



Ce que l'on sait,
Ce que l'on ne sait pas, et
Comment l'on fait pour mieux
comprendre **le changement global**

Introduction aux questions, défis
et méthodes de la recherche à l'usage
des projets scolaires CarboSchools





Ce que l'on sait Ce que l'on ne sait pas Et comment l'on fait pour mieux comprendre le changement global

Introduction aux questions, défis et méthodes de la recherche
à l'usage des projets scolaires CarboSchools



Cette brochure a été financée par le Sixième Programme-cadre de recherche et développement de l'Union européenne:

Projets intégrés CarboEurope (contrat GOCE-CT-2003-505572) et CarboOcean (contrat 511176-2)
DG Centre commun de recherche de la Commission européenne

CarboSchools: Partenariats chercheurs-enseignants sur le changement climatique

CarboEurope et CarboOcean sont deux projets de recherche européens de grande envergure dont l'objectif est de mieux comprendre l'impact de l'activité humaine sur l'avenir de notre habitat commun, la Terre. A ce titre, nous avons une obligation non seulement contractuelle, mais également morale, de participer au débat public sur le changement climatique en partageant les résultats de nos recherches avec le plus grand nombre.

En tant que citoyens et décideurs de demain, les jeunes sont particulièrement concernés et affectés par les changements environnementaux. Pour pouvoir faire leurs choix futurs de manière pleinement informée, il leur faut acquérir les connaissances de base nécessaires à la compréhension des phénomènes en jeu et des avancées scientifiques.

Dans cette perspective, CarboEurope et CarboOcean se sont associés au Centre commun de recherche de la Commission européenne pour soutenir l'initiative *CarboSchools*, qui promeut la mise en place de partenariats entre chercheurs, enseignants du secondaire et leurs élèves. A travers des projets communs, ces partenariats visent à encourager:

- un apprentissage des sciences fondé sur l'expérience pratique et les découvertes les plus récentes,
- des approches interdisciplinaires novatrices,
- une mise en débat du changement climatique à partir des résultats des recherches,
- la recherche de solutions à la fois au plan individuel et dans le contexte européen.

Afin de contribuer à la mise en place de partenariats durables entre établissements scolaires et laboratoires de recherche, CarboEurope et CarboOcean :

- participeront à la mise en place de projets pilotes,
- reconnaîtront explicitement que l'engagement de leurs collègues scientifiques dans des projets scolaires fait partie intégrante de leur mission,
- encourageront les étudiants en doctorat à participer à des projets de partenariat au titre de leur formation de futurs chercheurs,
- contribueront, via le site www.carboschools.org, au développement et à la mise à disposition de ressources destinées à des projets scolaires.



Ernst-Detlef Schulze

*Coordinateur
CarboEurope*



Annette Freibauer

*Scientific officer
CarboEurope*



Christoph Heinze

*Coordinateur
CarboOcean*



Andrea Volbers

*Scientific officer
CarboOcean*



Manfred Grasserbauer

*Directeur
Institut de l'environnement
durable du CCR*



Que trouverez-vous dans ce livret ?



De nombreux documents de grande qualité présentent ce que l'on sait du changement climatique: celui-ci vous propose de découvrir *ce que l'on ne sait pas et comment font les chercheurs pour mieux comprendre ce phénomène*, en général et dans le cadre de deux grands programmes européens en cours.

Toute personne s'intéressant à la recherche sur le climat y trouvera donc des informations utiles. Mais ce livret est avant tout proposé comme un outil au service des enseignants du secondaire souhaitant engager sur ce sujet *un projet interdisciplinaire* au sein de leur établissement. L'enjeu n'est dès lors plus seulement d'informer ou de transmettre du savoir, mais d'aider à faire naître chez les jeunes *le questionnement, l'envie de comprendre, et le désir de construire un avenir* qui nous permettra de relever le défi du changement global.

C'est pourquoi nous mettons ici l'accent non pas sur les connaissances en elles-mêmes, mais *sur la façon dont on construit de nouvelles connaissances par la démarche scientifique*. La force pédagogique de la démarche de projet est ensuite de mobiliser les contenus disciplinaires, ainsi renforcés dans leur articulation et leur sens aux yeux des élèves, pour apporter les savoirs et les notions indispensables à une véritable compréhension des problématiques soulevées.

Le changement global met au défi nos schémas de pensée et de prise de décision. Nous devons apprendre à penser et à agir dans la complexité, les systèmes, la globalité et les interdépendances. C'est pourquoi ce livret tente d'illustrer:

- *le caractère interdisciplinaire de la recherche* (en opposition au découpage traditionnel des sciences en spécialités)
- *la nécessité de faire l'effort d'une vue d'ensemble* (en opposition à la tendance à se concentrer sur les détails)
- *les différents degrés d'incertitude* (en opposition à l'image d'une science synonyme de vérité)
- *le caractère souvent chaotique de la construction du savoir*, qui n'est pas linéaire et laisse une place centrale au hasard et à la créativité
- *le lien organique* entre les problèmes globaux, les décisions collectives et les choix quotidiens de chacun.

Bons projets à toutes et à tous !

Philippe Saugier
Coordinateur CarboSchools



Arwyn Jones, pédologue à l'institut de l'environnement durable du CCR, explique les activités liées au changement climatique lors de journées portes ouvertes en mai 2004, qui ont rassemblé plus de 1400 jeunes visiteurs des écoles secondaires des environs d'Ispra.

© JRC-IES



Sommaire

Ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas

9

En 17 pages, tour d'horizon de la recherche sur le changement global: les grandes questions et les principales façons de chercher des réponses.

1. *Prédire l'avenir ?*
2. *Les grandes questions sur les processus naturels*
3. *La question urgente sur le carbone: les « puits naturels »*
4. *Comment fait-on pour répondre à ces questions ?*
5. *Que fait-on pour résoudre le problème ?*

CarboEurope

26

De 2004 à 2008, plusieurs centaines de chercheurs de 17 pays européens tentent de dresser le bilan de carbone du continent: en cinq pages, vue d'ensemble de ce grand programme scientifique international sur le cycle du carbone.

1. *Quels sont nos objectifs ?*
2. *Sur quoi s'appuie-t-on ?*
3. *Comment procède-t-on ?*

CarboOcean

31

L'équivalent de CarboEurope, mais pour le cycle du carbone océanique. De 2005 à 2009, une armada de navires océanographiques, de cargos équipés d'instruments de mesures, de bouées, d'expériences sous-marines, etc., sillonnent les mers du globe dans un effort sans précédent d'observation et d'analyse du cycle du carbone océanique.

1. *Quels sont nos objectifs ?*
2. *Sur quoi s'appuie-t-on ?*
3. *Comment procède-t-on ?*

La recherche en action : deux exemples sur le terrain

37

Expérimentations sur une île méditerranéenne et dans un fjord norvégien

1. *Pianosa, une île au trésor scientifique*
2. *Mésocosmes: des mini-mondes marins expérimentaux pour simuler l'avenir*

Ressources de base sur internet

Où trouver ce que vous ne trouverez pas dans ce document ?

Pour vous informer sur l'effet de serre et le changement climatique en général:

Il existe une grande variété de documents qui introduisent le problème, dans de nombreuses langues, en grande partie disponibles sur internet. Certains sont objectifs, d'autres plus ou moins partisans. Pour une approche neutre et exhaustive, la Convention des Nations Unies sur le changement climatique met à disposition plusieurs publications introductives très bien faites:

www.unfccc.int, cliquer sur « essential background » puis sur « background publications »

Lien direct: http://unfccc.int/essential_background/background_publications_htmlpdf/items/2625.php
(voir en particulier « climate change information kit », disponible en français, anglais, allemand, espagnol et russe)

Nous vous recommandons également le site environnement de l'UE pour les jeunes (multilingue), où vous trouverez une introduction aux questions climatiques (entre autres) http://europa.eu.int/comm/environnement/youth/index_en.html, ainsi que le site Manicore, qui a l'immense intérêt au plan pédagogique d'être structuré sous la forme de questions et particulièrement agréable à lire (en français et en anglais) http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/index.html

Pour vous informer sur les données scientifiques du problème:

Les rapports du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat) sont les sources de référence mondiales sur le sujet.

Nous vous recommandons la synthèse grand public du dernier rapport en date, celui de 2001, proposée par la Fondation internationale GreenFacts: <http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/index.htm> (disponible en français, anglais, espagnol et allemand)

Vous pouvez également prendre l'information à la source en téléchargeant le « résumé à l'attention des décideurs » et les résumés des 3 groupes de travail du rapport 2001: www.ipcc.ch (disponible en anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe). Ces résumés s'adressent à un public non scientifique, mais la complexité du problème et la densité des informations les destinent à des lecteurs déjà bien initiés.

Pour vous informer sur l'actualité scientifique:

Tous les nouveaux articles parus dans la presse spécialisée, toutes les découvertes sont présentées dans un langage accessible à tous sur www.ghgonline.org (en anglais seulement).

Vous trouverez facilement, depuis un moteur de recherche, de multiples glossaires sur le changement climatique. Nous vous recommandons notamment celui de la Fondation GreenFacts:

<http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/toolboxes/glossary.htm> (en français)

http://www.greenfacts.org/studies/climate_change/toolboxes/glossary.htm (en anglais)

Pour aborder les connaissances et les notions en jeu:

Encyclopédie sur le climat ESPERE: www.espere.net (français, anglais, allemand, espagnol, norvégien, polonais, hongrois, partiellement portugais)

Pour un exemple des gestes que chacun peut faire au quotidien:

<http://www.climnet.org/publicawareness/index.htm> (espagnol, français, allemand et anglais)

Quelques autres outils (en anglais seulement):

Sur la recherche: www.exploratorium.edu/climate/ et <http://climate.nms.ac.uk/>

Sur les effets du problème: carte du monde des manifestations constatées du changement climatique:

<http://www.climatehotmap.org/>

Pour calculer vos émissions de CO₂, celle de votre famille, de votre lycée, etc.:

<http://www.co2.org/calculator/index.cfm> et <http://www3.iclei.org/co2/co2calc.htm>



Ce que l'on sait et ce que l'on ne sait pas

Les grandes questions et la recherche sur le changement global

« Notre connaissance de la structure et du fonctionnement des écosystèmes terrestres n'est pas développée à un degré suffisant pour pouvoir comprendre (et encore moins prédire) les conséquences du changement climatique, que ce soit sur les écosystèmes eux-mêmes comme sur les interactions atmosphériques dont ils sont l'objet. »

(Programme international géosphère-biosphère, 1991)



Gros plan sur le glacier de Briksdal, situé dans le parc national du glacier de Jostedal, en Norvège

© Atle Nesje, Département des sciences de la Terre de l'université de Bergen et Centre Bjerknes de recherche climatique, Norvège

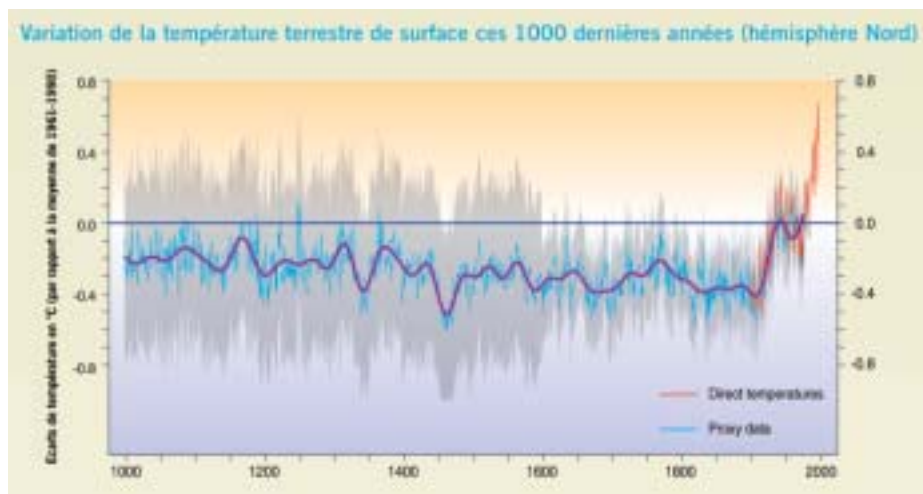
1. Prédire l'avenir ?

Nous savons déjà beaucoup de choses...

Nous avons aujourd'hui la certitude que des modifications du climat sont en cours à l'échelle planétaire, et que ces modifications sont en particulier caractérisées par:

- une augmentation moyenne *observée* de la température de 0,6° C par rapport au début du 20^e siècle, avec la période 1990-1999 comme décennie la plus chaude ;
- une augmentation moyenne *observée* de la concentration de plusieurs gaz à effet de serre¹ dans l'atmosphère, en particulier le gaz carbonique, dont le taux est passé de 280 à 370 ppm² entre 1750 et 2000 ;
- la brutalité des *changements constatés* par rapport aux échelles géologiques, avec une ampleur et une rapidité sans précédent depuis au moins 10.000 ans.

De plus, tout nous porte à croire que ces modifications actuelles du climat, contrairement à des phénomènes naturels comme les glaciations, sont *d'origine humaine*. L'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère provient des combustibles fossiles (pétrole, charbon) utilisés depuis le début de l'ère industrielle, ainsi que des changements à grande échelle dans l'utilisation des terres (en particulier la déforestation dans les régions tropicales). D'autres augmentations de gaz à effet de serre, comme le méthane ou l'oxyde d'azote, portent aussi de façon irréfutable la marque des activités humaines au cours des 200 dernières années.

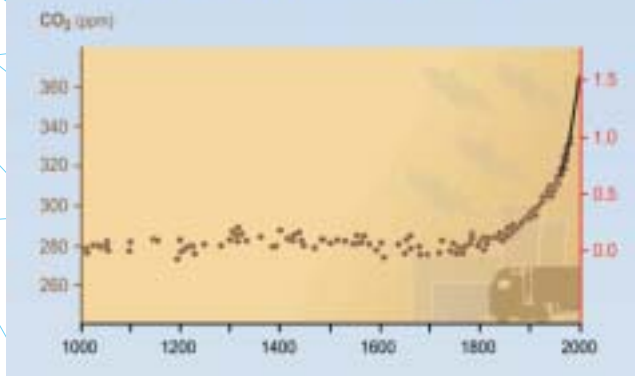


© Intergovernmental Panel for Climate Change

1) Les gaz à effet de serre jouent un rôle fondamental pour maintenir la température de la Terre à un niveau favorable à la vie. Sans eux, la température moyenne serait de -18°C au lieu des +15°C actuels. Mais davantage de gaz à effet de serre entraîne plus ou moins directement une augmentation de la température moyenne.

2) ppm = parties par million: unité de volume utilisée pour exprimer une proportion d'un élément présent en toutes petites quantités (ici le CO₂) dans un ensemble plus vaste (ici l'atmosphère). 370 ppm (soit 0,037%) signifie que dans un million de cm³ d'air (soit 1 m³) il y a 370 cm³ de CO₂ pur.

Variation du CO₂ atmosphérique ces 1000 dernières années

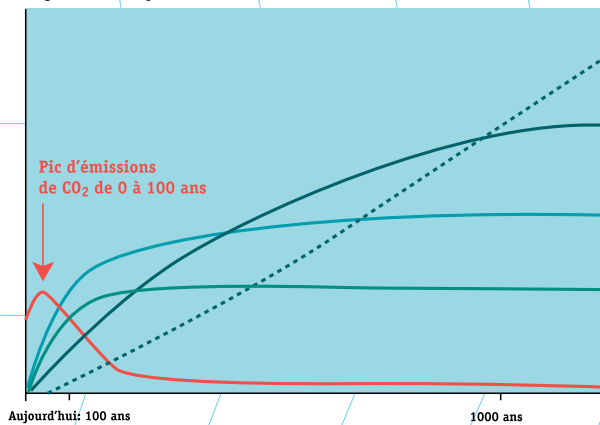


© Intergovernmental Panel for Climate Change

Nous savons aussi qu'en raison de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et de l'inertie du système, ces modifications vont se poursuivre et s'accroître au cours des prochains siècles, même si nous stoppons aujourd'hui toutes les émissions.

La concentration en CO₂, la température et le niveau de la mer continuent à augmenter bien après la réduction des émissions.

Magnitude de la réponse



Temps nécessaire pour atteindre un équilibre

Augmentation du niveau de la mer causé par la fonte des glaces: plusieurs millénaires

Augmentation du niveau de la mer causé par la dilatation thermique: plusieurs siècles, voire millénaires

Stabilisation de la température: quelques siècles

Stabilisation du CO₂: de 100 à 300 ans

Emissions de CO₂

© Intergovernmental Panel for Climate Change

...mais nous en ignorons bien davantage

Le monde entier se pose une question pressante: comment la situation va-t-elle évoluer ? Cette question toute simple représente au plan scientifique un défi colossal. De toute évidence, *nos connaissances actuelles sont très insuffisantes* pour pouvoir prédire avec précision l'évolution et les conséquences de ces changements climatiques. Ce que nous pouvons affirmer, c'est qu'au cours du 21^e siècle la température moyenne va encore s'élever ; mais impossible de dire si ce sera plutôt de un ou six degrés³ ... et cela change tout !

Quant aux *conséquences* de ce réchauffement, ce n'est pas mieux. Nous savons qu'il va dilater les océans et intensifier les précipitations (neige et pluie), mais là encore, impossible à dire dans quelle mesure. De même, nous ne savons toujours pas avec certitude si le réchauffement va intensifier les phénomènes extrêmes (tempêtes et cyclones).

Nous nous interrogeons également sur le risque de *réactions surprises* du système climatique, liées au franchissement de certains seuils. C'est le principe de l'élastique: tant qu'on tire

dessus sans dépasser un certain niveau de tension, l'élastique tient et peut revenir dans sa position initiale, mais si la tension dépasse sa résistance, il casse définitivement. Par exemple, certains craignent que le réchauffement entraîne un jour l'interruption du Gulf Stream, et donc un refroidissement généralisé sur l'Europe. C'est le scénario qui a inspiré le film « Le jour d'après », qui, bien qu'extrêmement romancé, recèle une petite part de possible... Mais si nous soupçonnons l'existence de tels seuils, nous ignorons où ils se situent.

Et ce n'est pas tout: *le changement n'est pas régulier sur la surface terrestre*, ce serait trop facile ! Par exemple, le réchauffement moyen actuellement observé dans

les Alpes est de 1 degré (voire de 2 en certains endroits) au lieu de 0,6 de moyenne planétaire. Or, ce que nous avons tous besoin de savoir, hormis la tendance générale, c'est ce qui va se passer *là où nous vivons*. A l'heure actuelle, on ne peut vraiment pas répondre de façon précise. Tout au plus parvient-on à dessiner des tendances, mais selon les projections, elles sont parfois contradictoires

3) D'après l'état de nos connaissances en 2005, une augmentation inférieure à 1,5 degrés semble très peu probable, voire impossible. L'objectif majeur des négociations internationales est de rester en deçà de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels.



L'acidification des océans: la face cachée de l'iceberg ?

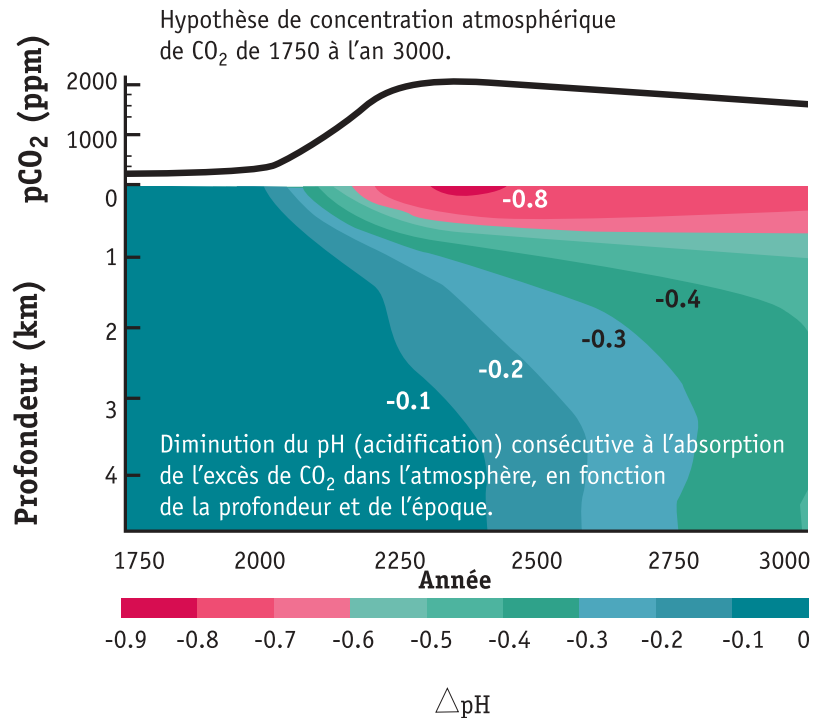
Le réchauffement n'est qu'un niveau de conséquences: celui de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère – c'est à dire dans l'enveloppe gazeuse de la Terre. Mais c'est l'ensemble du système qui est perturbé, pas seulement sa couche protectrice ! Ainsi, plus de la moitié du CO_2 que nous rejetons dans l'air part dans les océans et la végétation ; grâce à cela, le réchauffement est d'ailleurs bien moindre que si la totalité de nos émissions s'accumulaient dans l'atmosphère. On dit souvent que la nature nous « aide » en atténuant ainsi les effets néfastes de nos perturbations. Mais ce n'est pas sans conséquences sous l'eau: plus l'océan absorbe de CO_2 , plus il est acide.

Au-delà d'un certain seuil d'acidité, les organismes contenant du carbonate de calcium, comme les coraux, les mollusques, les crustacés et le phytoplancton, se trouvent en danger. L'acidification des océans menace ainsi la survie d'un grand nombre d'espèces marines et finalement l'ensemble de la chaîne alimentaire.



Lophelia pertusa, le principal corail d'eau profonde, est menacé par l'acidification des océans.

© Ifremer



© Caldeira & Wickett (2003, Science)

Ainsi, nous savons que :

- A ce jour, les émissions humaines de CO_2 ont déjà entraîné une baisse moyenne de 0,12 unités de pH dans les eaux de surface.
- A l'horizon 2100, si les émissions de CO_2 continuent d'augmenter au rythme actuel, le pH baissera inéluctablement pour atteindre 0,5 unités en dessous du niveau préindustriel, une acidité sans précédent depuis plusieurs dizaines de millions d'années à une rapidité 100 fois plus élevée que cela n'a jamais été observé.
- Des dizaines de milliers d'années seront nécessaires à la chimie océanique pour retourner à l'état préindustriel – si tant est que les concentrations atmosphériques devaient également diminuer. L'acidification des océans est irréversible à l'échelle des générations humaines. A un tel rythme, nous avons de sérieuses raisons de craindre que de nombreuses espèces n'aient pas le temps de s'adapter, en particulier celles, comme les récifs coralliens, dont le cycle de croissance est le plus lent, avec des conséquences graves sur les milieux

qu'ils abritent. Contrairement au réchauffement planétaire, dont à la fois l'ampleur (+1 ou +6 degrés en 2100) et les conséquences sont incertaines, seuls les effets de l'acidification sont vraiment discutés. Son ampleur (en surface, 0,5 unités de pH en moins en 2100 si l'on poursuit les émissions au rythme actuel), liée à des phénomènes chimiques bien connus, est estimée avec un grand niveau de confiance.

Ainsi, le réchauffement n'est peut-être que la « partie émergée » de l'iceberg, celle que l'on observe directement, et que l'on va directement subir dans nos vies d'être humains terrestres. Les

perturbations dans le milieu marin, moins directement visibles, pourraient être d'une ampleur équivalente. Dans quelle proportion et de quelle façon, nul ne le sait encore ; mais ce qui est certain, c'est qu'il nous faut cesser de réfléchir de manière compartimentée, en considérant l'océan indépendamment de l'atmosphère, en se réjouissant de l'aide généreuse qu'il nous apporte en épongeant nos excès de CO₂ et en n'incluant pas les conséquences sur les écosystèmes marins dans la balance des risques lors des prises de décision politiques.

CO₂, de l'air aux océans

Le CO₂ ne connaît décidément aucune frontière: non seulement il se répand sur toute la surface du globe et affecte tous les pays, gros comme petits pollueurs, mais il ne fait aucune distinction entre l'air et la mer. Il migre facilement entre ces deux milieux, qu'il cherche simplement à occuper le plus uniformément possible. Là comme partout ailleurs, la nature a horreur du vide et cherche l'équilibre: l'eau et l'air s'efforcent de contenir la même proportion de CO₂.

Mais s'il est relativement stable dans l'air au-dessus des océans, le CO₂ est en revanche l'objet de deux grandes familles de réactions dès qu'il pénètre dans l'eau :

1) Le CO₂ réagit avec les molécules d'eau et évolue vers d'autres formes de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer, les « carbonates » et « bicarbonates ». L'océan est un mangeur de CO₂ insatiable: comme il cherche en permanence à contenir autant de CO₂ que l'air, dès qu'il transforme du CO₂ en carbonate il a de nouveau « faim » de CO₂. Il en absorbe donc de nouveau et ainsi de suite jusqu'à atteindre un point d'équilibre entre les différentes formes de carbone dissous dans l'eau. Ce point d'équilibre varie en particulier en fonction du pH, c'est à dire de l'acidité de l'eau. Avec l'acidité actuelle, on trouve dans l'eau de surface environ 1% de CO₂ pour 99% de carbonates et bicarbonates.

La transformation chimique immédiate du CO₂ lorsqu'il pénètre dans l'eau détermine ce que l'on appelle la « capacité tampon » de l'océan – c'est à dire la capacité de l'eau à maintenir son pH à peu près à niveau constant lorsque le CO₂ pénètre dans la mer, à condition que les quantités absorbées ne soient pas perturbées par l'homme. Cependant, avec une atmosphère de plus en plus enrichie en CO₂ et un océan qui absorbe donc davantage de CO₂ qu'à son habitude, la capacité tampon de l'eau de mer se trouve affectée. L'eau ne résiste plus aussi bien aux changements de pH, entraînant la baisse du pH et donc l'acidification des océans.

2) Comme pour tous les autres végétaux, le CO₂ alimente la croissance du phytoplancton (plancton végétal). Les micro-algues qui sont à la base de toute la chaîne alimentaire marine « poussent » grâce à la lumière, au carbone et à de multiples autres nutriments. Lorsque le phytoplancton meurt ou est mangé, ses restes coulent vers les profondeurs. Et comme il est majoritairement composé de carbone, il permet à ce dernier de quitter les eaux de surface. En tombant vers le fond, les organismes morts sont décomposés en matière inorganique (reminéralisés) et le carbone revient sous forme de solution (dissous dans l'eau de mer). Les mouvements verticaux des masses d'eau ramènent une partie de ce carbone à la surface, mais une certaine proportion parvient toujours à atteindre les couches profondes et, finalement, les sédiments, où il se trouve alors stocké pour longtemps.

Cette consommation biologique du carbone ne s'arrête jamais ; elle est toujours active quelque part sur Terre. On considère qu'elle n'est guère affectée par l'augmentation du CO₂ atmosphérique: le carbone étant disponible pour la photosynthèse en de telles quantités dans l'eau, l'augmentation qui affecte les 1% présents sous forme de CO₂ dissous est supposée être sans effet perceptible. Toutefois, de récents résultats pourraient nous amener à en douter.



Deux grandes familles d'inconnues

Pourquoi est-il si difficile de prédire l'évolution du climat ?

Il y a, d'abord, les limites de notre compréhension des *phénomènes naturels* en jeu. Les activités humaines productrices de gaz à effet de serre sont connues. En revanche, les processus naturels qui libèrent, absorbent et emmagasinent ces gaz ne sont pas encore bien compris. La façon dont le carbone est transféré d'un réservoir naturel à un autre – le cycle du carbone – est très complexe, et l'on comprend encore mal comment ce cycle réagit aux perturbations humaines.

Mais nous sommes également confrontés à une autre immense inconnue: *l'avenir des sociétés humaines*. Comment la population mondiale va-t-elle évoluer ? Comment les pays les plus pauvres, qui aujourd'hui émettent encore très peu de CO₂, vont-ils se développer ? Comment les émissions vont-elles évoluer dans une économie qui sera de plus en plus limitée en charbon et en pétrole ? Quelles décisions seront prises à l'avenir par les responsables politiques pour limiter les émissions ? Parviendrons-nous peut-être, grâce à des technologies encore non inventées, à utiliser massivement des énergies qui n'émettent pas de gaz à effet de serre ? Autant de questions auxquelles il est bien sûr impossible de répondre à l'horizon d'un siècle.

On ne peut résoudre la plupart des inconnues liées à l'avenir des activités humaines ; c'est pourquoi on les traite dans le cadre de différents *scénarios socio-économiques* correspondant à différentes visions possibles de l'évolution de la population mondiale, de la croissance économique, des politiques environnementales, etc.⁴ En revanche, on peut à coup sûr progresser dans notre compréhension des phénomènes naturels.

Du corps humain à la planète Terre

Certains disent que notre connaissance de la planète Terre en est au même point que les médecins au début du 19^e siècle vis-à-vis du corps humain. A cette époque, on commençait à peine à comprendre la circulation sanguine, la respiration, le système nerveux, et à découvrir le fonctionnement des différents organes: les poumons, le cœur, le cerveau, l'appareil digestif, etc.

Et il est vrai qu'aujourd'hui notre compréhension de « l'organisme » planète Terre est très réduite. On sait quels sont les grands acteurs des cycles du vivant: l'oxygène, le carbone, l'azote, l'hydrogène pour l'essentiel. On sait aussi quels sont les principaux « organes »: les océans,

l'atmosphère, le monde végétal et le monde animal. Mais comment les uns voyagent-ils à l'intérieur des autres ? Qui gouverne qui, comment et pourquoi ?

On a longtemps cru, par exemple, que la végétation était esclave des facteurs physiques comme le rayonnement solaire, les précipitations, la température, etc. Mais en réalité, la végétation ne fait-elle pas elle-même partie d'un cycle et n'est-elle donc pas capable d'influencer en retour ces facteurs physiques ?

Nous ne pouvons pas encore vraiment répondre à ces questions fondamentales.

Nous avons bien sûr de multiples avantages sur les médecins du 19^e siècle: la précision des instruments de mesure, les images satellites, l'échange de données et d'idées, ainsi que la collaboration scientifique permanente à l'échelle planétaire, sans oublier la puissance des ordinateurs qui nous permettent de traiter toutes ces informations.

Mais nous avons d'immenses obstacles à surmonter :

- la planète est un « corps » drôlement encombrant et pas facile à ausculter. Pour aller d'un « organe » à l'autre, il nous faut souvent parcourir des milliers de kilomètres ! Et il est très difficile de « voir » les éléments des cycles du vivant et de les suivre dans leurs parcours. Par exemple, nous utilisons le carbone 14 (une isotope du carbone) pour suivre la trace des échanges de dioxyde de carbone entre les différents « organes », invisibles directement. Or, puisque le carbone 14 n'existe qu'en quantités infinitésimales – en moyenne 1×10^{-12} , c'est à dire un millième de milliardième du carbone contenu dans un échantillon –, des techniques très spécialisées sont nécessaires pour le mesurer. L'étude des *flux* (c'est à dire des déplacements de tous ces éléments à travers les sols, les plantes, les océans, les rivières, l'atmosphère, les animaux, etc.) est toujours une extrapolation plus ou moins hasardeuse à partir d'observations limitées dans le temps et l'espace, avec donc des niveaux d'incertitudes importants.
- nous n'avons *qu'une seule Terre* ! De tout temps la science expérimentale s'est construite sur la possibilité de tester et comparer des réactions pour démasquer les lois naturelles. Avec la Terre, impossible d'en prendre une d'un côté où l'on injecte du CO₂, où l'on attend 100 ans et où l'on regarde le résultat, et une autre où l'on maintient le CO₂ à son taux normal pour voir la différence...

4) Pour en savoir plus: les principaux scénarios retenus dans le cadre du 3^e rapport d'évaluation du GIEC sont présentés pages 10-11 du « résumé à l'attention des décideurs » disponible sur www.ipcc.ch

Comprendre le système dans sa globalité

Enfin, nous faisons face à une difficulté nouvelle dans l'histoire des sciences. Jusqu'à la Renaissance, les grands savants comme Léonard de Vinci pouvaient encore approcher l'ensemble des champs de la connaissance humaine – arts, philosophie, mathématiques, biologie, chimie, physique, histoire, etc. Mais avec l'accélération du progrès au cours des deux derniers siècles, l'organisation du savoir en disciplines s'est trouvée de plus en plus spécialisée.

Le problème, c'est qu'on ne peut comprendre le système dans sa globalité à travers le seul prisme des spécialités disciplinaires. Nous devons à la fois continuer à isoler certains éléments pour mieux les étudier et les relier entre eux comme ils le sont en réalité, pour tenter de comprendre leurs échanges. Avec le changement climatique, c'est toute l'interaction entre les sociétés humaines et l'ensemble du système Terre qui est en jeu. Il s'agit donc d'incorporer non seulement les spécialités des sciences de la Terre, mais également les sciences humaines. C'est une révolution du système de pensée, qui bouleverse nos repères et nous oblige à reconsidérer complètement nos systèmes de formation.

C'est notamment à partir de cette nécessité d'une vision globale qu'un scientifique anglais, James Lovelock, a imaginé la théorie de « Gaïa », selon laquelle la Terre est une sorte de macro-organisme au sein duquel les lois de la nature garantissent en permanence le rééquilibrage de tous les événements.

Cette théorie laisse espérer que le système finira forcément par se rééquilibrer. Mais on ne peut que s'inquiéter des quantités énormes de carbone fossile patiemment immobilisées au fil des âges géologiques et aujourd'hui relâchées brutalement. La nature seule n'aurait pas permis cela. Pourra-t-elle assurer un rééquilibrage de l'organisme dans des conditions toujours favorables à la survie de l'espèce humaine ?



Projet LBA Carbonsink – Tour micrométéorologique au cœur de la forêt amazonienne – Bassin amazonien, Brésil

© CarboEurope – John Grace

En bref: nous constatons que l'homme est en train de modifier brutalement et durablement le climat et les écosystèmes en perturbant des équilibres qui se sont lentement construits au cours des âges géologiques. Nous sommes en mesure d'en esquisser certaines conséquences, mais nous ne pouvons les prédire ni avec certitude ni avec précision, d'une part parce que nous comprenons encore mal la plupart des processus naturels en jeu, et d'autre part parce que l'avenir des activités humaines est imprévisible à long terme.



Tour micrométéorologique vue du ciel – Renon/Ritten, Italie

© CarboEurope – Stefano Minerbi



2. Les grandes questions sur les processus naturels

L'urgence est claire: progresser dans notre compréhension globale du système Terre.

Qui dit système naturel, dit actions/interactions/rétroactions continues. Il n'y a pas de début et de fin, mais des causes et des effets qui agissent en permanence les uns sur les autres. Un sacré casse-tête... Ainsi, les questions que nous nous posons sont elles-mêmes interdépendantes, donc formulables de multiples façons. Mais quel que soit le point de vue, on retrouve en gros les interrogations suivantes:



Soleil arctique – Expédition transarctique à bord du brise-glace suédois Oden

© Toste Tanhua, Institut des sciences marines de Leibniz, Université de Kiel, Allemagne

Comment le cycle du carbone réagit-il à l'augmentation du CO₂ atmosphérique ?

Comment les échanges de carbone se font-ils entre les différents « compartiments » du cycle (sédiments, sols, végétation, océans, organismes vivants, etc.) ? Comment ces différents compartiments réagissent-ils à l'augmentation du CO₂ atmosphérique ? Quelle est la capacité naturelle de la végétation et des océans à absorber l'excès de carbone que nous relâchons dans l'atmosphère ? La biodiversité influence-t-elle le stockage du carbone ? Quels types de gestion forestière et d'agriculture favorisent la séquestration du carbone ? (voir ci-après: « La question urgente sur le carbone : les puits naturels »)

Comment le cycle de l'eau réagit-il à l'augmentation de la température ?

La vapeur d'eau est le premier gaz à effet de serre naturel. Une plus grande évaporation va-t-elle entraîner davantage de vapeur d'eau dans l'air, donc davantage de nuages, davantage de précipitations, et ainsi à la fois moins de rayonnement solaire et plus d'effet de serre naturel ?

Comment le cycle de l'azote interagit-il avec les autres cycles et comment réagira-t-il aux perturbations humaines ?

L'azote (dont l'atmosphère est composée à 78%) est un élément fondamental de la vie, essentiel pour tous les êtres vivants, y compris les plantes. La disponibilité en azote est l'un des facteurs qui limite leur croissance: on enrichit les sols cultivés par des engrais azotés (d'où leur appellation de « nitrates ») pour augmenter les rendements. Mais que se passe-t-il lorsque l'atmosphère devient plus riche en CO₂ ? Les plantes font-elles davantage de photosynthèse, ou sont-elles de toute façon limitées par d'autres facteurs tels que la disponibilité en azote dans les sols ?

Comment les océans transportent-ils la chaleur, et comment la circulation océanique interagit-elle avec le réchauffement global ?

Comment les courants sont-ils affectés par le réchauffement global ? Quels en seront les effets sur le climat ? Doit-on craindre des changements irréversibles dans la régulation du climat planétaire par les océans ? Existe-t-il un risque de « surprises » liées à des événements à probabilité très faible, mais aux conséquences très graves ?



© CarboOcean

Comment les océans vont-ils évoluer dans un monde enrichi en CO₂ ?

L'acidification des océans, consécutive à l'absorption de fortes quantités de CO₂, va-t-elle perturber la chaîne alimentaire et entraîner la disparition de certaines espèces marines ? Ces perturbations écologiques vont-elles en retour affecter la capacité des océans à absorber le CO₂ atmosphérique ?

Quels sont les effets du changement climatique sur les différents écosystèmes, et quelles sont en retour les conséquences sur le climat ?

Comment les forêts, les zones humides, les champs cultivés, les prairies, etc. réagissent-ils au changement, sous différentes latitudes ? L'augmentation du CO₂ atmosphérique et de la température entraîne-t-elle davantage de photosynthèse, donc de stockage de carbone dans la végétation ? Quelles sont les conséquences sur le climat des changements importants d'utilisation de l'espace, tels que la déforestation ? Le réchauffement va-t-il entraîner la fonte du permafrost dans les régions arctiques, et si oui, ces sols vont-ils relâcher davantage de gaz à effet de serre et accentuer encore davantage le réchauffement ?



Plateau Rosa, Italie: l'une des plus hautes stations de surveillance atmosphérique du projet Aerocar

© CarboEurope – Francesco Apadula

Quels sont les impacts locaux et régionaux ?

Comment l'ensemble des changements (augmentation des températures, précipitations, etc.) vont-ils varier entre les différentes régions du monde ? Les Alpes seront-elles privées de neige ? Les régions méditerranéennes vont-elles se désertifier ? Comment nos ressources en eau vont-elles être affectées ? Que se passera-t-il si l'eau habituellement stockée sous forme de neige en hiver s'écoule directement dans les rivières ? Quelles seront les conséquences sur l'agriculture, l'alimentation et l'habitat ?

Doit-on craindre une augmentation des phénomènes extrêmes ? A quelles latitudes ?

Les tempêtes, les ouragans et les cyclones seront-ils plus fréquents et plus violents ? Les sécheresses et les inondations plus marquées ? Dans quelles régions ?

Bien sûr, nous disposons d'un début de réponse plus ou moins précis pour la plupart de ces grandes questions. Mais nous savons également que nous n'en aurons probablement jamais la totalité ! Dans ce domaine de recherche, où il restera toujours une part de doute, tout l'enjeu est donc de *réduire les incertitudes*. C'est essentiellement ce à quoi nous travaillons.



3. La question urgente sur le carbone : les « puits naturels »

Il y a une chose très étonnante: on ne retrouve dans l'atmosphère qu'environ 55% du CO₂ d'origine fossile (pétrole et charbon) que nous y rejetons. Les océans et la végétation absorbent tout le reste. On parle ainsi de « puits naturels » de carbone, qui atténuent (ou retardent) considérablement les effets négatifs des perturbations humaines dans l'atmosphère.

Toutefois, deux grandes questions nous tourmentent :

- Jusqu'à quand les océans et la végétation seront-ils capables d'absorber ainsi une part du carbone que nous rejetons dans l'atmosphère ?
- Que devient le CO₂ absorbé, et quels sont les effets de l'enrichissement en CO₂ sur les milieux concernés, en particulier les océans ?

En effet, si notre compréhension globale du rôle des puits naturels est bien établie, les incertitudes sont de taille quant aux quantités réellement absorbées, aux causes des fluctuations annuelles, à l'évolution future de ces puits et à leur vulnérabilité face à un enrichissement constant en CO₂.

Des quantités encore très imprécises

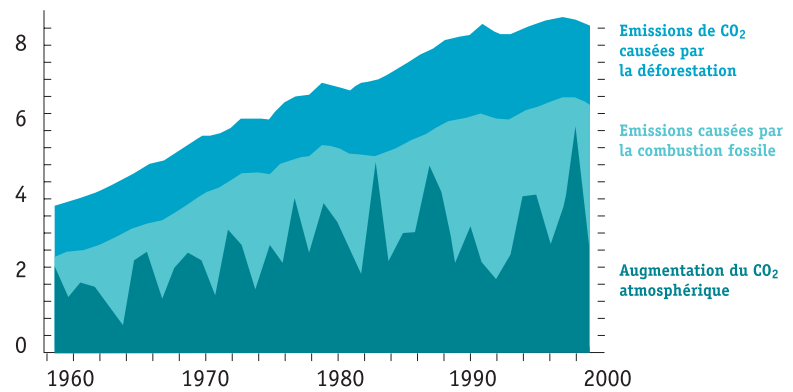
A l'heure actuelle, sur les 6,3 Gt (giga-tonnes, c'est à dire milliards de tonnes) de CO₂ d'origine fossile que l'homme émet en moyenne en une année, on estime que 2,8 Gt +/- 0,5 Gt sont absorbées par les océans et la végétation terrestre⁵ – c'est à dire entre 36 et 53% de nos émissions, soit 44,5% en moyenne.

Mais lorsque l'on cherche à connaître la part respective des océans et de la végétation, plus difficile à estimer séparément, le niveau d'incertitude est encore plus élevé:

- Les océans absorbent 1,9 Gt +/- 0,7 par an⁵, soit entre 19 et 41 % de nos émissions.
- La végétation absorbe 1,2 Gt +/- 0,8 par an⁵, soit entre 6 et 32% de nos émissions.

Nous cherchons par tous les moyens à réduire ce facteur d'incertitude considérable, notamment en faisant la part des choses entre les variations inter-annuelles d'origine naturelle

5) Keeling et Garcia (2002). Ces chiffres ne s'additionnent pas exactement (ils s'additionnent seulement à l'intérieur de la marge d'incertitude) parce qu'ils ne sont pas calculés de la même façon. L'effet combiné des puits océanique et terrestre est déduit directement à partir des variations de concentrations atmosphériques de CO₂, tandis qu'ils sont calculés séparément en les mesurant indirectement à partir de « traceurs » comme le carbone 14, avec davantage d'incertitude.



(qui sont inhérentes au système) et les variations causées par les perturbations humaines.

Des variations inter-annuelles surprenantes

Les chiffres évoqués ci-dessus ne sont que des moyennes: en réalité, d'une année à l'autre, l'activité des puits naturels varie considérablement.

Tandis que les émissions humaines (déforestation et énergie fossile: courbes du haut, en Gt/an) augmentent de façon assez régulière, la réponse de l'atmosphère (ce qui reste dans l'air et n'est pas absorbé par les océans et la végétation – voir courbe du bas) est en dents de scie. On attribue certaines de ces variations à d'autres phénomènes naturels (notamment El Niño), mais dans l'ensemble nous connaissons mal les mécanismes qui les causent. Quel est le rôle respectif des océans et de la végétation ? Quelles sont les causes de ces variations ? Quelles sont précisément les différences de quantités absorbées par les puits naturels, et les scénarios les plus probables d'évolution future dans une atmosphère de plus en plus riche en CO₂ ?

Puits terrestres: le poids de l'Histoire

L'activité des puits terrestres de carbone ne dépend pas seulement du type de végétation et des paramètres physiques (météo, variations journalières et saisonnières, etc.), mais aussi de l'histoire de l'utilisation des sols sur plusieurs centaines d'années. Deux prairies semblables en apparence pourront présenter un bilan de carbone très différent si, par exemple, l'une est exploitée depuis plusieurs siècles et l'autre était une forêt il y a encore vingt ans. Le continent européen est fortement marqué par la présence humaine depuis plusieurs millénaires. Pour reconstituer les flux sans trop se tromper, on n'est pas sorti de l'auberge !

Le slogan préféré de la biosphère: « slow-in, fast-out »

La séquestration du CO₂ par photosynthèse est le résultat d'un processus long et complexe (« slow-in »). En revanche, en cas de combustion, la libération du carbone dans l'atmosphère est brutale et inéluctable (« fast-out »).

Or, la biosphère terrestre contient de trois à cinq fois plus de carbone que l'atmosphère: les changements dans les stocks de carbone de la végétation ont donc des effets importants sur les concentrations de CO₂ dans l'air. La majorité du carbone absorbé par photosynthèse n'est en fait retenu que temporairement (dans les feuilles, le bois ou les fruits) avant de retourner dans l'air par biodégradation. Seule une petite part est durablement emprisonnée dans l'humus sous des formes plus stables. On connaît mal ce qui détermine cette répartition.

Des puits terrestres vulnérables à court terme ?

Des études récentes estiment que les possibilités de séquestrer artificiellement du CO₂ dans la végétation (essentiellement en plantant de nouvelles forêts) devraient saturer d'ici environ 200 ans, lorsqu'un nouvel équilibre entre croissance et abattage sera atteint. Seuls les océans conserveront tout leur pouvoir d'absorption pendant encore plusieurs siècles. Certains écosystèmes terrestres pourraient devenir des sources naturelles et relâcher de grandes quantités de CO₂, qui pourraient anéantir tous nos efforts de réduction des émissions humaines.

On ne peut qu'espérer que ce scénario est excessivement alarmiste et que la réalité sera moins cruelle. Mais en tout état de cause, cela montre qu'il est plus urgent que jamais de progresser dans notre compréhension des puits naturels et de leur évolution dans le temps. CarboEurope et CarboOcean constituent les efforts majeurs de l'UE pour contribuer à cette tâche, sur les puits terrestres et les puits marins respectivement.



Russie: Site de recherche en forêt – Fyodorovskoye, Sibérie. Dans une forêt reculée, le prélèvement d'échantillons d'air, qui seront ensuite analysés en Europe occidentale, est un défi logistique.

©CarboEurope – Rolf Neubert



Premières mesures de CO₂ à bord du cargo MS Falstaff

© CarboOcean



La recherche scientifique: questionner la réalité



© MPI-BGC Jena

Face à un phénomène inattendu tel que le réchauffement de la planète, notre point de départ en tant que chercheurs est avant tout de nous poser des *questions* – comme celles évoquées dans les pages précédentes.

Nous émettons alors une ou plusieurs *hypothèses*: on désigne des suspects ! Par exemple, on suppose que la combustion des énergies fossiles (donc l'homme) est responsable de l'augmentation du CO₂.

Ensuite, on lance l'enquête. Nous cherchons tous les indices possibles pour vérifier ou contredire notre hypothèse: des traces, des signaux, des empreintes (ce sont effectivement les mots que nous employons). On fait des expériences, des mesures, des prélèvements et des analyses en laboratoire. Ces activités prennent souvent une drôle de tournure: passer un après-midi au sommet d'une tour au-dessus des arbres, planter un thermomètre dans la terre, récolter des poches d'air toute la nuit en plein champ, faire voler des avions sans arrêt de haut en bas sans atterrir, creuser des trous au sommet des montagnes et au fond des océans, etc.

De multiples informations sont recoupées jusqu'à obtenir des « faisceaux de présomptions » suffisamment solides pour établir des conclusions. C'est souvent l'addition d'un grand nombre d'informations sur une même question qui permet, de façon statistique, de dégager des tendances. D'autres fois, ce sont au contraire des *valeurs extrêmes*, des données inexplicables, qui donnent une nouvelle piste.

Il nous faut en général des années et beaucoup de persévérance pour passer de la question à la réponse. Il arrive que l'on n'y parvienne pas, ou très partiellement, ou encore pas de la façon prévue. Parfois, une conclusion remet en cause un résultat que l'on croyait bien établi. Il arrive aussi que l'on trouve accidentellement des réponses à des questions que l'on n'avait pas eu l'idée de se poser !

Et le plus souvent, nos conclusions ne donnent pas de réponse claire à la question initiale, mais débouchent sur de nouvelles questions et hypothèses sur lesquelles nous devons à nouveau travailler ! Bref, nous nous interrogeons sans arrêt, nous doutons de ce que nous savons, et nous cherchons à « voir » ce qui n'est pas facilement observable.

4. Comment fait-on pour répondre à ces questions ?

Observations: la planète sous surveillance médicale

L'objectif est simple: récolter le plus grand nombre d'informations sur le plus grand nombre de paramètres, le plus souvent possible, en un maximum de lieux, pour dégager une vue d'ensemble de la situation du climat planétaire aussi fidèle que possible. Bref, pour répondre à la question: *que se passe-t-il réellement, quand et où ?*

Les activités d'observations sont très diverses. On peut citer notamment:

- les mesures de stocks (par exemple, quelle quantité de carbone est présente dans la végétation et dans les sols)
- les mesures de flux (par exemple pour estimer la quantité de CO₂ émise ou absorbée par une forêt, un champ cultivé, une prairie naturelle, une floraison de phytoplancton, etc.)
- les mesures des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère
- les mesures des courants océaniques
- les données météo
- les satellites, qui nous renseignent sur une multitude de paramètres (par exemple, la température de surface ou celle de l'atmosphère, la répartition de la végétation, etc.)

C'est une sorte de « monitoring » planétaire, au sens hospitalier du terme: on place la Terre sous surveillance « médicale » pour contrôler l'évolution de tous les paramètres que l'on peut mesurer. On cherche à multiplier la fréquence et la répartition des points de mesures pour avoir une image de plus en plus nette de la situation, et à mettre au point de nouveaux instruments, plus précis et plus fiables.

En plus des observations sur le présent, on étudie aussi le passé avec grande attention: la Terre dispose de multiples systèmes d'archivage, où l'on retrouve des traces très précises des climats passés – jusqu'à des centaines de millions d'années en arrière ! Par exemple, dans les glaciers des massifs montagneux ou dans les glaces polaires, on retrouve ainsi des bulles d'air à partir desquelles on reconstitue l'histoire de notre climat.



A bord du R/V G.O. Sars, Anders Olsson détermine la teneur en fréons de l'eau de mer par chromatographie gazeuse

© Yoshie Kasajima, Centre Bjerknes de recherche climatique, Bergen, Norvège

Expérimentations: comprendre les mécanismes qui gouvernent l'organisme-Terre

C'est bien de savoir ce qu'il se passe grâce aux observations ; mais ce qui nous obsède, c'est: *pourquoi cela se passe-il, et comment ?*

C'est là le cœur de la recherche, où l'on tente de faire reculer les frontières du savoir, de progresser dans notre compréhension de phénomènes encore mal connus ou carrément inexplicables. On retrouve là toutes nos grandes questions, qui forment comme un grand puzzle dont chaque chercheur tente d'élucider un petit morceau pour faire progresser l'ensemble.

Chacun travaille ainsi « sa » propre question. Par exemple, prenons une forêt considérée comme un puits de carbone: des mesures atmosphériques montrent que la forêt absorbe le carbone de l'atmosphère, mais en même temps on mesure une augmentation de la biomasse bien plus faible. Les arbres ne stockent qu'une part du carbone absorbé par la forêt. Où va le reste ? Que se passe-t-il vraiment, pourquoi et comment, entre l'atmosphère et les arbres, puis entre les arbres et le sol, entre le sol, le socle rocheux et les nappes phréatiques, entre les végétaux et les animaux ?

Il n'y a qu'une seule façon de répondre à ce genre de questions: émettre des hypothèses et tenter de les vérifier par l'expérimentation. Il faut aller voir ce qui se passe, faire des prélèvements, comparer différentes situations, mettre en doute ce que l'on sait déjà – bref, chercher !



Modélisation: un méga jeu de simulation pour voyager dans le temps

La Terre est un système complexe, avec des temps de réaction très lents à l'échelle d'une vie humaine, et impossible à isoler en vase clos pour faire des expériences de laboratoire... Difficile, dans ces conditions, de vérifier « in situ » si nos hypothèses sur la machine climatique sont vraies ou fausses, et encore plus de prédire l'avenir.

Malgré tout, nous avons des super-ordinateurs dans lesquels on crée de toutes pièces des planètes Terre virtuelles. C'est ce que l'on appelle les modèles: des sortes de méga-jeux informatiques avec lesquels on « s'amuse » à modifier artificiellement les paramètres pour voir ce que ça donne !

Comme dans tout bon jeu de simulation, il y a des cases (on parle de « grilles »). Les cases contiennent une multitude de paramètres (température, humidité, taux de CO₂, direction du vent, végétation, etc.) et sont reliées par des séries d'équations qui reproduisent ce que l'on sait des interactions entre ces différents paramètres dans la réalité. Ensuite, il y a des « pas de temps », c'est à dire une unité (par exemple en heures, en jours, en semaines...) qui définit le rythme virtuel auquel on demande à l'ordinateur de recalculer, à partir des équations, les paramètres pour chaque case – et ainsi de simuler la réalité dans des échelles de temps différentes.

Ainsi, on peut calculer en quelques jours seulement l'évolution du climat durant les 1000 dernières années. A partir des archives climatiques dont on dispose grâce aux forages, on peut comparer la réalité avec la simulation. Les différences révèlent une insuffisance du modèle qu'il faut alors affiner. Et plus on parvient à vérifier sa fiabilité sur le passé et le présent, plus on peut lui faire confiance pour voyager dans le futur et prédire l'évolution de certains facteurs climatiques dans 50, 100 ou même 1000 ans.

In fine, ces modèles sont des outils de prévision: l'une de leurs applications les plus courantes, c'est la météo ! Et la météo est aussi un bon exemple des limites des modèles: parfois les prévisions sont fausses, et plus elles sont lointaines, plus elles sont aléatoires. C'est tout simplement parce que les équations ne restent qu'une pâle approximation de la réalité. Une prévision fournit des tendances, pas des certitudes ! Plus les cases sont petites, plus les données et les équations sont nombreuses et précises, plus les pas de temps sont petits – bref plus la résolution du modèle est haute, plus l'image est nette, et plus les prévisions reflètent la réalité.

Et si les modèles de météo nous font régulièrement des farces, les modèles climatiques sont encore très imparfaits. On peut citer deux grandes frontières que l'on cherche à faire reculer:

- *Intégrer tous les composants dans un modèle global unique.* A la base, on modélise séparément la végétation, les océans, l'atmosphère, etc. Ensuite, l'enjeu est de « coupler » tous ces éléments – comme dans la réalité – pour reconstituer un modèle global capable de reproduire l'intégralité du système Terre. L'un des grands obstacles, c'est que certains composants, par exemple les sols, sont encore mal connus, donc difficiles à modéliser.
- *Réduire les échelles.* Si l'on parvient à simuler le climat relativement bien à l'échelle planétaire, en revanche à l'échelle régionale (par exemple, le continent européen) les modèles sont encore de piètres devins. Or, c'est précisément à l'échelle régionale que l'on manque aujourd'hui cruellement d'informations. Ce problème est lié non seulement aux limites de la puissance des ordinateurs (plus le modèle est complet et précis, plus il est gourmand en calculs), mais aussi aux limites de notre compréhension des phénomènes en jeu.

Tout est lié !

Ces trois grands piliers de la recherche – observations, expérimentation et modélisation – sont intimement liés: on nourrit les modèles avec les données issues des observations, on affine leurs équations grâce à ce que l'on apprend des expérimentations, on met en évidence des processus encore mal connus (donc à étudier !) chaque fois qu'un modèle donne un résultat éloigné des observations – et ainsi de suite...



Les souches dans la biomasse sous-terrainne sont l'une des grandes inconnues du carbone terrestre. A Parco Ticino, en Italie, les chercheurs du CCR s'efforcent de déterrer l'entièreté des systèmes racinaires d'un peuplement de peupliers. Les flux de gaz à effet de serre ont été étudiés pendant plusieurs années avant l'extraction.



Le MS Atlantic Companion, un cargo équipé d'appareils de mesure de CO₂

© CarboOcean

5. Que fait-on pour résoudre le problème ?

Même si nous devons faire face à d'immenses défis scientifiques, nous n'avons pas attendu le temps des certitudes pour alerter l'opinion et les pouvoirs publics.

Depuis sa création en 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (ou GIEC – en anglais Intergovernmental panel for climate change, IPCC) organise à l'échelle mondiale une évaluation régulière de l'état d'avancement des connaissances à travers toutes les spécialités concernées. En s'appuyant sur plusieurs milliers de scientifiques, le GIEC a ainsi déjà publié 3 rapports d'évaluation qui font autorité: en 1990, 1995 puis 2001. Le prochain est prévu pour 2007.

A l'interface entre science et politique, ces rapports sont l'outil majeur d'élaboration des stratégies de lutte contre l'effet de serre. C'est ainsi que dans le cadre du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, les Nations Unies ont mis en place la Convention sur les changements climatiques sur la base du premier rapport du GIEC. L'objectif ultime de la Convention « est de stabiliser (...) les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. »

6) L'écart est bien moindre sur la moyenne de l'UE-15: en 2002 les émissions ne dépassaient que de 1,4 % le niveau de 1990, principalement en raison de l'accroissement continu du transport routier.

Le protocole de Kyoto: insignifiant ou considérable ?

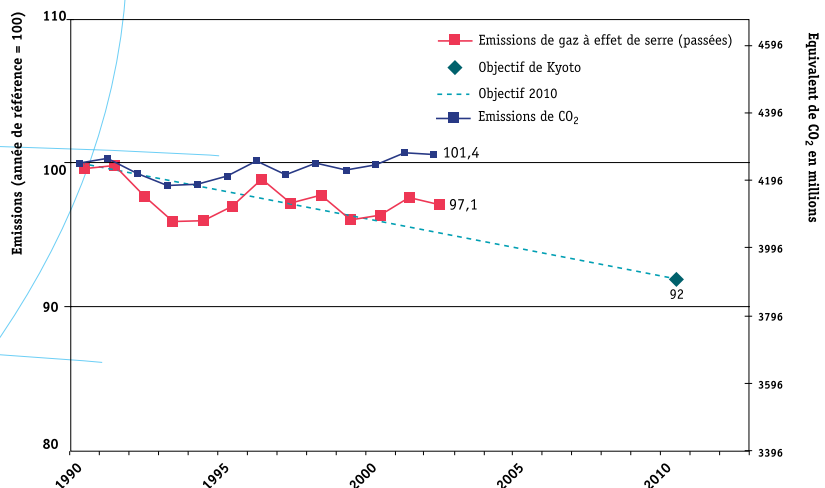
Elaboré en 1997 par la Convention, le protocole de Kyoto fixe des objectifs de réduction contraignants pour les pays développés: entre 2008 et 2012, ils devront réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5% en moyenne par rapport aux niveaux de 1990.

Cet objectif peut paraître à la fois insignifiant et potentiellement considérable.

Insignifiant d'un point de vue scientifique car 5% ne changeront rien aux tendances. Cela permettra, tout au plus, de limiter l'augmentation d'un déséquilibre toujours croissant.

Potentiellement considérable, parce que

- Cet objectif de réduction n'est pas une fin, mais un début. Le protocole de Kyoto est un cadre évolutif: les engagements de réductions d'émissions sont pris par périodes de cinq ans. Période après période, la communauté internationale pourra définir, si elle en fait le choix, des objectifs de plus en plus contraignants.
- L'objectif est défini par rapport à 1990 ; mais depuis cette date, les émissions ont continué à augmenter. Ainsi, 5% de réduction d'ici 2012 par rapport aux niveaux de 1990, c'est en réalité beaucoup plus par rapport aux niveaux actuels ! On peut toutefois s'interroger sur la capacité de certains pays à tenir leurs engagements: pour prendre un exemple extrême, en 2002 l'Espagne dépassait de 39% son niveau d'émissions de 1990⁶.



Total des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE-15 par rapport à l'objectif de Kyoto

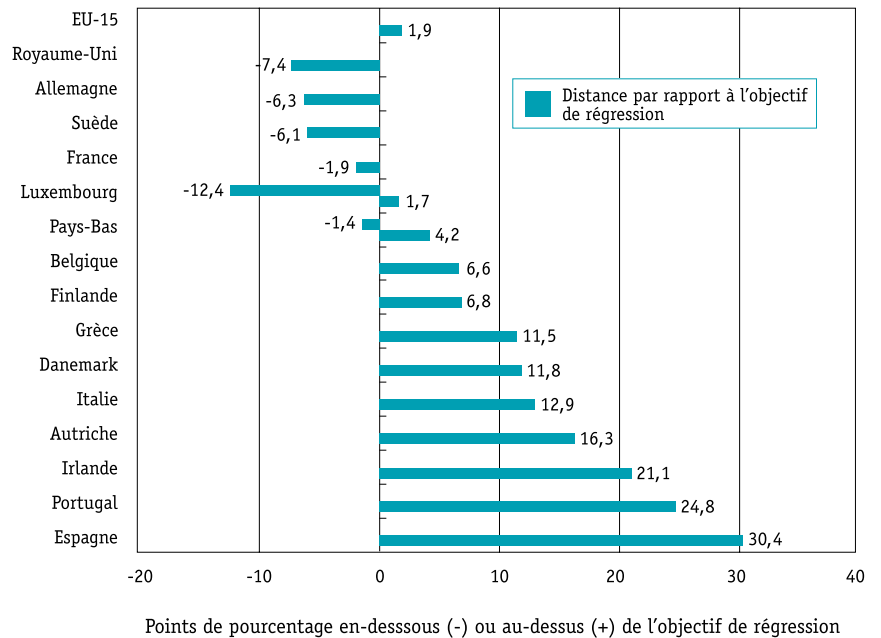
© Agence européenne pour l'environnement, 2004



- Pour la toute première fois dans l'Histoire, un accord international sur un problème d'environnement prend la forme d'un engagement juridique contraignant pour les pays signataires, c'est à dire assorti de véritables sanctions en cas de non-respect.

Il aura fallu près de huit ans entre la signature du protocole en 1997 et sa ratification par « au moins 55 pays représentant 55% des émissions totales de CO₂ », qui a permis son entrée en vigueur le 16 février 2005. En raison de l'opposition des Etats-Unis, qui sont les premiers responsables d'émissions, cet événement a bien failli ne pas avoir lieu.

Les 15 pays membres de l'UE (au moment de la conférence de Kyoto), qui totalisent 24,2% des émissions mondiales de référence en 1997, avaient quant à eux ratifié le protocole en mai 2002. Cela les engage à réduire leurs émissions d'au moins 8% en moyenne par rapport au niveau de 1990. Certains pays vont beaucoup plus loin, comme l'Allemagne et le Danemark, qui ont pris dès 1998 l'engagement unilatéral de réduire leurs émissions de 21%.



La «distance par rapport à l'objectif de régression linéaire» représentée par les barres indique l'écart qui sépare l'objectif hypothétique fixé pour 2002 et les émissions effectives en 2002. L'objectif hypothétique défini pour 2002 suppose que l'évolution autorisée des émissions d'un Etat membre entre 1990 et 2008-2012 suivra une trajectoire linéaire. La distance par rapport à l'objectif de régression est exprimée en pour cent.

© Agence européenne pour l'environnement, 2004



Contribution au réchauffement climatique, 1900-1999
La taille des pays est proportionnelle à leurs émissions de CO₂ issues des énergies fossiles

© World Resources Institute

Dans le cycle ou hors du cycle ?

Toute combustion entraîne une émission de CO₂, mais toute émission de CO₂ n'augmente pas forcément la concentration de CO₂ atmosphérique: tout dépend de ce que l'on brûle !

- Le carbone contenu dans tout combustible d'origine végétale (bois) est déjà dans le cycle. Il était dans l'atmosphère, à qui il a été « emprunté » par la plante grâce à la photosynthèse, et à qui il est « rendu » en brûlant ; il y serait de toute façon retourné tôt ou tard, combustion ou pas, à la mort du végétal. Ce carbone-là est dans le cycle: on dit que l'émission est neutre. A la condition, qui n'est pas des moindres, que pour un arbre brûlé ou arraché, il y ait un arbre replanté.
- En revanche, les combustibles d'origine fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) ne sont plus dans le cycle. Ce sont des réservoirs stables accumulés au fil de l'histoire géologique, grâce auxquels nous disposons d'une formidable source d'énergie. Toutefois, il y a un inconvénient de taille: chaque fois qu'on les brûle, ils rejettent dans l'air du CO₂ qui n'y était plus depuis des millions d'années. C'est comme ouvrir un robinet qui réinjecte dans un circuit fermé très complexe, jusque là en équilibre, des quantités sans cesse plus importantes de l'un des composants, et continuer constamment à augmenter le débit du robinet malgré les signes de perturbation sur l'ensemble du circuit.

C'est pourquoi, à condition de ne pas réduire la surface des forêts, toute opération permettant de substituer un combustible fossile par un combustible d'origine végétale (biogaz, bois brut ou déchiqueté, diester et autres carburants d'origine végétale) remplace une émission de CO₂ qui était hors du cycle, par une émission de CO₂ qui est dans le cycle – et donc désormais sans incidence sur la concentration atmosphérique. C'est la même logique dans le secteur du bâtiment, lorsque l'on remplace le ciment ou la brique (qui ont un coût énergétique très élevé) par du bois (qui retient prisonnier le carbone qu'il contient).

Comment réduire les émissions ?

C'est LA question clé que pose à nos sociétés le défi du changement climatique !

La voie la plus évidente, c'est de réduire les émissions à la source: l'énergie la plus propre est celle que l'on ne consomme pas ! Le développement des transports en commun, du vélo, des énergies renouvelables, du recyclage, etc. en sont les meilleurs moyens.

Une autre voie est celle du développement de nouvelles sources d'énergie et de technologies propres capables d'augmenter l'efficacité énergétique et de réduire, voire supprimer complètement, les émissions de gaz à effet de serre: co-génération, biogaz, pile à combustible, électricité issue de la fusion nucléaire, etc.

Et comme tous les moyens doivent être mis à contribution, le protocole de Kyoto autorise aussi la séquestration naturelle de carbone en plantant des nouvelles forêts. La motivation est claire: tant que l'on n'a pas mis en oeuvre les solutions technologiques ou modifié les comportements pour réduire fortement les émissions liées aux activités humaines, toute solution permettant de gagner du temps est la bienvenue.

Mais d'un point de vue scientifique, on n'est pas tout à fait certains que ça marche ! On sait que des arbres en pleine croissance permettent de fixer temporairement du CO₂ sous forme

végétale, mais on ne sait pas très bien comment ce mode de stockage se comporte dans la durée. Comment la capacité d'absorption évolue-t-elle au bout de 10, 100 ou 300 ans ? Pour combien de temps peut-on considérer que ce carbone « artificiellement » stocké dans la nature va-t-il effectivement y rester prisonnier ? Quels types de forêts et de modes de gestion favorisent-ils le mieux le stockage de carbone ?

Un questionnement éthique global de nos modèles de développement

D'un point de vue plus philosophique, on peut se demander: *l'humanité a-t-elle bien pris la mesure des menaces qui pèsent sur son avenir ?*

A lui seul, le protocole de Kyoto est une réponse démonstrative: non seulement les tout premiers engagements contraignants sont bien trop timides pour inverser les courbes ; mais en plus, il semble évident, sept ans après leur élaboration, que certains pays ne pourront les tenir.

A l'autre extrême de la chaîne des responsabilités, c'est à dire au plan individuel, les choses ne sont pas plus avancées: dans les pays développés (qui sont responsables de la grande majorité des émissions), les personnes qui ont vraiment modifié leurs habitudes de vie et de travail pour réduire leurs propres émissions sont encore une très faible minorité.



Relayée par les médias et les mouvements écologistes, la *prise de conscience* a sans nul doute beaucoup progressé; mais que ce soit au plan individuel ou collectif, la réalité du monde montre que le *temps des actes n'est globalement pas encore venu*.

On peut évoquer trois obstacles majeurs :

- 1) Le changement global ne se voit pas, n'a pas d'odeur et n'a d'effets perceptibles ni dans l'immédiat, ni à proximité des sources. De plus, en raison de son caractère planétaire, de nombreuses personnes ont l'impression que ce qu'ils peuvent faire à leur niveau sera toujours trop marginal pour faire une différence.
- 2) L'ampleur des risques est incertaine. Comment agir aujourd'hui pour prévenir des problèmes de demain sans savoir en quoi ils consisteront ? Sur ce sujet comme sur bien d'autres (manipulations génétiques, farines animales, nucléaire, etc.) deux conceptions s'affrontent:
 - certains considèrent que *tant que l'on n'a pas apporté de preuve du risque*, on peut poursuivre l'expérience ;
 - à l'inverse, d'autres considèrent qu'en raison du caractère irréversible des dangers que l'on court, il faut s'arrêter *dès lors que l'on ne peut pas apporter la preuve de l'absence de risque*: ce sont les tenants du « principe de précaution », qui est un fondement du protocole de Kyoto.
- 3) Il existe dans la société des forces d'inertie et de résistance au changement, que ce soit au niveau des lobbies industriels et pétroliers ou des populations, qui reflètent la tension permanente entre intérêts collectifs et particuliers.

Le changement global, enfin, nous renvoie à la question de la pauvreté et des grands déséquilibres entre les pays du Nord et les pays du Sud:

- C'est un phénomène essentiellement causé par une partie de l'humanité (le monde industrialisé) mais dont les effets sont subis par la totalité: certains y voient aujourd'hui *une agression écologique* des pays développés sur le reste de la planète.
- Les pauvres et les démunis, parce qu'ils disposent des capacités d'adaptation plus limitées, seront les plus touchés par les conséquences négatives des changements climatiques.

Même lorsque la science nous apporte des réponses à de grandes questions, le défi auquel nous faisons finalement face est celui de la recherche d'un meilleur équilibre, à l'échelle planétaire, entre des besoins

opposés dans la société (par exemple, les besoins de mobilité contre la préservation des ressources), et entre des intérêts opposés (ceux de l'économie actuelle, ceux des écosystèmes et de la biodiversité, des générations futures, des pays industrialisés et des pays non-industrialisés, des riches et des pauvres, etc.). Ces besoins et intérêts, dans l'actuelle conception dominante non durable du développement, sont en grand déséquilibre. Au-delà de l'évidence scientifique, cette quête difficile du point d'équilibre fait appel à des critères d'ordre éthique, qui sont indépendants de la connaissance factuelle.

C'est en fin de compte toute notre relation à la nature, à la préservation des équilibres, au partage des ressources et des richesses, et à la notion de croissance que le défi du changement global nous force à questionner au plan de nos choix personnels, collectifs, nationaux comme internationaux. Plus que jamais, le développement se pose en termes de construction de solidarités nouvelles au niveau planétaire, en opposition à la préservation des intérêts particuliers de tel ou tel groupe, pays ou ensemble de pays. Saura-t-on construire ensemble, en tant qu'humanité unique sur une planète unique, les solutions qui nous permettront de nous adapter aux changements que nous avons déjà causés, et de poursuivre notre développement sans plus mettre en danger les grands équilibres du système ?



Empreintes d'ours polaire – Expédition transarctique à bord du brise-glace suédois Oden

© Toste Tanhua – Institut des sciences marines de Leibniz, Université de Kiel, Allemagne

CARBOEUROPE

Comprendre et quantifier le bilan de carbone du continent européen

Quel est le rôle du continent européen dans le cycle global du carbone ?

Plus précisément, quel est le bilan de carbone de l'Europe: quelle quantité de CO_2 émet-elle, et quelle quantité absorbe-t-elle ? Comment réduire les incertitudes dans notre estimation de ce bilan aux échelles locales, régionales et continentale ? Quels mécanismes contrôlent ces échanges de CO_2 ? Les efforts de l'UE pour réduire ses émissions de CO_2 se traduisent-ils par une diminution effective des concentrations de ce gaz dans l'atmosphère ?

CarboEurope mobilise, depuis janvier 2004, plusieurs centaines de chercheurs européens autour de ces questions cruciales, tant au plan scientifique que politique. Tours à flux, avions-laboratoires, campagnes d'observations intensives, nouvelles générations de modèles informatiques: avec un budget de plus de 30 millions €, dont 16 provenant de l'UE, et 90 institutions de 17 pays engagées pour une durée de cinq ans, CarboEurope est aujourd'hui la plus grande initiative scientifique jamais lancée dans le monde sur le cycle du carbone.



La station de surveillance atmosphérique de Lutjeward
(Mer du Nord, Pays-Bas)

© CarboEurope – Rolf Neubert

1. Quels sont nos objectifs ?

Quantifier les échanges de carbone du continent européen

Comment le carbone voyage-t-il à l'intérieur des multiples systèmes naturels et humains présents sur le vieux continent ? Quel est, en définitive, le bilan de carbone de l'Europe, comment est-il distribué dans l'espace et comment évolue-t-il dans le temps ? Où sont les stocks et comment varient-ils ?

L'Europe est loin d'être une surface homogène: la population est répartie très irrégulièrement et il existe une multitude de sous-ensembles climatiques et géographiques. En termes de flux de CO_2 , c'est une véritable mosaïque de « puits » et de « sources » qui varient constamment en fonction des saisons, des conditions météo, de l'utilisation des terres, etc. Avec un degré de précision encore inégalé, nous contribuerons à reconstituer cette mosaïque et son évolution dans le temps, de l'échelle locale à l'échelle continentale.

Mieux comprendre ce qui explique ces échanges, à tous les niveaux possibles

Quels sont les mécanismes qui contrôlent le cycle du carbone dans les écosystèmes européens, et qui déterminent donc notre mosaïque des flux ? Comment les perturbations humaines – en particulier le réchauffement climatique et les changements d'utilisation des terres – influencent-elles ces mécanismes et donc le bilan européen de carbone ? Par exemple, les augmentations de taux de croissance constatés dans certaines forêts (jusqu'à 40% de plus sur des parcelles âgées de 50 ans) sont-elles dues à l'augmentation du CO_2 atmosphérique ?

Aux échelles locale, régionale comme continentale, CarboEurope apportera de nouveaux éléments de réponse pour chacun des grands compartiments du système: végétation (forêts, prairies, zones humides, champs cultivés), sols, atmosphère, etc. Nous chercherons en particulier à comprendre:

- la répartition, dans les flux de CO_2 , entre les trois causes fondamentales d'échanges: respiration du monde vivant, assimilation par les plantes et combustion d'énergies fossiles
- la façon dont cette répartition évolue en fonction du temps, de l'espace, et des activités humaines.

Comprendre, naturellement, ce n'est pas seulement décrire: c'est découvrir les relations écologiques et les lois (au sens mathématique du terme) qui sont derrière tous ces mécanismes.



Tour micrométéorologique de Puechabon, France

© CarboEurope – JM Ourcival

Fournir à l'UE les instruments scientifiques nécessaires au suivi et à la vérification des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto

Pour remplir ses engagements de réduction d'émissions, l'UE pourra à la fois réduire les émissions à la source (par une politique favorisant les transports en commun, les industries propres, les énergies renouvelables, etc.) et accroître la séquestration naturelle du carbone (en particulier par la plantation de nouvelles forêts). Pourra-t-on objectivement mesurer la baisse de concentration atmosphérique de CO₂ attendue en retour ? Comment vérifier que l'objectif de réduction d'émissions aura bien été atteint, et que les mesures prises à cet effet sont réellement efficaces ?

CarboEurope apportera à l'UE un système d'observation pour détecter les changements dans les stocks et les flux de carbone. De plus, en prévision des négociations pour la seconde période d'engagements prévue par le protocole (2013-2018), nous jetterons les bases d'un système précis de comptabilité du carbone pour l'ensemble des pays de l'Union.

2. Sur quoi s'appuie-t-on ?

CarboEurope fait suite à un ensemble de projets européens menés depuis 1996 sur différents aspects du cycle du carbone. Ces projets ont assuré le développement des principaux réseaux de mesure sur lesquels la recherche s'appuie aujourd'hui, et notamment la méthodologie des tours à flux.

Ces tours sont en quelque sorte le squelette de CarboEurope: elles mesurent en permanence et en continu, 24h/24, les flux de carbone de la parcelle qu'elles observent – c'est à dire la quantité de CO₂ émise ou absorbée par cette parcelle, en fonction de l'heure, de la météo, de la saison, etc.

C'est ainsi qu'on a pu récemment mettre en évidence une donnée fondamentale: les forêts et prairies de l'UE absorbent naturellement une quantité significative de carbone, de l'ordre de 7 à 11% des rejets européens de CO₂ issus des énergies fossiles. Mais cette donnée fondamentale nous renvoie aux grandes inconnues: où va le carbone absorbé par ces puits naturels européens ? Est-il stocké durablement ou temporairement ? Quel est la vulnérabilité de ces puits naturels face au changement climatique ?



SkyArrow, le plus petit avion de recherche au monde, mesure les flux de CO₂ et de vapeur d'eau.

© CarboEurope – Marcus Schumacher

3. Comment procède-t-on ?

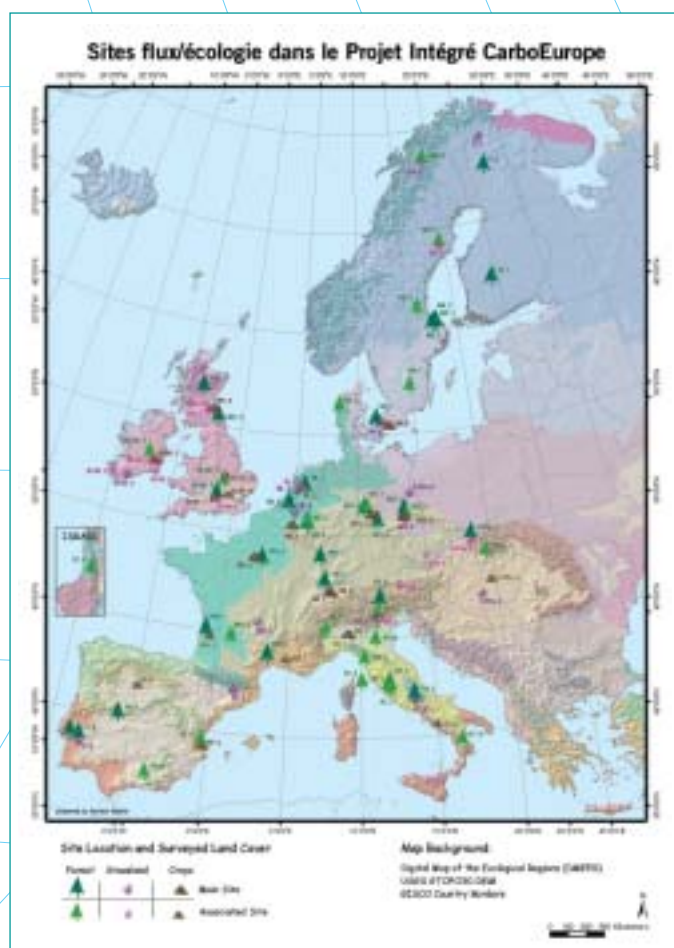
Une multitude de méthodes et sites d'observation

Le principe général est simple: pour estimer au plus juste le bilan de carbone de l'Europe, et mieux comprendre les mécanismes qui le déterminent, il faut multiplier les sites de mesures, augmenter la fréquence des observations, et articuler de façon plus étroite que jamais les activités d'observation et de modélisation informatique. De là découle une multitude d'activités coordonnées:

- Un réseau d'une centaine de sites de mesure équipés d'une tour à flux.
- Un réseau d'une dizaine de grandes tours, allant jusqu'à une hauteur de 400m, capables de « voir » les flux sur une région entière (de l'ordre de 500km², contre seulement

1km² pour une tour à flux classique) et de mesurer les concentrations à différentes altitudes sur toute la basse atmosphère.

- Un réseau de stations au sol dans des milieux très peu perturbés (sur des îles ou des sommets alpins) pour distinguer les mécanismes naturels du « bruit » généré par les activités humaines.
- Six bases aériennes où différents avions scientifiques effectuent des vols réguliers pour prélever des échantillons d'air.
- Une campagne régionale intensive associant l'ensemble des instruments et technologies disponibles pour travailler au degré de précision le plus fin possible. Cette campagne se déroule en France, dans la région de Bordeaux en 2007.
- Une armée d'ordinateurs et de calculateurs en réseau pour modéliser, partager et intégrer les données.



Flux et concentrations

Un **flux** est une quantité de matière (exprimée ici en CO₂ ou en carbone) qui passe par unité de surface et par unité de temps. Les flux considérés ici sont verticaux, positifs ou négatifs, selon qu'ils sont dirigés vers le haut (dégagement) ou vers le bas (absorption). Par exemple: +7g de carbone par jour et par mètre carré.

Une **concentration** est une proportion d'un gaz (ici le CO₂) dans un mélange (ici l'air) – donc en valeur relative – en un point donné à un moment donné: à la fin du 20^e siècle, l'atmosphère contenait environ 370 ppm de CO₂.

Les flux sont localisés à la fois dans l'espace et dans le temps: en fonction de la végétation, de la latitude, de la saison, des conditions météo, ils varient sans cesse d'un point à l'autre et d'un moment à l'autre. En revanche, **les concentrations atmosphériques sont globales et varient peu**: le CO₂ diffuse très rapidement dans l'atmosphère, donc les concentrations sont en quelque sorte une moyenne globale des effets cumulés de tous les flux à l'échelle d'un continent entier. Mais il subsiste de petites différences qui sont très révélatrices. Par exemple, on retrouve en moyenne 3 à 4 ppm de plus dans l'hémisphère nord: c'est parce que la majorité des émissions y sont situées. Et au-dessus des grandes forêts, qui sont les principaux puits naturels de CO₂, les concentrations sont plus faibles.



Toutes ces activités vont nous permettre de « voir » le cycle du carbone de façon aussi nette que possible sur l'ensemble du continent européen. L'un de nos grands problèmes, c'est que l'on a beaucoup de mal à conserver la « mise au point » en élargissant les échelles.

Plus c'est grand, plus c'est flou...

Le dilemme est simple:

- Plus ce que l'on regarde est petit, plus c'est net, mais moins c'est représentatif ;
- A l'inverse, plus ce que l'on regarde est grand, plus on voit l'image en entier, mais plus elle est floue !

Notre grande quête, c'est donc de voir les détails avec de plus en plus de netteté, sur des échelles de plus en plus grandes à l'intérieur du continent européen. Et comme on ne peut pas couvrir l'Europe entière de tours à flux tous les kilomètres, il faut bien trouver une ruse !

Extrapoler est le mot-clé: c'est à dire se donner les moyens méthodologiques, à partir des quelques observations précises mais localisées dont on dispose, de déduire ce qui se passe à plus grande échelle en se trompant le moins possible, à la fois dans l'espace et dans le temps.



Entretien de la tour micrométéorologique du parc national de Hainich, Allemagne

© CarboEurope – Bertram Smolny

Et la ruse – c'est à dire le pari méthodologique de CarboEurope – c'est d'intégrer la plus grande diversité possible de méthodes d'investigation. En multipliant les sources de données et les techniques de mesure et de calcul, on pourra confronter le maximum d'informations et dégager progressivement des tendances de plus en plus précises. C'est ce que l'on appelle une approche « à contraintes multiples ».

... mais plus on intègre, plus on y voit clair

Cette stratégie d'intégration maximale nous met face à trois grands défis scientifiques:

- 1) L'intégration des échelles: en associant des instruments qui « voient » beaucoup de choses à petite échelle (par exemple une tour à flux) avec d'autres qui voient moins de choses à plus grande échelle (par exemple des grandes tours, des avions ou des satellites), on peut confronter leurs données respectives et donc extrapoler avec plus de confiance.
- 2) L'intégration de tous les compartiments où ont lieu les échanges: forêts, prairies, terres cultivées, zones humides, sols, atmosphère, etc., avec des sites de mesure dans tous les grands climats européens, de la Méditerranée au cercle arctique.
- 3) L'intégration des méthodologies de modélisation:
 - La méthode directe va du « bas » vers le « haut »: à partir de ce qu'on connaît des processus naturels en jeu et des flux réels sur les quelques points équipés d'une tour, on fait une simulation des flux sur l'ensemble d'un territoire, puis on calcule l'effet supposé de ces flux sur la concentration globale de CO₂ dans l'atmosphère. On affine le modèle jusqu'à ce que les concentrations mesurées rejoignent les concentrations simulées.
 - La méthode inverse va du « haut » vers le « bas »: à partir des variations mesurées des concentrations atmosphériques à l'échelle d'un territoire, on fait tourner le modèle à l'envers pour reconstituer, de manière aussi localisée que possible, l'ensemble des flux supposés avoir causé ces variations dans les concentrations.

Les deux méthodes ont leurs forces et leurs faiblesses ; mais en les combinant, on contraint davantage les calculs et on augmente les chances d'avoir une estimation des flux plus proche de la réalité. Pour la première fois à grande échelle, CarboEurope va les mettre en œuvre simultanément pour produire des cartes hebdomadaires à mensuelles du bilan européen de carbone à une résolution de 50 x 50 km².



Dans la station de surveillance atmosphérique de Lutjeward (Mer du Nord), des échantillons de CO₂ sont prélevés deux fois par semaine par absorption du CO₂ dans de l'hydroxyde de sodium

© CarboEurope – Rolf Neubert

La carte d'Europe du CO₂: comment boucher les trous ?

L'un des grands objectifs de CarboEurope illustre bien la façon dont fonctionne cette approche « à contraintes multiples »: faire le bilan de carbone du continent européen – c'est à dire dresser la carte d'Europe des flux de CO₂.

Sur quelles informations peut-on compter pour reconstituer cette carte ?

- 1) On dispose des données des tours à flux: des mesures continues, mais très localisées. Cela nous donne une carte pratiquement toute blanche, avec seulement quelques points visibles ici et là, mais sur lesquels on a beaucoup d'informations.
- 2) A l'opposé, les mesures de concentrations donnent une information représentative à l'échelle continentale, mais qui ne nous dit rien sur la provenance du CO₂ mesuré. Cependant, les petites variations des concentrations sont bien causées par des variations dans les flux: avec les concentrations, on peut

dire que l'on voit en fait la totalité de notre carte d'Europe des flux, mais tellement floue que l'image se confond en une seule couleur qui change un peu d'un jour à l'autre. Les variations de cette « couleur », même infimes, sont un indice très précieux.

- 3) On dispose, enfin, de données satellites qui sont à la fois localisées et étendues: elles donnent des informations précises sur chaque point de la carte et couvrent l'ensemble du continent. Ce n'est toujours pas notre carte des flux (les satellites ne savent pas les voir), mais une série d'autres cartes, bien détaillées et sans « trous », sur des phénomènes qui inter-agissent avec les flux : par exemple, les échanges d'énergie au niveau du sol, ou encore les données météo.

En superposant ces trois groupes d'observations, on obtient une carte des flux à la fois pleine de trous et pleine

d'informations: en somme, c'est un ensemble d'équations à plusieurs inconnues. Et le secret des équations à plusieurs inconnues, c'est que l'on trouve les solutions lorsque l'on peut mettre côte à côte plusieurs séries d'équations faisant intervenir différemment les mêmes inconnues: plus on diversifie les sources d'information, plus on contraint le problème, plus il y a de chances de trouver les réponses. C'est là qu'entrent en scène nos modèles informatiques : ce sont de fantastiques machines à résoudre des équations complexes.

Bref, une carte très précise mais vide à 99% (issue des tours à flux) + une carte complète mais très floue (issue des mesures de concentrations) + des cartes précises sur des données indirectement liées aux échanges de CO₂ (issues des satellites) + de bons modèles informatiques + 5 ans de mesures, de calculs, d'erreurs et d'approximations = à la fin du projet CarboEurope, une belle carte d'Europe des flux !



CARBOOCEAN

Réduire les incertitudes sur les puits et sources océaniques de carbone



Lune arctique – Expédition transarctique à bord du brise-glace suédois Oden

© Toste Tanhua – Institut des sciences marines de Leibniz – Université de Kiel, Allemagne

On estime que les océans absorbent annuellement de 20 à 40% de tout le CO₂ rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines: grâce à cela, le réchauffement global est fortement retardé. Mais est-ce plutôt 20% ou plutôt 40% ? Avec une telle marge d'incertitude, difficile de prédire avec précision l'évolution du climat !

Quelles sont plus précisément les quantités de CO₂ absorbées, quels sont les processus d'échange, de transport et de stockage du CO₂ en jeu dans les océans, quelles sont les conséquences de l'enrichissement de l'eau en CO₂, et comment tout cela va-t-il évoluer dans un milieu planétaire de plus en plus perturbé par l'homme ?

Ces grandes questions réunissent depuis janvier 2005 quarante institutions de 15 pays au sein d'un second « projet intégré de recherche » de l'UE: CarboOcean. Durant 5 ans, avec une contribution de l'UE de 14,5 millions € sur un coût total d'environ 30 millions €, c'est toute une armada de navires océanographiques, de cargos équipés d'instruments de mesures, de bouées, d'expériences sous-marines, etc., que nous allons envoyer sillonner les mers du globe pour un effort européen d'observation, d'analyse et de modélisation sans précédent dans ce domaine.

1. Quels sont nos objectifs ?

CarboOcean s'attaque à un objectif à la fois simple et très ambitieux: connaître *deux fois plus précisément* les quantités de CO₂ absorbées par les océans au plan planétaire, et *quatre fois plus précisément* dans l'océan Atlantique et les mers Australes.

Pour y parvenir, sur une période de temps allant de -200 à +200 ans, nous allons tenter de:

- décrire avec une précision inégalée dans l'espace et dans le temps les échanges de CO₂ entre l'air et la mer, et l'évolution de ces échanges et des multiples paramètres en jeu (concentrations de carbone dans l'eau, température, salinité, variables biologiques, etc.) face à l'accroissement du CO₂ atmosphérique. Nous voulons notamment produire des cartes annuelles des concentrations de CO₂ pour l'Atlantique nord, qui viendront mieux contraindre les cartes terrestres réalisées par CarboEurope.
- mieux comprendre la multitude de processus physiques, chimiques et biologiques qui gouvernent ces échanges de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan, et entre la surface et les eaux profondes.

In fine, CarboOcean aidera à répondre à deux questions cruciales que le défi du changement climatique pose à la société: « que va-t-il nous arriver ? » et « combien cela va-t-il nous coûter ? ». En apportant une estimation plus précise des quantités de CO₂ réellement absorbées par les océans, nous pourrions en effet prédire avec plus de précision:

- le degré de réchauffement en fonction des différents scénarios d'émission de CO₂ ;
- le degré d'efficacité des différents types de solutions envisagées (réduction des émissions, mesures d'adaptation etc.) par rapport à leur coût.



USCGC Healy

© CarboOcean



© Dorothee Bakker – University of East Anglia, Royaume-Uni

2. Sur quoi s'appuie-t-on ?

CarboOcean fait suite à de nombreux projets océanographiques nationaux et internationaux qui ont permis de déployer, depuis une dizaine d'années, un vaste réseau planétaire d'observation du carbone marin. Ce réseau mondial dont CarboOcean constitue la contribution européenne est notre principale source de données pour la recherche sur le cycle océanique du carbone.

Des études récentes ont ainsi pu établir qu'au cours des 19^e et 20^e siècles (c'est à dire l'essentiel de la période industrielle), 30% du CO₂ d'origine humaine (émis par la combustion du charbon et du pétrole et la déforestation) a été absorbé par les océans – soit au total, 118 giga-tonnes de carbone, avec une incertitude de 19 Gt en plus ou en moins⁷.

Mais si l'on a pu reconstituer ce chiffre avec une relative précision sur *deux siècles*, en revanche nous savons encore mal évaluer les quantités réellement échangées entre l'air et la mer à *l'échelle annuelle*: l'océan n'absorbe pas le CO₂ de façon linéaire. Selon les saisons, selon les années, en fonction de phénomènes globalement encore peu connus, les échanges varient naturellement de façon importante. Il nous faut mieux comprendre cette variabilité naturelle si l'on veut pouvoir quantifier la part de l'homme. C'est à l'heure actuelle l'une des zones d'incertitudes majeures de notre compréhension du cycle global du carbone.

7) Source: Sabine et. al. 2004

8) Environ 118 Gt de carbone d'origine humaine sur un total de l'ordre de 40.000 Gt de carbone dans l'océan, soit moins de 0,3% ; alors que l'atmosphère contient environ 165 Gt de carbone d'origine humaine sur un total d'environ 750, soit 22%.

3. Comment procède-t-on ?

Tout comme dans CarboEurope, c'est en combinant le plus étroitement possible observations, expériences et modélisation (visant respectivement description, compréhension et prévision) que l'on progresse.



Déploiement du carottier à gravité dans le chenal des îles Féroé-Shetland lors de l'expédition NOClim à bord du navire de recherche Håkon Mosby

© Dag Inge Blindheim, Centre Bjerknes de recherche climatique, Bergen, Norvège

Un système d'observation du CO₂ sur l'Atlantique

Combien les océans contiennent-ils de carbone d'origine humaine ? L'obtention de cette donnée de base est en soi un sacré défi: non seulement le carbone est réparti irrégulièrement selon les latitudes, les courants, les saisons, mais la part liée aux émissions humaines est très petite par rapport au volume total de carbone dans l'océan⁸. Alors, pour obtenir une image pas trop floue de cette répartition, nous n'avons d'autre option que de récolter des données le plus souvent possible en le plus grand nombre de points possible.

Depuis une dizaine d'années, la mise au point d'appareils de mesure automatique du CO₂ nous permet d'équiper des navires commerciaux et de profiter de leurs déplacements en mer pour collecter des données. C'est ce qu'on appelle les lignes « VOS » pour « voluntary observing ships » (navires d'observation volontaires). Le long des itinéraires empruntés par ces cargos, on visualise ainsi les variations des concentrations dans l'espace et dans le temps, puisque ces lignes commerciales sont empruntées à intervalles réguliers. Grâce



Pourquoi le cycle du carbone dans l'océan est-il moins connu que sur la terre ferme ?

• Les océans demeurent largement inexplorés. Tandis que d'importants progrès sont effectués sur les continents, les océans restent bien moins étudiés, notamment en raison de leur immensité (ils couvrent 71% de la surface de la Terre). Qui plus est, l'océan est loin d'être homogène et de multiples facteurs affectent sa capacité à stocker du CO₂: par exemple, l'eau dissout d'autant moins les gaz que sa température est élevée (on le voit bien lorsqu'on sort du frigo une boisson gazeuse en été: plus la bouteille se réchauffe, plus les bulles se forment et le gaz s'échappe). Ainsi, les eaux froides des hautes latitudes absorbent d'importantes quantités de CO₂ atmosphérique ; elles plongent vers le fond, migrent lentement vers l'équateur, puis remontent aux tropiques où elles se réchauffent et libèrent donc leur CO₂. C'est pourquoi:

a) *la répartition du carbone dans l'océan est très irrégulière: en fonction des courants, de la température, de la salinité, de l'activité biologique, des saisons et même des années, sa concentration varie sensiblement d'un point à un autre, d'un jour à l'autre, d'une année sur l'autre. Tout le contraire de l'atmosphère, milieu très turbulent où le CO₂ diffuse tellement bien qu'il suffit de quelques points de mesures pour connaître la concentration moyenne sur la Terre entière !*

b) *les flux (c'est à dire les échanges de CO₂ entre l'air et la mer) ne sont pas du tout homogènes: par endroits et par moments, l'océan relâche du CO₂, à d'autres il en absorbe. La somme totale de ces puits et sources océaniques nous donne cette estimation approximative de 20 à 40% du CO₂ d'origine humaine absorbé par les océans. On connaît mal ce qui détermine leur évolution en fonction des latitudes, des saisons, des années, etc.*

- l'océan est difficile d'accès et il n'existe actuellement aucun autre moyen que les mesures in situ pour obtenir des données sur le CO₂. Aucune technologie ne permet à ce jour de le faire depuis l'espace. Les missions en mer sont toujours coûteuses et risquées, dans des conditions souvent difficiles: cela limite beaucoup les possibilités de mesures et d'expérimentation.
- les échelles de temps dans l'océan surpassent largement celles des vies humaines: par exemple, la durée moyenne du cycle complet de renouvellement des masses d'eau est de l'ordre du millénaire (sous l'effet combiné du vent, de la force de Coriolis et des variations de densité de l'eau de mer, l'océan est en constant mouvement tout autour du globe).
- l'océan est un système complexe interconnecté avec les continents et l'atmosphère, où s'équilibrent un grand nombre de cycles bio-géo-chimiques, étroitement liés entre eux avec des échelles de temps multiples. Une sorte de casse-tête géant où, à chaque fois que l'on bouge une pièce, une chaîne de réactions et de rétroactions se met en branle, à des rythmes et des amplitudes différents. Nombre de ces effets en chaîne sont encore très mal connus. Les conséquences des perturbations causées par les activités humaines sont donc très difficiles à quantifier, d'autant plus que tout ne va pas dans le même sens: certaines rétroactions accentuent la perturbation initiale, d'autres l'atténuent.

à nos modèles informatiques, on essaie ensuite d'extrapoler ces variations sur l'ensemble de l'océan et de reconstituer petit à petit la carte des concentrations.

Pour nourrir nos modèles et les contraindre encore d'avantage, on dispose également d'un réseau de stations fixes (en anglais « time-series »), sortes de bouées automatisées qui mesurent en continu les mêmes données que les bateaux, mais sans se déplacer. Enfin, des bouées autonomes dites « carioca » (pour "CARbon Interface OCEan Atmosphere") peuvent être lâchées dans les courants et transmettre par satellite des mesures continues de carbone à la surface pendant plus d'un an.

Lignes VOS, stations fixes et bouées carioca sont en quelque sorte l'équivalent en mer des « tour à flux » utilisées sur terre dans CarboEurope: un réseau de points de mesures aussi dense que possible pour multiplier les contraintes sur les modèles informatiques. Ces différents instruments participent au vaste

effort d'observation au plan mondial que coordonne la commission océanique internationale de l'Unesco. Découvrez les itinéraires des lignes VOS et les emplacements des stations fixes (« time-series ») dans le monde entier sur:

<http://ioc.unesco.org/ioccp/ObsNet.htm>

La grande limite des systèmes automatisés, c'est qu'ils ne prennent des mesures que dans les eaux de surface. Or, nous avons aussi besoin de savoir ce qui se trame au fond. Pour cela, nous allons tester un nouveau type d'instrument: des « profileurs automatiques », sorte de mini sous-marins qui récoltent des informations à différentes profondeurs, puis remontent à la surface pour transmettre leurs données via satellite, avant de se déplacer pour aller effectuer une nouvelle série de mesures un peu plus loin.



A bord du navire de recherche Polarstern, Mario Hoppema, de l'Institut Alfred Wegener de Bremerhaven, prélève un échantillon d'eau lors d'une expédition scientifique dans l'océan Austral

© Dorothee Bakker – University of East Anglia, Royaume-Uni

Des campagnes en mer pour mieux comprendre les processus d'échanges, transport et stockage du CO₂ à l'intérieur des océans

Toutes ces données descriptives nous renseignent sur le « quoi », mais pas sur le « pourquoi » ni le « comment » : une fois le CO₂ absorbé en surface, que devient-il ? Pour cela, pas d'autre solution que de partir en mer pour effectuer les mesures et prélèvements qui ne peuvent être automatisés !

L'une de nos grandes quêtes est de comprendre ce que devient le carbone absorbé dans les eaux de surface. Comment pénètre-t-il, et comment s'effectue son transfert vers les eaux profondes ? C'est en particulier dans l'Atlantique nord, où le CO₂ humain a pénétré le plus profondément, que nous espérons y voir un peu plus clair. Il subsiste en effet des divergences importantes entre les différents modèles informatiques et avec les données mesurées en mer, quant aux quantités exactes de carbone d'origine humaine absorbé dans l'Atlantique et l'emplacement des zones d'absorption et de stockage.

Nous allons chercher des réponses dans les zones où la circulation océanique entraîne les eaux de surface vers les profondeurs: les régions polaires. Plusieurs expéditions en mer du Groenland et en mer de Barents sont ainsi prévues pour traquer l'itinéraire du carbone d'origine humaine jusqu'aux abysses.

Ces différentes expéditions nous permettront également de guetter les signes d'éventuels changements dans la circulation océanique globale. Tôt ou tard, le réchauffement atmosphérique devrait affecter la façon dont les océans stockent et transportent la chaleur tout autour du globe. Or de tels changements dans les courants auront des répercussions sur les échanges de CO₂, que l'on soupçonne sans toutefois bien pouvoir les quantifier.

Une autre grande question concerne la réponse biologique aux perturbations causées par cet afflux de CO₂ dans l'océan. Comment réagit l'écosystème ? Y a-t-il des déplacements de groupes dominants, des effets rétroactifs sur d'autres facteurs pouvant influencer le climat ? C'est notamment ce que l'on étudie dans les mésocosmes (voir en fin de document)



Durant la première expédition CROZEX, Dorothee Bakker (University of East Anglia) supervise les opérations sur le pont du RRS Discovery

© Alan Hughes – Centre national d'océanographie, Southampton, Royaume-Uni



En Méditerranée et mer du Nord: apprendre à coupler l'air, l'eau et la terre.

Il n'y a pas, naturellement, un cycle du carbone sur les continents, un autre cycle dans l'atmosphère et un troisième à l'intérieur des océans: il y a un cycle unique, à l'intérieur d'un système Terre unique, composé de ces différents « compartiments » en interaction permanente les uns avec les autres.

CarboOcean étudie les flux de carbone en mer, CarboEurope sur terre ; alors comment passer de cette vision compartimentée à une vision intégrée fidèle à ce qui se passe réellement dans la nature ? En mer du Nord et en Méditerranée occidentale, une étude pilote menée conjointement par les deux programmes permettra de reconstituer un bilan intégral de carbone, prenant en compte la totalité des acteurs atmosphériques, terrestres et marins. Pour la toute première fois de façon expérimentale (c'est à dire à partir de mesures in situ et pas seulement dans le cadre de simulations informatiques), nous allons tenter de quantifier la totalité des flux entre l'air, la mer et la terre. Le résultat de cette étude sera très utile pour améliorer notre capacité à coupler, à l'échelle de la Terre entière, ces différents compartiments que nous étudions séparément.



Opération Winch – Expédition transarctique à bord du brise-glace suédois Oden

© Toste Tanhua, Institut des sciences marines de Leibniz, université de Kiel, Allemagne



Université de Las Palmas (ES) – Département de chimie de la Faculté des sciences marines. A bord du MSC GINA, l'équipe ULPGC-QUIMA travaille sur une ligne VOS du Royaume-Uni à Cape Town.

© ULPGC-QUIMA

Modélisation: pour intégrer et prédire

Comment passer d'un flot continu de données brutes issues des multitudes d'instruments déployés sur l'océan, à un ensemble de cartes et de figures exploitables ? Exactement comme dans CarboEurope, la méthode tient en un mot: intégration – et donc modélisation.

Pour les océans, le principe général est le même que pour les continents: plus on multiplie et diversifie les sources d'information (données VOS, stations-fixes, bouées, profileurs, images satellites, etc.), plus on contraint les calculs, plus on réduit les approximations et plus l'on parvient:

- à représenter fidèlement la réalité actuelle
- à prédire l'évolution future de cette réalité et des différents paramètres.

Compte-tenu de la multitude des sources de données, de la complexité physique (courants, reliefs, températures, etc.) et biologique de l'océan, les opérations de modélisation représentent l'un des défis scientifiques les plus importants de CarboOcean.

Les océans, vastes décharges pour déchets atmosphériques ?

Parmi toutes les solutions plus ou moins ingénieuses et réalistes imaginées face au défi du changement climatique, deux idées ont émergé pour accélérer la migration du CO₂ vers les océans afin d'en diminuer la concentration dans l'atmosphère:

- 1) Stimuler la capacité d'absorption naturelle des océans en fertilisant les eaux de surface par l'épandage massif de fer, élément essentiel à la croissance du plancton. Ce phénomène se produit naturellement sous l'effet des vents: on observe régulièrement des blooms planctoniques importants lorsque du sable du Sahara, riche en fer, est déposé sur les océans par le sirocco. Mais l'excès de CO₂ temporairement absorbé de cette façon retourne peut-être aussi vite dans l'air, et l'on ignore totalement ce qu'entraînerait au plan écologique une fertilisation artificielle des océans à grande échelle.
- 2) Injecter directement du CO₂ dans les profondeurs. Le CO₂ serait pompé à la source d'émission, artificiellement mélangé à de l'eau de mer, transporté en mer, puis injecté par des tuyaux directement au fond de l'eau. Comment se comporteraient ces sortes de nappes artificielles enrichies en CO₂ épandues au fond des océans ? Quels processus physiques, chimiques et biologiques gouverneraient leur dilution progressive, et quelles en seraient les conséquences sur l'écosystème ?

De telles approches reposent sur une vision très mécanique de la planète, liée à la conviction qu'il existe des réponses technologiques à tous les problèmes, et à la vieille idée consistant à considérer la mer comme une grande poubelle capable de tout digérer – ici, nos déchets de CO₂. Nous n'avons pas la moindre idée de leurs conséquences à long terme, si ce n'est que l'acidification encore accrue serait à coup sûr dangereuse pour les écosystèmes. En soi, le principe de précaution nous interdirait d'y recourir, mais il existe un risque réel que certains pays les tentent malgré tout, afin de remplir leurs engagements dans le cadre du protocole de Kyoto.

C'est pourquoi CarboOcean conduira également des expérimentations à petite échelle pour mieux connaître les effets de ces solutions, afin de pouvoir argumenter à armes égales avec leurs éventuels promoteurs et de fournir aux décideurs les moyens de prendre des décisions pleinement informées.



La recherche en action:

Deux exemples sur le terrain

1. Pianosa, l'île au trésor scientifique



Coucher de soleil sur la tour à flux de carbone de Pianosa.

© Institute of Biometeorology – National Research Council

Dans un ancien pénitencier abandonné sur une île déserte au large de la côte toscane, nous tentons de mieux comprendre le cycle du carbone dans les écosystèmes terrestres méditerranéens. Quelle est sa place dans le grand puzzle planétaire du climat, et comment réagit-il au réchauffement global et aux changements d'utilisation des terres ? Quels sont les échanges de gaz carbonique entre l'air, le sol et la végétation, en fonction des saisons et des conditions climatiques – et surtout, qu'est-ce qui explique ces échanges ? Certaines réponses à ces grandes questions se trouvent ici, à « Pianosa-lab »⁹, laboratoire à ciel ouvert des sciences de la Terre en Méditerranée, et l'un des sites de mesures de CarboEurope.

Egarée entre Corse et Elbe, écrasée sous la chaleur, embaumée par le maquis, Pianosa est tout simplement une île déserte. 10 kilomètres carrés d'île-prison abandonnés depuis la fermeture du pénitencier en 1992, mais toujours strictement réglementés et pratiquement interdits aux visiteurs. Depuis nos premières missions en mai 2000, c'est un peu notre île au trésor scientifique : un micro-écosystème modèle à l'abri de toute perturbation humaine !

Nous espérons y découvrir quelques pièces manquantes du grand puzzle du cycle planétaire du carbone: celles qui correspondent au maquis méditerranéen. L'échelon régional est l'un des grands chantiers actuels des sciences du climat. Si nos modèles informatiques sont aujourd'hui à peu près en mesure de reproduire l'évolution du climat au plan planétaire, en revanche, à plus petite échelle, les simulations, souvent bien éloignées de la réalité, mettent en évidence l'insuffisance de nos connaissances.

Vive les phénomènes inexplicables !

Comment s'y prend-on pour rechercher un trésor scientifique sur une île ? On pourrait résumer les choses en deux mots: observation et expérimentation.

L'observation, c'est comme un « monitoring » aussi complet que possible des échanges de carbone de l'île. Pour cela, nous avons installé une « tour à flux » au centre de l'île, où l'on enregistre à la fois les données météo (pression, humidité, vent, pluviométrie, rayonnement solaire, etc.) et surtout – d'où son nom – les flux de CO₂, c'est à dire la quantité de CO₂ que l'île, dans sa globalité, émet ou absorbe en fonction des saisons. La mesure est faite en continu: nous avons ainsi les courbes de flux de CO₂ de l'île tout au long de l'année. Nous savons ainsi, par exemple, que l'île est en moyenne un « puits » de CO₂ – c'est à dire qu'elle en absorbe davantage qu'elle n'en rejette dans l'atmosphère.

L'expérimentation, c'est ce qui nous aide à comprendre ce que nous dit la tour. Car si elle nous dit tout des échanges de CO₂ de Pianosa, en revanche elle ne nous dit rien sur *ce qui explique ces échanges*: qui émet combien, qui absorbe combien, quand et pourquoi. C'est comme une série d'équations dont on n'aurait que le résultat, sans connaître les chiffres et les formules qui la composent. Or, notre but final est de pouvoir modéliser, c'est à dire reproduire ces équations dans un programme informatique pour pouvoir simuler plus largement le comportement des écosystèmes méditerranéens à partir du cas de Pianosa, par extrapolation.

Donc, tant que l'on ne peut pas dire pourquoi le flux mesuré par la tour évolue de telle ou telle façon, on ne peut pas modéliser. Et pour pouvoir dire pourquoi, il faut connaître la façon dont tous les acteurs (les arbres, les sols, les prés, etc.) réagissent aux variations saisonnières, aux changements de temps, etc. Bref, il ne suffit pas de connaître les flux et leurs variations, il faut pouvoir décrire leurs causes. C'est le cœur-même de la recherche, qui motive toutes les mesures et expériences sur le terrain.

⁹ Consortium de 9 laboratoires et de 4 universités italiennes coordonné par IBIMET à Florence (Italie)

Observation et expérimentation sont hautement complémentaires. Et ce qui nous plaît le plus, c'est d'observer quelque chose que l'on ne comprend pas: c'est ce qui révèle les limites de nos connaissances, donc les directions dans lesquelles il faut rechercher et les questions qu'il faut se poser. Un phénomène inexplicable, pour nous, n'est pas un événement surnaturel, mais simplement un phénomène que l'on ne peut pas encore expliquer !



Le sol respire, le saviez-vous? Grâce à cet étrange appareil, nous mesurons la quantité de CO_2 émise par le sol de Pianosa.

© Institute of Biometeorology – National Research Council

Des émissions massives de carbone en plein été

Et en matière de bizarrerie, nous avons été gâtés à Pianosa. Quelque chose de très étrange est apparu dans les données enregistrées par la tour après les orages d'été. En général, avant la pluie, le flux est positif: l'île relâche du CO_2 dans l'atmosphère. C'est le signe normal du manque d'eau: en cas de sécheresse, les plantes se protègent en fermant leurs stomates, ce qui interrompt la photosynthèse et donc la fixation du CO_2 . En revanche, tant qu'elles sont vivantes, elles continuent bien sûr de respirer, c'est à dire d'émettre du CO_2 . L'orage arrive, et dans les quelques heures qui suivent, le flux mesuré devient nul: on suppose que les plantes, bien contentes d'avoir à boire, se remettent à faire de la photosynthèse. On suspecte même qu'elles absorbent de plus en plus de CO_2 dans les heures qui suivent.

Mais 12 heures après la pluie, au lieu d'absorber logiquement de plus en plus de CO_2 , l'île se met soudain à en émettre des quantités incroyables: dix fois plus qu'avant l'arrivée de la pluie ! Ensuite, le flux décroît lentement pour retrouver son niveau normal, plusieurs jours après. La première fois, on s'est demandé ce qui clochait dans nos appareils... Mais ces émissions naturelles de CO_2 après les pluies d'été se sont reproduites à chaque fois. Elles sont une vraie surprise dont on ne soupçonnait pas l'importance: nous avons calculé qu'elles réduisent de 10 à 15% la quantité totale moyenne de CO_2 absorbé chaque année par Pianosa.

Des émissions brutales de CO_2 qui enfreignent allègrement les lois de la nature (du moins ce que nous en connaissons...) et qui viennent impunément fausser nos modèles informatiques (ou plutôt, en dénoncer les imperfections...) ! Qui est responsable ? Pourquoi à chaque fois 12 heures après la pluie, et pas 6 h ou 24 h ? Nous devons démasquer le coupable, nous devons trouver quels sont les mécanismes en jeu. La tour nous a mis sur la piste, il faut maintenant lancer l'enquête et chercher des indices là-même où ces échanges de CO_2 ont lieu: à la surface des feuilles, autour des racines, dans la terre...

Comment l'eau agit-elle sur la respiration du sol ? Par quelles plantes le CO_2 que l'on retrouve dans l'air a-t-il été respiré ? Quelle est la part de la végétation dans les flux de CO_2 mesurés ? Que devient le carbone dans le sol ? Voilà autant de questions qui tiendront en haleine nos différentes équipes pour de nombreuses années de chasse au trésor...

Pour en savoir plus sur Pianosa

http://www.ibimet.cnr.it/biosphere/File_progetti/01_pianosa_lab.htm



2. « Mésocosmes »: des mini-mondes marins pour simuler l'avenir



Le radeau des mésocosmes

© IFM-GEOMAR

Entre microcosmes et macrocosmes, vive les mésocosmes ! A défaut de pouvoir faire des recherches comparatives à l'échelle macroscopique (qui supposerait, pour le climat, de disposer d'une seconde Terre manipulable à merci), mais bien mieux que les expériences de laboratoire à des échelles souvent trop microscopiques pour extrapoler à l'échelle planétaire, nous expérimentons la réaction des océans grâce à des mésocosmes – c'est à dire, littéralement, des « mondes moyens ».¹⁰

Au large de la station de biologie marine d'Espesgrend, près de Bergen en Norvège, nous travaillons en plein fjord sur un radeau très particulier: sur le ponton, une cabane en bois abrite un mini-laboratoire auquel sont reliées, immergées tout autour, neuf grosses tentes en plastique truffées de tuyaux et capteurs. Comme avec les icebergs, c'est la partie immergée qui est la plus grosse: soigneusement enveloppée dans un plastique qui ne laisse passer que la lumière, une colonne de 10 mètres d'eau bien isolée du reste du fjord, mais néanmoins in situ, se prolonge sous les tentes: voilà nos mésocosmes, d'une taille aisément manipulable par des humains, et malgré tout déjà immenses à l'échelle de leurs millions de petits habitants – le plancton que l'on veut étudier.

L'air est artificiellement maintenu à 370 ppm de CO₂ (c'est à dire la concentration actuelle) dans les trois premières, 750 ppm dans trois autres (concentration attendue en 2050 si l'on poursuit les émissions au rythme actuel), et 1150 ppm dans les trois dernières (concentrations attendues en 2100). Ainsi, nous comprendrons mieux ce qui risque réellement de nous arriver en 2100 et en 2150.

Absorption de CO₂ par les océans: un supplice pour la vie marine ?

Le principe de l'expérience est simple: le premier jour, nous versons dans chaque mésocosme un cocktail de nutriments pour déclencher une floraison phytoplanctonique. Nous étudions les effets sur le plus grand nombre de paramètres possibles durant cinq semaines, et nous comparons les trois types de mésocosmes.

Ce que nous y observons confirme ce que nous avons vu en laboratoire: l'absorption de grandes quantités de CO₂ d'origine humaine par les océans, bien qu'elle soit peut-être une bénédiction pour le système climatique, peut devenir un vrai supplice pour la vie marine.

Pour de nombreuses espèces marines, le carbonate de calcium est la principale matière première utilisée former leurs squelettes. Les coraux, les coquillages, les oursins et les étoiles de mer font partie des organismes marins calcificateurs que nous connaissons tous bien. Mais l'acidification consécutive à l'absorption du CO₂ par les océans, en diminuant la concentration en ions carbonates, rend plus difficile la formation de leurs structures calcaires par ces organismes calcificateurs.

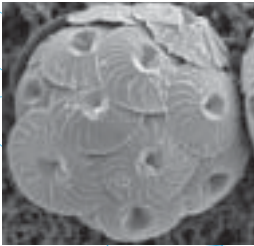
Deux fois moins de calcification dans les mésocosmes enrichis en CO₂

Dans nos mésocosmes, on ne cultive ni moules ni oursins, mais une variété de plancton végétal qui répond au nom de « coccolithophores » – des micro-algues monocellulaires recouvertes d'une couche de calcite très dense appelée « coccolithe ». Invisibles à l'œil nu en raison de leur taille microscopique (ils sont 100 fois plus petits que le trou d'une aiguille), ces coccolithophores n'en sont pas moins les organismes calcificateurs les plus productifs de notre planète.

Or, dans les mésocosmes enrichis en CO₂, la calcification s'est révélée pratiquement *deux fois plus faible* que dans ceux au niveau normal ! En laboratoire, nous avons observé sur les coccolithophores des eaux enrichies en CO₂ des quantités élevées de malformations de la coccolithe et de recouvrement incomplet de la cellule.

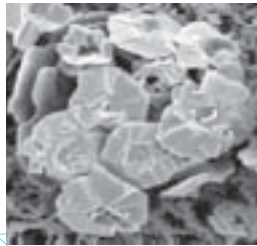
¹⁰ Cette expérience intitulée « Peece » (pelagic ecosystem CO₂ enrichment study) regroupe neuf laboratoires coordonnés par IFM-GEOMAR à Kiel (Allemagne)

Ces deux photos illustrent on ne peut plus clairement le niveau de perturbation:



Concentrations en CO_2
actuelles

© M. Geisen, AWI



Concentrations en CO_2
estimées en 2100

© M. Geisen, AWI

Mais même si ces résultats nous alarment sur les risques d'effets négatifs de l'acidification des océans, ils nous laissent avec davantage de questions que de réponses. Quel peut être l'effet d'une calcification réduite et de malformations accrues sur l'efficacité reproductive des coccolithophores ? S'ils ne supportent pas l'acidification, seront-ils remplacés par d'autres groupes non calcificateurs ? Quelles en seront les conséquences sur l'écosystème ?

Des écosystèmes marins probablement plus vulnérables

Qui plus est, nous nous interrogeons aussi sur la validité de nos résultats. Le plancton connaît une immense variété génétique, même à l'intérieur d'une même espèce, et il y a statistiquement toutes les chances pour que les groupes génétiques les plus abondants dans l'océan soient ceux que l'on enferme dans nos mésocosmes. D'autres groupes génétiques actuellement moins abondants sont-ils peut-être mieux armés face à un taux de CO_2 élevé ? De plus, pour des raisons pratiques nous enrichissons l'air des mésocosmes assez brutalement, alors qu'en réalité l'atmosphère prendra un siècle pour atteindre le même niveau de CO_2 . Pour des organismes à croissance lente comme les coraux, cela ne devrait guère faire de différence ; mais les coccolithophores, avec un cycle de reproduction d'un ou deux jours seulement, peuvent traverser jusqu'à 30.000 générations en 100 ans. Ce temps sera-t-il suffisant pour s'adapter à un océan plus acide ?

S'il est encore trop tôt pour prédire les conséquences de l'acidification de l'océan, on peut raisonnablement affirmer que les écosystèmes marins deviendront probablement moins robustes et donc plus vulnérables à d'autres impacts environnementaux comme le réchauffement climatique, la pêche ou la pollution. L'unique façon pratique de minimiser le risque de dommages irréversibles aux écosystèmes marins est donc de réduire nos émissions de CO_2 dans l'atmosphère. De toute évidence, l'acidification des océans est une raison majeure, en plus du changement climatique, pour agir rapidement et développer des stratégies énergétiques alternatives.

Pour en savoir plus sur l'expérience « mésocosmes » (all in English !):

- description pdf: <http://www.carboocean.org/Menue/News/Mesocosm.pdf>
- site web de l'expérience: <http://spectrum.ifm.uni-kiel.de/peece/>
- weblog du groupe de Mayence: http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Diaries_from_the_field/CarboOcean_4ps.html

Remerciements à Maria-Francesca Cotrufo et Ulf Riebesell pour leur accueil à Pianosa et à Espesrend

Livret pédagogique CarboSchools

Version française décembre 2005

Utilisation et reproduction libres à fins éducatives et sans but lucratif

Coordination DG CCR: Günther Seufert

Texte et coordination: Philippe Saugier (saugier@netcourrier.com)

Création du logo CarboSchools: Rona Thompson

Relecture: Aline Chipaux, Annette Freibauer, Marion Gehlen, Nadine Gobron, Giacomo Grassi, Kjeld Hansen, Christoph Heinze, Alexander Knohl, Thierry Lerévérénd, Mats Olsson, Ulf Riebesell, Michael Schallies, Bernard Saugier, Ingunn Skjelvan, Rona Thompson, Elmar Uherek, Andrea Volbers.

Cette publication est financée par la DG Centre commun de recherche de la Commission européenne et par les projets intégrés CarboEurope et CarboOcean. La mission du CCR est de fournir un soutien scientifique et technique adapté à la conception, au développement, à la mise en œuvre et au suivi des politiques de l'UE. Partie intégrante de la Commission européenne, le CCR joue le rôle de centre de référence scientifique et technologique de l'Union. Etroitement lié à la prise de décision, il sert l'intérêt commun des Etats membres, tout en restant étranger aux intérêts particuliers, privés ou nationaux.

Pour plus d'informations:

www.carboschools.org

www.carboeurope.org

www.carboocean.org

<http://ies.jrc.cec.eu.int/fp6ccu.html>



A bord du navire Carola, des lycéens du Staedtische Gymnasium de Bad Segeberg, en Allemagne, s'apprêtent à embarquer pour une expédition d'échantillonnage de la faune et de la flore marines de la Mer Baltique. Cette initiative fait partie du projet NaT-Working de l'Institut des sciences marines IFM-GEOMAR de Leibniz, Kiel, Allemagne.

© A. Antia



Au sein de CarboEurope et Carbo-Ocean (deux projets européens de recherche sur le changement climatique entre 2004 et 2009), nous sommes plusieurs centaines de scientifiques engagés à faire progresser la connaissance du fonctionnement de la Terre et à mieux comprendre comment l'homme déséquilibre ce fonctionnement en émettant des quantités énormes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

A travers l'initiative CarboSchools, nous voulons promouvoir la mise en

place de partenariats entre chercheurs et enseignants du secondaire, afin que les jeunes prennent conscience des conséquences locales et planétaires du changement climatique, découvrent la recherche scientifique et agissent au niveau local pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Destinée tant aux enseignants qu'à tous ceux qui s'intéressent au sujet, cette brochure tente de présenter une vision d'ensemble de la recherche sur le changement climatique. Quelles sont les questions-clés ? Comment fait-on progresser la connaissance à travers la recherche scientifique ? Quelle est la contribution de la recherche européenne à la question brûlante du cycle du carbone ?

Nous vous invitons à nous suivre dans cette grande aventure scientifique, à partager notre fascination pour la planète et à imaginer des solutions d'avenir !