<sub>2</sub> proposée qui a pu être réalisé sur ce jeu de données. Sur cet aspect une première simulation a pu être réalisée sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle. Les premier résultats sont encourageants et doivent se poursuivre par une analyse plus détaillée des résultats en particulier par une analyse des processus responsable de la variabilité des flux observés.

En ce qui concerne le volet sur l'amélioration des paramétrisations du modèle ORCHIDEE, cette année à permis de développer un modèle hybride entre ORCHIDEE et le modèle STICS pour les cultures qui, sur les sites étudiés, donne des résultats satisfaisants. La prochaine étape consistera à mettre point de façon opérationnelle ce modèle hybride et de constituer un jeu de données à l'échelle de la France des paramètres comme les itinéraires techniques. Il sera alors possible de réaliser une simulation pour l'ensemble des cultures de l'hexagone. Il est à noter qu'une étude similaire a été lancé pour la simulation des prairies cultivées et des forêts exploitées. Les résultats obtenus sur ces deux aspects seront décrits dans les rapports des deux projets GICC consacrés à ce sujet (GIES-PRAIRIE et CARBOFOR) auquel le LSCE participe.

## 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*, sous presse, 2001. **(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. Sous presse.* **(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*, sous presse, 2001. **(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%)**

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%)**

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

## 7. Disponibilité des données :

Les données issues des enregistrements du Puy de Dome 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 seront communiquées à l'Organisation Mondiale de la Météorologie à la fin du projet 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))

## **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. Les résultats de modélisation inverse peuvent faire l'objet d'une page spécifique du site internet avec les figures 2-3, et les résultats pour l'Europe de l'Article Bousquet et al. dans Science.