

**Les rétroactions « climat-carbone » associées aux rejets anthropiques de CO2  
à l'aide du modèle couplé de l'IPSL :  
un possible effet amplificateur?**

Depuis plus d'un siècle, la concentration en CO2 atmosphérique mesurée a augmenté de 25% passant de 280 ppmv en 1860 à 360 ppmv de nos jours. Cette augmentation serait environ deux fois plus forte si tout le CO2 émis par les activités humaines restait dans l'atmosphère ; environ la moitié de ce CO2 émis est capté par la biosphère et par l'océan. Comment réagissent ces puits à un changement climatique?

### **Le cycle du carbone**

Le cycle du carbone peut être très grossièrement schématisé comme suit: le carbone atmosphérique fixé par la biosphère ou par l'océan est relâché dans l'atmosphère quelques heures ou plusieurs millénaires plus tard selon les processus mis en jeu. Ainsi, en situation de quasi-équilibre, il y a environ autant de carbone fixé que relâché. Sur des constantes de temps de quelques siècles, et sans changement climatique notable, on observe effectivement une concentration de CO2 à peu près constante, donc des puits océaniques et biosphériques globalement nuls. Les processus régissant la fixation et le relâchement du carbone dépendant du climat, une variation de celui-ci entraînera une modification de la concentration de quasi-équilibre de CO2 . Sur des constantes de temps de plusieurs milliers d'années, les paléodonnées issues des carottes de glace nous montrent que la dépendance de la concentration de CO2 avec la température moyenne du globe est d'environ 20 ppmv/°C.

Aujourd'hui, l'accroissement du CO2 atmosphérique favorise la fixation du carbone par les plantes et l'océan (effet de fertilisation biosphérique et augmentation de l'échange diffusif air-mer). Ce carbone fixé étant relâché dans l'atmosphère avec un certain délai (nous nous intéressons ici aux période allant de l'année à quelques siècles), l'accroissement rapide de CO2 entretient une augmentation du flux net de carbone stocké par la biosphère et l'océan. Les puits de carbone tant biosphérique que océanique ont ainsi tendance à croître, ce qui explique que seule environ la moitié du CO2 relâché actuellement par l'homme dans l'atmosphère y reste.

Des études récentes ont montré que le changement climatique résultant de l'accroissement du CO2 pourrait réduire de façon significative l'efficacité de ces puits de CO2 , et donc pourrait introduire un effet amplificateur (une rétroaction positive) entre climat et cycle du carbone.

### **Modélisation couplée Climat-Carbone**

Le couplage climat-carbone à l'échelle globale a déjà été abordé à l'aide de modèles en boîte ou de modèles quasi-bidimensionnels simplifiés, notamment pour étudier les transitions entre périodes glaciaires et interglaciaires.

A l'IPSL, nous avons abordé cette question en couplant des modèles tridimensionnels du climat et du cycle du carbone, et en nous intéressant aux changements futurs liés aux activités humaines. Le modèle climatique est le modèle couplé atmosphère-océan IPSL-CM2. Il a été développé et mis au point par des équipes du LSCE, du LMD et du LODYC. Il est composé du modèle de circulation générale atmosphérique LMD-5.3 et du modèle de circulation générale océanique OPA7, ces deux modèles étant interfacés via le coupleur OASIS développé au CERFACS. Les modèles du cycle du carbone du LSCE sont CASA/SLAVE pour la partie biosphérique et HAMOCC3 pour la partie biogéochimie marine. Ces deux modèles sont forcés à partir de valeurs moyennes mensuelles de variables climatiques: le flux solaire, la température et la précipitation pour la biosphère, les flux de surface, les champs tridimensionnels de température, salinité, vitesse et diffusion verticale pour le modèle de biogéochimie océanique. La concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> est uniforme sur le globe et évolue une fois par an en fonction du bilan entre les sources anthropiques éventuelles et les puits biosphériques et océaniques calculés par les deux s du cycle du carbone.

La concentration en CO<sub>2</sub> pour l'année  $t+1$  est calculée par :

$$\text{CO}_2^{t+1} = \text{CO}_2^t + (\text{ANT}^t - \text{BIO}^t - \text{OCN}^t)/2.12$$

où  $\text{ANT}^t$  est le flux annuel de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique (lié à la combustion d'énergie fossile et à la déforestation),  $\text{BIO}^t$  et  $\text{OCN}^t$  sont respectivement les flux nets annuels échanges entre l'atmosphère et la biosphère et entre l'atmosphère et l'océan, avec  $\text{CO}_2^{t=0} = 286 \text{ ppmv}$ .

Souhaitant nous concentrer sur l'étude du couplage entre le climat et le cycle du carbone, le CO<sub>2</sub> est le seul gaz à effet de serre considéré, et pour la même raison les effets climatiques des aérosols ne sont pas pris en compte. En ce qui concerne les sources de CO<sub>2</sub> anthropique, nous prenons en compte les émissions liées à la combustion d'énergie fossile ainsi que celle liées à une modification de l'utilisation des sols. Par contre plusieurs phénomènes potentiellement importants n'ont pas été considérés vu leur très fortes incertitudes : modification de la répartition géographique des différents types de végétations (due à l'homme ou à la migration des espèces), effet de fertilisation biosphérique additionnel du à d'autres composants que le CO<sub>2</sub> ...

## Evolution récente

Une simulation de contrôle, sans émission anthropique de CO<sub>2</sub>, nous a permis de vérifier la stabilité du modèle, l'absence de dérive aussi bien du climat que du CO<sub>2</sub> pendant les 200 années de simulation. En parallèle, une simulation de l'évolution du climat et du CO<sub>2</sub> atmosphérique de 1860 à 2100 nous a permis de confronter nos résultats aux observations pour la période historique (1860-2000) et de simuler l'évolution future du climat et du cycle du carbone au XXI<sup>ème</sup> siècle. Pour cette simulation, les émissions de CO<sub>2</sub> utilisées sont fournies par le groupe GIEC, elle consistent en les observations pour la période historique et en le scénario SRES-A2 (assez proche de l'ancien scénario IS92-A) pour le XXI<sup>ème</sup> siècle.

La simulation reproduit très correctement l'évolution observée de la température moyenne du globe et de la concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> (figure 1). Le réchauffement simulé par le modèle est toutefois plus élevé que celui observé, très probablement du fait de la non prise en compte des aérosols. La variabilité interannuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique est bien reproduite et elle provient principalement des puits biosphériques. Ces puits sont principalement situés dans les régions tropicales, et sont très corrélés à l'oscillation australe ENSO. Nous avons pu vérifier de façon indépendante que les variations climatiques sur les continents associées à l'oscillation de type ENSO reproduisaient bien les observations actuelles, et que le modèle biosphérique reproduisait correctement la dépendance du puits de carbone à ces perturbations climatiques. A l'échelle de temps de la décennie, la variabilité de la biosphère domine encore légèrement, mais celle de l'océan n'est plus négligeable.

Parmi les diagnostics réalisés, nous en avons présentés ici quelques uns, très globaux, qui nous semblent illustrer la capacité de notre modèle à reproduire l'évolution du climat sur les 150 dernières années, aussi bien en termes de tendance que de variabilité inter-annuelle, et ainsi donner quelque crédibilité à l'étude des évolutions possibles dans le futur.

## **Evolution future**

Pour l'évolution future du CO<sub>2</sub>, utilisant le scénario SRES-A2. Les résultats que nous montrons ici vont jusqu'à l'année 2100 (figure 1). L'augmentation simulée du CO<sub>2</sub> atmosphérique est proche, quoique légèrement plus faible, de celle calculée pour le GIEC avec le modèle simplifié de Bern (en 2100, nous avons 770 ppmv par rapport à 820 pour Bern). Ceci est dû au puits biosphérique, plus important dans notre simulation (en 2050, 4GtC/an par rapport à 3), les puits océaniques étant très proches (en 2050, 5.5 GtC/an par rapport à 5.4). On constate également une saturation claire du puits biosphérique: à partir de 2040-2050 et jusqu'en 2100 il sature à peine plus de 4GtC/an. En ce qui concerne la variation géographique de ces puits biosphériques, on peut remarquer figure 2-a une augmentation générale dans les régions couvertes de végétation, à l'exception notable de l'Amazonie où le puits baisse significativement. Nous y reviendrons plus loin.

Comme nous considérons ici le CO<sub>2</sub> comme seul gaz à effet de serre, le forçage radiatif est environ 40 % plus faible que si tous les gaz étaient pris en compte. Nous obtenons bien que l'augmentation de la température moyenne du globe de notre simulation est sensiblement plus faible que la moyenne des simulations réalisées avec le scénario IS92A. Nous retrouvons les résultants considérés maintenant comme classiques : augmentation de la température de surface plus fortes aux hautes latitudes qu'aux basses, plus fortes sur les continents et la glace de mer que sur les océans... Les précipitations augmentent dans les régions équatoriales et aux moyennes et hautes latitudes tandis qu'elles augmentent peu ou diminuent dans les régions subtropicales (voir figure 3, pages couleur). Comme autre changement climatique significatif signalons la décroissance du volume de la glace de mer en Arctique de 35 % en 2050, une telle décroissance ne se retrouvant pas en Antarctique.

### **Impact du changement climatique sur le cycle du carbone**

Les simulations ci-dessus ont été réalisées en couplant le modèle climatique aux modèles de carbone. Les modèles de carbone dépendent du climat, le climat dépendant lui-même du CO<sub>2</sub> atmosphérique et donc des modèles de carbone. Pour estimer l'effet de ce couplage, nous avons réalisé une simulation avec émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> mais dans laquelle les modèles de carbone sont forcés par un "climat constant", c'est à dire. un climat non perturbé par les émissions anthropique de CO<sub>2</sub> (dans la pratique on prend le climat de la simulation de contrôle évoquée précédemment). On peut remarquer (figure 4-a) que dans ce cas, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique est plus faible que dans le cas couplé, c'est à dire. que les puits naturels sont plus élevés. A l'horizon 2050, le puits océanique est peu modifié alors que le puits biosphérique est nettement plus important (figure 4-b et c). Lorsque l'on ne tient pas compte du changement climatique dû à l'accroissement de CO<sub>2</sub>, le puits biosphérique augmente dans toutes les régions couvertes de végétation, sans exception (figure 2-b) : c'est l'effet de fertilisation du CO<sub>2</sub>. La prise en compte du changement climatique réduit le puits biosphérique principalement dans les régions équatoriales et tropicales d'Afrique et d'Amérique, alors qu'il a plutôt tendance à augmenter dans les hautes latitudes (figures 2-c). Dans les basses latitudes, la croissance des plantes est principalement limitée par la disponibilité en eau. La réduction du puits biosphérique dans ces régions provient principalement d'une contrainte hydrique plus forte due à une augmentation de l'évaporation. Aux hautes latitudes la croissance des plantes est principalement limitée par la température; son augmentation leur permet au contraire un meilleur développement.

Dans les régions tropicales, l'effet climatique dû à l'accroissement de CO<sub>2</sub> peut réduire très fortement les puits biosphériques et annuler voire dépasser l'effet de fertilisation des plantes dû à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ceci explique pourquoi, dans la simulation scénario couplée climat-carbone, le puits biosphérique soit augmente peu, soit diminue dans certaines régions d'Afrique et d'Amérique équatoriale. Cela explique également la saturation du puits biosphérique à partir des années 2040-2050 :

l'effet climatique néfaste aux écosystèmes tropicaux est tellement large qu'il compense globalement l'augmentation du puits liée à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

### **Biosphère et océan se renvoient le carbone**

En ce qui concerne l'absence de changement notable du puits de carbone océanique, nous avons pu mettre en évidence que c'est le résultat de deux perturbations qui se compensent. Le changement climatique diminue sensiblement le puits océanique, pour un taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique donné. Mais nous venons de voir que le puits biosphérique se réduit assez fortement du fait du changement climatique, entraînant une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Cette augmentation accroît les flux de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère vers l'océan, et donc accroît le puits océanique. Et il se trouve qu'à l'horizon 2050, ces 2 effets se compensent presque totalement. Mais l'océan sommeille pour probablement mieux se réveiller ensuite... En effet, un autre jeu de simulations réalisé avec les mêmes modèles, mais dans lequel les modèles climatiques et de carbone n'étaient pas directement couplés, révèlent qu'au delà d'un doublement du CO<sub>2</sub> par rapport à l'époque pré-industrielle, le changement climatique diminue assez fortement le puits de carbone océanique. Lorsque la concentration atteint 4 fois la valeur pré-industrielle, le changement climatique diminue le puits océanique de 35 % et le puits biosphérique de 55 %. De fait, le puits océanique simulé ici semble effectivement commencer à saturer vers la fin de la simulation (années 2090-2100).

### **Une inconnue à long terme**

Pour étudier l'évolution future du climat sous l'effet des émissions anthropiques des gaz à effet de serre, la démarche usuelle –telle celle utilisée par le GIEC/IPCC- est la suivante :

- (1) Estimation des émissions à partir de différents scénarios d'émission
- (2) Calcul de l'évolution des puits naturels et de la concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>
- (3) Calcul de l'évolution du climat correspondant

Dans une telle démarche, on néglige la dépendance des puits de CO<sub>2</sub>, et donc du CO<sub>2</sub> atmosphérique, vis-à-vis du climat. A l'horizon 2100, le CO<sub>2</sub> atmosphérique est environ 20 % plus élevé si l'on tient compte de ce couplage que si l'on en tient pas compte. Cet accroissement supplémentaire de CO<sub>2</sub> induit un accroissement du changement climatique également d'environ 20 %. Nous avons pu montrer à partir de simulations complémentaires dans lesquelles le climat et le cycle du carbone n'étaient pas directement couplés, que cet effet de couplage devrait continuer à croître et atteindre 20 à 25 % en cas de quadruplement du CO<sub>2</sub>. Cet impact du changement climatique sur le cycle du carbone n'est pas du tout uniformément réparti sur le globe. Si les régions des hautes latitudes voient leur puits de carbone s'accroître, celui-ci diminue dans toutes les régions équatoriales et tropicales.

Dans cette étude nous avons volontairement négligé de nombreux phénomènes, dont la migration des espèces végétales. La seule autre simulation couplée climat carbone qui utilise des modèles de circulation générale, réalisée par le Hadley Center, prend en compte ce phénomène et aboutit à des résultats beaucoup plus dramatiques que les nôtres. Si de nombreuses incertitudes demeurent, il est toutefois clair que dès à présent, on ne peut négliger l'impact que le changement climatique aura sur l'évolution à long terme des puits naturels de carbone.

Contact : Henri Dufresne  
LMD -UMR 8359 ,  
(CNRS, Ecole Polytechnique, ENS, et Univ. P. et M. Curie)  
Ecole Polytechnique  
91128 Palaiseau cedex  
dufresne@icess.ucsb.edu

Pierre Friedlingstein  
LSCE - UMR 1572 (CEA-CNRS)  
Ce Saclay Bât. 701  
91191 Gif sur Yvette  
pierre@lsce.saclay.cea.fr

Figure 1 - Evolution de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique (en haut) et de la température de surface moyenne du globe (en bas) de 1860 à 2050, telle que simulée par le modèle couple climat-carbone de l'IPSL. Les émissions de CO<sub>2</sub> correspondent à des estimations de 1860 à nos jours, au scénario SRES98-A2 du GIEC/IPCC à partir de 2000. Nous avons également tracé en pointillé une estimation de ces deux valeurs à partir d'observations, et en tirets longs ces grandeurs pour la simulation de contrôle. Remarque : le CO<sub>2</sub> étant le seul gaz à effet de serre pris en compte, la variation de la température de surface du globe est inférieure à ce qu'elle serait si l'ensemble des à effet de serre étaient pris en compte (voire texte).

Figure 2 - (a) Différence du puits biosphérique entre les années 2050 et celles 1860 calculée avec le modèle couplé climat-carbone. (b) Différence du puits biosphérique entre les années 2050 et celles 1860 calculée en supposant que le climat n'est pas influencé par les rejets anthropiques de CO<sub>2</sub> . (c) En 2050, effet du changement climatique dû aux rejets anthropiques du CO<sub>2</sub> sur le puits de carbone biosphérique.

Figure 3 - Changement de température et précipitation entre 1850 et 2050, simulé à l'aide du modèle couplé Climat - Carbone de l'IPSL. Comme nous considérons ici le CO<sub>2</sub> comme seul gaz à effet de serre, le forçage radiatif est environ 40 % plus faible

que si tous les gaz étaient pris en compte. Nous obtenons bien que l'augmentation de la température moyenne du globe de notre simulation est sensiblement plus faible que la moyenne des simulations réalisées avec le scénario IS92A. Nous retrouvons les résultants considérés maintenant comme classiques : augmentation de la température de surface plus fortes aux hautes latitudes qu'aux basses, plus fortes sur les continents et la glace de mer que sur les océans... Les précipitations augmentent dans les régions équatoriales et aux moyennes et hautes latitudes tandis qu'elles augmentent peu ou diminuent dans les régions subtropicales.

*Temperature and precipitation change between 1850 and 2050, simulated by the couple IPSL climate Carbone model.*

Figure 4 - Evolution de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique (fig. a), du puits biosphérique (fig. b) et du puits océanique (fig. c) calculée en tenant compte du couplage entre climat et cycle du carbone (ligne continue) ou en supposant que le climat n'est pas modifié par l'augmentation de CO<sub>2</sub>.