

POLITIQUE SCIENTIFIQUE FEDERALE



# La recherche belge sur le global change 1990-2002

Synthèse du rapport  
d'évaluation et d'intégration



Editeurs principaux:  
**G. den Ouden, M. Vanderstraeten**

Journaliste scientifique:  
**P. Raeymaekers**

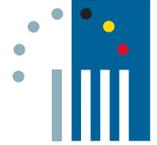
.be

Les activités de recherche sur le *global change* menées entre 1990 et 2002 avec le soutien de la Politique scientifique fédérale belge ont été soumises à une évaluation et à une intégration. Ce processus c'est concentré sur une sélection d'informations scientifiques basées sur des contributions volontaires de scientifiques belges a conduit à la rédaction de deux rapports:

- ✓ Belgian global change research 1990 – 2002: Assessment and integration report
- ✓ La recherche belge sur le global change 1990 – 2002: Synthèse du rapport d'évaluation et d'intégration

Le présent rapport constitue la synthèse du rapport d'évaluation et d'intégration. Il est également disponible en Anglais et Néerlandais. Le lecteur souhaitant approfondir le sujet pourra consulter le rapport complet. Les deux rapports mettent en exergue les thèmes suivants:

- ✓ Les changements dans la composition de l'atmosphère
- ✓ Les changements climatiques
- ✓ Le rôle de l'océan dans le *global change*
- ✓ L'impact du *global change* sur les écosystèmes.



# **La recherche belge sur le global change 1990-2002**

**Synthèse du rapport  
d'évaluation et d'intégration**

Editeurs principaux:

**G. den Ouden, M. Vanderstraeten**

Journaliste scientifique:

**P. Raeymaekers**



**L**es changements planétaires ont des conséquences importantes tant sur le plan social qu'économique si on considère les champs d'action comme les énergies renouvelables, la gestion des transports, les émissions industrielles, ...

C'est pourquoi, en tant que Ministre en charge non seulement de la Politique scientifique, mais également de l'Energie, de l'Economie et du Commerce extérieur, je base mon action sur une interaction étroite entre mes différentes compétences.

Au niveau de la société, les changements planétaires provoqués par l'activité de l'homme ont entraîné un appauvrissement des sols, des perturbations de la circulation océanique, une réduction de la biodiversité, des modifications de l'atmosphère, ... Ces changements nécessitent une transformation des modes de production, de consommation et d'organisation dans la société. A ce titre le rôle de la science et de la technologie est essentiel pour dégager des stratégies de prévention, d'adaptation ou d'atténuation de ces changements.

De même sur le plan économique, les Sommets comme ceux de Kyoto, de Buenos Aires ou de Johannesburg permettent de repenser l'économie sur le plan mondial en intégrant dans nos politiques énergétique, environnementale et de mobilité le principe du développement durable.

Enfin, il est de plus en plus évident que l'environnement deviendra la source d'un avantage concurrentiel pour l'Europe. Des politiques environnementales bien conçues favorisent l'innovation, créent des nouveaux marchés et renforcent la compétitivité par le biais d'une exploitation plus efficace des ressources et de nouvelles possibilités d'investissement. En ce sens, elles peuvent contribuer à la réalisation des objectifs fondamentaux de la stratégie de Lisbonne visant à stimuler la croissance et à créer davantage d'emploi.

La réponse au défi de Kyoto passe nécessairement par une percée technologique. Le rôle des pouvoirs publics est de créer un climat favorable à cette percée

de l'innovation dans la lutte contre les changements climatiques. Cette politique étant génératrice de développements économiques (niches) induit alors une synergie porteuse (win-win) entre les trois piliers du développement durable.

A l'heure actuelle tant au niveau national, européen qu'international, seule une politique intégrée associant les scientifiques, les industriels, les politiques et les citoyens permettra d'assurer la survie de notre planète afin de transmettre aux générations futures ce patrimoine exceptionnel.

Je tiens à remercier tous les auteurs du rapport "Belgian global change research 1990-2002: Assessment and integration report" pour l'excellent travail qu'ils ont fourni. Ce rapport contribue à une meilleure compréhension des problèmes auxquels nous devons faire face et sera un outil précieux au service des décideurs politiques les aidant à dégager les pistes de solutions les plus appropriées que ce soit au niveau local, régional, national ou supranational.



Marc Verwilghen  
Ministre fédéral de l'Economie, de l'Energie,  
du Commerce extérieur et de la Politique scientifique



La recherche est la pierre angulaire de toute science. Son objectif est d'améliorer notre compréhension générale de tout ce qui nous entoure. Une compréhension croissante des relations entre activités naturelles et anthropogènes donne à la recherche sur le global change un crédit incontournable pour la sélection des objectifs politiques concernant la protection de l'environnement, le bien-être de l'homme et le développement économique. Cette recherche est reconnue en tant que pilier principal de la Stratégie Européenne du Développement Durable (Göteborg 2001) et du plan d'implémentation du Sommet Mondial sur le Développement Durable des Nations Unies (Johannesburg 2002). La politique de recherche actuelle de l'UE en ce qui concerne le global change tend au renforcement de la coopération entre initiatives européennes et recherche globale.

Les résultats des activités de recherche sur le global change menées entre 1990 et 2002 avec le soutien de la Politique scientifique fédérale belge ont été soumis à une évaluation et à une intégration. Ce processus s'est concentré sur une sélection des informations scientifiques réunies et a conduit à la réalisation des deux rapports suivants:

- ✓ Belgian global change research 1990 – 2002: Assessment and integration report
- ✓ La recherche belge sur le global change 1990 – 2002: Synthèse du rapport d'évaluation et d'intégration

Les sections thématiques du rapport sont structurées autour de questions et de réponses politiques pertinentes. Outre l'apport d'instruments de soutien de la politique et d'avis objectifs, ce bilan de l'état actuel du savoir donne également un aperçu de la connaissance scientifique en la matière et de l'expertise en Belgique. Le rapport tente d'expliquer les défis auxquels nous confronte le global change, comment les scientifiques belges et internationaux perçoivent le global change et son impact, quels sont les résultats de leurs recherches et comment ces résultats peuvent contribuer à mieux soutenir la prise de décision et les politiques.

La participation active et enthousiaste d'un grand nombre de scientifiques à la production de ce rapport et le bon esprit de collaboration montre bien à quel point il existe une "communauté belge de la recherche sur le global change" se partageant les connaissances et les idées. Bien que la tâche ait été complexe et fort différente de leur travail journalier, ceux-ci ont perçu le processus de traduction des résultats de recherche en un document orienté vers les politiques comme un exercice intéressant et instructif. Une proportion importante de scientifiques ayant contribué au processus n'est pas familiarisée avec la prise de décision et considère comme grise la zone entre les acteurs politiques et eux-mêmes. Ils ont estimé par

conséquent que ce rapport pourrait contribuer à jeter des ponts entre les deux mondes: l'un scientifique, l'autre politique.

Afin de rendre ce rapport d'évaluation et d'intégration accessible tant aux décideurs politiques qu'au grand public, une interprétation synthétique a été rédigée par un journaliste scientifique et a été retravaillée par la suite par G. den Ouden et M. Vanderstraeten (éditeurs principaux) en co-opération étroite avec les rédacteurs scientifiques mentionnés ci-dessous.

En Belgique, le programme du "Plan d'appui scientifique à une politique de développement durable" (PADD) est une des initiatives majeures alimentant la recherche sur le global change. La Politique scientifique fédérale reconnaît l'importance des autres partenaires belges et internationaux ayant contribué au financement de la recherche belge sur le global change.

Nous remercions spécialement les rédacteurs scientifiques de l'"Assessment and Integration Report": R. Zander (ULg-GIRPAS), M. De Mazière (IASB), J.-P. van Ypersele (UCL-ASTR), R. Wollast, J.-P. Vanderborght (ULB-OCEAN), R. Ceulemans et I. Nijs (UA-PLECO). Je désire plus particulièrement rendre hommage au Prof. Wollast, qui nous a malheureusement quitté il y a peu. Sa dernière contribution à la production de ce rapport a montré son expertise scientifique, ses qualités de synthèse et sa vision holistique d'une problématique du changement global. Son décès représente une grande perte pour la communauté scientifique internationale.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à l'ensemble des scientifiques dont le travail a servi de base au rapport et à ceux qui ont participé activement au processus d'évaluation et d'intégration, à mes collaborateurs ainsi qu'au journaliste scientifique, aux relecteurs, traducteurs et correcteurs. J'espère que cette fructueuse collaboration se prolongera.



Dr Philippe Mettens,  
Président du Comité de Direction



<b>Note du Ministre</b>	<b>3</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>5</b>
<b>Introduction: le global change, un monde en mouvement</b>	
<b>Contexte</b>	<b>9</b>
<b>Recherches sur le global change</b>	<b>9</b>
Interactions complexes et incertitudes	
La politique et la science	
Organisation de la recherche	
<b>Produits et expertise pour l'appui des politiques</b>	<b>12</b>
Types de résultats	
Intégration	
Le rôle de la Politique scientifique fédérale dans la recherche et le dialogue	
<b>1. Les modifications au sein de l'atmosphère</b>	
<b>1.1 L'ozone dans la stratosphère</b>	<b>17</b>
1.1.1 L'ozone et le trou d'ozone	
1.1.2 Mesurer pour savoir	
1.1.3 Raréfaction de l'ozone au-dessus de la Belgique	
1.1.4 Aérosols dans la stratosphère	
1.1.5 La couche d'ozone et son impact sur la santé et le climat	
1.1.6 Le trou d'ozone est-il sous contrôle?	
<b>1.2 Trop d'ozone au niveau du sol</b>	<b>27</b>
1.2.1 La complexe chimie de l'ozone troposphérique	
1.2.2 Evolution future de la concentration moyenne de l'ozone troposphérique	
1.2.3 Pics de concentration épisodiques et Composés Organiques Volatils (COV)	
1.2.4 Précurseurs autres que les COV	
1.2.5 COV naturels et aérosols	
<b>1.3 Brouillard d'aérosols dans la troposphère</b>	<b>30</b>
1.3.1 De nano à micro	
1.3.2 A ne pas mettre tous dans le même sac	
1.3.3 Naturels ou anthropiques	
1.3.4 Aérosols et climat	
1.3.5 Aérosols et santé	
1.3.6 Normes européennes et processus décisionnel belge	
<b>2. Les changements climatiques</b>	
<b>2.1 Indices d'un changement de climat</b>	<b>33</b>
2.1.1 Température	
2.1.2 Précipitations et humidité atmosphérique	
2.1.3 Niveau de la mer, calottes glaciaires et glaciers	
2.1.4 Glace marine	
<b>2.2 Et avant?</b>	<b>38</b>
2.2.1 Comment savoir sans mesurer?	
2.2.2 Les 1.000 dernières années	
2.2.3 Niveaux de la mer	
2.3.1 Les facteurs qui modifient l'équilibre du système climatique	
2.2.4 Modifications brutales du climat	
<b>2.3 Causes des changements climatiques passés</b>	<b>40</b>
2.3.2 Réactions différées	
<b>2.4 Gaz à effet de serre et aérosols: les principaux coupables?</b>	<b>42</b>
2.4.1 Les mesures	
2.4.2 Les modèles	
<b>2.5 Le 21<sup>ème</sup> siècle</b>	<b>45</b>
2.5.1 Au plan mondial	
2.5.2 Niveau régional	
<b>2.6 Possibilité d'effets inattendus à long terme.</b>	<b>47</b>
2.6.1 La calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest	
2.6.2 La circulation thermohaline	
2.6.3 Des surprises biogéochimiques	
<b>2.7 Les changements climatiques et l'ozone</b>	<b>49</b>
<b>2.8 Kyoto sauvera-t-il le climat?</b>	<b>49</b>

2.8.1	Pourquoi le climat doit-il être sauvé?	
2.8.2	Une nature lente	
2.8.3	Kyoto, un premier pas important	
2.9.	Incertitudes-clés à aborder dans de futures recherches	53
<b>3.</b>	<b>Le rôle des océans au sein du global change</b>	
3.1	D'une source de CO <sub>2</sub> à un puits de CO <sub>2</sub>	55
3.2	Les pompes physiques, chimiques et biologiques	55
3.2.1	Les formes de carbone dans les océans	
3.2.2	Des eaux superficielles aux eaux profondes	
3.2.3	La pompe physique	
3.2.4	La pompe biologique	
3.2.5	La pompe chimique	
3.3	Quelle est l'efficacité des océans en tant que puits de carbone?	58
3.3.1	Etude des côtes et de l'océan Austral	
3.3.2	Le CO <sub>2</sub> dans les eaux de surface des zones côtières	
3.3.3	La pompe biologique dans les zones côtières	
3.3.4	La pompe biologique dans l'océan profond	
3.3.5	L'importance de la pompe chimique	
3.3.6	L'utilisation de modèles	
3.4	L'importance des nutriments	62
3.4.1	La lumière seule ne suffit pas	
3.4.2	L'azote	
3.4.3	Le phosphore	
3.4.4	La silice	
3.4.5	Le fer	
3.5	Donner un coup de main aux océans	66
3.5.1	Enrichir ou injecter	
3.5.2	L'efficacité de l'enrichissement	
3.5.3	L'efficacité de l'injection	
<b>4</b>	<b>Le global change dans les systèmes biologiques</b>	
4.1.	L'érosion de la biodiversité	69
4.1.1	Les effets de la diversité sur le fonctionnement des écosystèmes	
4.1.2	Effets de la gestion sur la diversité	
4.1.3	Prévoir et prévenir l'extinction d'une espèce	
4.2	Ecosystèmes et accumulation des gaz à effet de serre	72
4.2.1	Les puits de carbone du territoire belge	
4.2.2	Autres gaz affectant le climat et l'ozone	
4.2.3	Fluctuations annuelles	
4.2.4	Émissions de carbone et assimilation par les forêts	
4.2.5	Utilisation des sols et mesures de gestion	
4.2.6	Acidification des sols et dépôts d'azote	
4.2.7	Les forêts belges au 21 <sup>ème</sup> siècle	
4.3	Effets sur la structure, le fonctionnement et la distribution des écosystèmes	80
4.3.1	Productivité des prairies belges	
4.3.2	Mesures de gestion	
4.3.3	Distribution mondiale de la végétation	
4.4	Effets du global change sur l'équilibre hydrologique	81
4.4.1	Effets sur les bassins hydrologiques belges	
4.4.2	Modifications du régime des nappes phréatiques	
4.4.3	Changements dans l'agriculture	
4.4.4	Changements dans les zones marécageuses	
4.5	Origines des modifications affectant les écosystèmes	83
4.5.1	Conditions initiales, origines des changements et rétroactions	
4.5.2	Le facteur clé	
4.5.3	Causes socio-économiques	
4.6	Conclusions et perspectives	86
	Annexe 1 - Instituts belges de recherche	88
	Annexe 2 - Acronymes et abréviations	90
	Annexe 3 - Abréviations des substances chimiques et formules chimiques	92
	Annexe 4 - Unités	93
	Annexe 5 - Références	94

# Introduction: le *global change*, un monde en mouvement

## Contexte

---

Il est de plus en plus manifeste que l'influence de l'homme sur son cadre de vie ne se limite plus à des perturbations à caractère local ou régional, mais que l'être humain transforme bel et bien la planète entière. Le terme anglais "*global change*" (changement planétaire) englobe tous les changements de notre milieu de vie à l'échelle mondiale, changements qui peuvent d'ailleurs avoir une origine naturelle.

Parmi les changements influençant le monde entier, l'on retrouve notamment les changements au niveau de la composition de l'atmosphère, du climat, des ressources en eau, de l'utilisation de la terre, de la couverture de la terre, des écosystèmes, etc. Selon de nombreux scientifiques, le rôle joué par l'homme dans tous ces changements devient de plus en plus évident. En effet, l'homme occupe un espace croissant et soumet la nature à sa loi. Il consomme les ressources naturelles de la terre et produit des déchets par son industrie, son agriculture, ses transports et ses lieux d'habitat. Ces déchets modifient la composition du sol, de l'atmosphère, des rivières, des mers et des océans, ce qui a des répercussions sur le climat, les écosystèmes et la biodiversité.

Toutes ces modifications ont des retombées sur les conditions de vie et sur la santé de l'homme lui-même. Les biens naturels et les nécessités de base (aliments, eau, air et un environnement sain) peuvent être affectés par la mutation de l'environnement planétaire. La dégradation de la couche d'ozone, par exemple, entraîne un accroissement des rayons nocifs du soleil sur terre; dans certaines régions, les changements climatiques provoquent des

sécheresses qui désorganisent l'agriculture ou instaurent des conditions météorologiques extrêmes aux conséquences graves telles que des inondations; les modifications des courants et de la température de la mer influencent les systèmes climatiques, les voies de navigation et les bancs de poissons, etc.

Pour faire face au défi du changement mondial, les preneurs de décisions ont besoin d'instruments appropriés. Pour pouvoir les développer, il faut bien comprendre le comportement du système Terre.

## Recherches sur le *global change*

---

### Interactions complexes et incertitudes

Définir avec précision les mécanismes par lesquels les activités humaines et les processus naturels influencent la terre n'est déjà pas chose simple, car les interactions entre les divers composants naturels et notamment entre l'homme et son cadre de vie sont multiples et complexes. Mais évaluer ou prédire les influences et les effets de tous ces changements sur les écosystèmes et notre vie elle-même est un exercice autrement difficile.

### La politique et la science

Comprendre le monde qui nous entoure et les interactions entre l'homme et la nature devient absolument indispensable. Les décideurs et les politiciens ont besoin d'être conseillés en toute indépendance et d'avoir accès aux études scientifiques et aux résultats produits. La recherche et la science permettent des découvertes essentielles sur le fonctionnement du système écologique Terre et contribuent à l'évaluation des effets du *global change*, à la

prévision des risques, permettent de sonner l'alarme à temps en cas de problème, de mettre au point des indicateurs, des instruments de mesure et des technologies durables... et tant d'autres choses encore. Grâce à la recherche et à la science, les décideurs peuvent à tout moment adapter leur politique et leurs décisions à la réalité et aux perspectives d'évolution. Mais le scientifique doit rester conscient des limites de son rôle: l'expertise et les connaissances scientifiques ne constituent que l'un des éléments du processus de prise de décision et de développement des politiques. Les décisions politiques nationales et internationales auxquelles les scientifiques belges ont contribué en matière de *global change* sont reprises à l'Annexe 5 de l'Assessment and integration report détaillé et portent notamment sur les thèmes suivants: qualité de l'air, ozone stratosphérique, changements climatiques, Antarctique, protection de la nature et biodiversité, eau, utilisation de la terre, milieu marin, agriculture et sylviculture ainsi que développement durable.

## **Organisation de la recherche**

### **Au niveau international**

Etant donné que le *global change* est un phénomène mondial dont les effets et les causes se manifestent dans divers domaines, il faut non seulement s'organiser politiquement et collaborer à l'échelle planétaire, mais également adopter une approche internationale et multidisciplinaire en matière de recherche. La stratégie la plus efficace est une collaboration dans le cadre d'organismes et de programmes internationaux. C'est la raison pour laquelle les recherches de scientifiques du monde entier sont coordonnées par des initiatives planétaires telles que le Programme international Géosphère Biosphère, PIGB (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP), l'International Human Dimensions Programme on Global

Environmental Change (IHDP), le Programme mondial de recherches sur le climat, PMRC (World Climate Research Programme, WCRP) et l'International Biodiversity Programme DIVERSITAS (cf. Encadré 1). Ces quatre programmes de recherche, les plus importants, ont officialisé leur collaboration au sein de l'Earth System Science Partnership (ESSP) depuis 2001. Les objectifs de cette plate-forme sont de trouver des réponses à des questions essentielles concernant la terre en tant que système, et ce afin de formuler des mesures proactives permettant d'étayer scientifiquement les décisions et les politiques définies en rapport avec la problématique du *global change*. Les organismes parrainant la recherche se sont, eux aussi, regroupés au sein d'un forum de discussion: IGFA (International Group of Funding Agencies for global change Research).

### **Au niveau européen**

Dans le cadre des programmes de recherche européens, il y a eu une forte évolution quant à la problématique de l'environnement. Au départ, ces programmes étaient surtout axés sur la protection de l'environnement, mais dans le 6e Programme cadre (PC6, 2002-2006) ou "Sixth Framework Programme" (FP6), celle-ci a été intégrée au volet de recherche sur le développement durable. L'une des priorités est le thème "Changement Planétaire et Écosystèmes" qui, sur la base des connaissances scientifiques, vise l'orientation de la stratégie européenne pour le développement durable et le Sixième programme d'action environnemental (6EAP, 2001-2010) ou "Sixth Environment Action Programme" (6EAP).

En outre, la Fondation européenne de la science (European Science Foundation, ESF) est un intervenant important au niveau européen. Par ses Collaborative Research Programmes (EUROCORES), l'ESF entend rapprocher les établissements nationaux subsidiant la recherche

## Encadré 1: Programmes de recherche internationaux sur le 'Global Change'

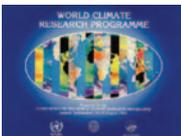
Etant donné que le *global change* revêt un caractère planétaire et a des influences multiples dans divers domaines, la recherche scientifique doit, de même, être coordonnée et intégrée au niveau mondial. Ce processus s'effectue par le biais des organismes suivants:



Le Programme international Géosphère Biosphère, PIGB (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP) est principalement axé sur les compartiments géochimiques de la terre (océans, terres et atmosphère) et leurs interactions. ([www.igbp.kva.se](http://www.igbp.kva.se)).



L'International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP) est un programme de recherche international, interdisciplinaire, non gouvernemental pour promouvoir et coordonner la recherche sur les dimensions humaines du *global change*. ([www.ihdp.uni-bonn.de](http://www.ihdp.uni-bonn.de))



Le Programme mondial de recherches sur le climat, PMRC (World Climate Research Programme, WCRP) a pour objet l'approfondissement du savoir scientifique fondamental sur le système et les processus climatiques. L'objectif est d'affiner les prévisions climatiques et de mieux évaluer l'influence de l'homme sur les changements climatiques. ([www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html](http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html)).



DIVERSITAS est un programme de recherche international sur la biodiversité visant à soutenir les politiques en matière de conservation des espèces et de développement durable. ([www.diversitas-international.org](http://www.diversitas-international.org)).



L'Earth System Science Partnership (ESSP) est la plate-forme au sein de laquelle le PIGB, l'IHDP, le PMRC et DIVERSITAS ont officialisé leur collaboration pour répondre à des questions essentielles sur la terre. Ces réponses doivent permettre d'étayer les décisions politiques par des arguments scientifiques afin de permettre une gestion durable de l'environnement au niveau international. ([www.essp.org](http://www.essp.org)).



La recherche européenne sur le *global change* est l'un des thèmes prioritaires du sixième Programme-cadre (2002-2006), principalement financé dans le cadre de la sous-priorité thématique 'Changement planétaire et écosystèmes'. Elle vise à définir les bases et outils scientifiques, technologiques et socio-économiques nécessaires pour étudier et comprendre les changements environnementaux. Elle met l'accent sur les problèmes environnementaux planétaires et régionaux pouvant avoir un impact significatif sur l'Europe, comme les changements climatiques, l'appauvrissement de l'ozone, la réduction de la biodiversité et la diminution de la fertilité du sol. ([www.cordis.lu/sustdev/environment](http://www.cordis.lu/sustdev/environment))



La Fondation européenne de la science, ESF, encourage le développement de la science européenne à la pointe du savoir en réunissant des scientifiques et chercheurs de premier plan et des agences de recherche et de financement dans le but de débattre sur la recherche européenne dans tous les domaines, y compris le changement planétaire, ainsi que de programmer et de mener des études. Ses programmes de recherche en partenariat EUROCORES sont un exemple de recherches en réseaux. ([www.esf.org](http://www.esf.org))

fondamentale et les inciter à collaborer sur des thèmes multidisciplinaires pertinents à l'échelle européenne. Dans ce contexte, le *global change* est considéré comme un thème important.

### **La Belgique**

L'existence des programmes de recherche internationaux ne dispense toutefois pas les institutions et les pouvoirs politiques nationaux d'encourager et de continuer à soutenir la recherche sur le *global change* au niveau national et régional. Quoique le *global change* soit un phénomène mondial, son impact sera variable sur les différents continents et il y aura même des différences sensibles entre les régions d'un même continent. La recherche locale reste donc une nécessité. La recherche locale ne permet pas directement d'apprécier l'impact planétaire du *global change* ni de formuler des réponses générales quant à la manière de l'appréhender. Individuellement, en effet, un chercheur ou un groupe de recherche ne peut étudier que certains aspects spécifiques du *global change*. Les causes et les effets de ces aspects, de même que les avis scientifiques étayant les lignes de force de la stratégie politique, ne peuvent être formulés dans leur globalité qu'au niveau international, voire mondial. Dans la pratique, cela revient donc à dire que les résultats des recherches de chaque scientifique concerné et l'interprétation de ces résultats doivent être regroupés. C'est pourquoi il est important non seulement de soutenir les chercheurs dans leurs études, mais aussi de les encourager à organiser et à développer des réseaux nationaux et internationaux et de leur fournir l'occasion de s'insérer dans les programmes de recherche internationaux.

### **La Politique scientifique fédérale**

En 1990, en réponse à l'initiative internationale IGBP, la Politique scientifique fédérale (Belgian Science Policy Office, BELSPO) a lancé son

propre programme de recherche sur le *global change*. Celui-ci soutient la recherche sur le *global change* principalement par le biais de programmes de recherche pluriannuels, par le financement des instituts de recherche scientifique fédéraux, par la conclusion d'accords de collaboration bilatéraux, par son programme spatial et par les activités entrant dans le cadre du "Plan d'appui scientifique à une politique de développement durable" (PADD).

## **Produits et expertise pour l'appui des politiques**

---

### **Types de résultats**

Dans le rapport détaillé "Belgian global change research 1990 – 2002: Assessment and integration report", se trouve un récapitulatif des diverses activités de recherche de la Politique scientifique fédérale en matière de *global change*, ainsi que des exemples de résultats pertinents (Annexes 1,2,3).

Les programmes de recherche soutenus par la Politique scientifique fédérale permettent en premier lieu d'élargir et d'approfondir le champ des connaissances. Les résultats scientifiques des projets sont publiés notamment dans des revues scientifiques et dans la presse à caractère général et sont, entre autres, intégrés dans des activités internationales d'assessment. Ils débouchent également sur un certain nombre de produits concrets, pratiques, et sur une expertise qui sont tous importants pour l'élaboration, la mise en œuvre et le suivi de la politique nationale et internationale.

On peut répartir les résultats et les produits de la recherche en mesures et inventaires, en analyses, en projets de démonstration et études pilotes, en modèles descriptifs, modèles prévisionnels et modèles d'impact, en séries de données à long terme, en fichiers de données, en cartes, en instruments de mesure et méthodes de calcul, en normes, en

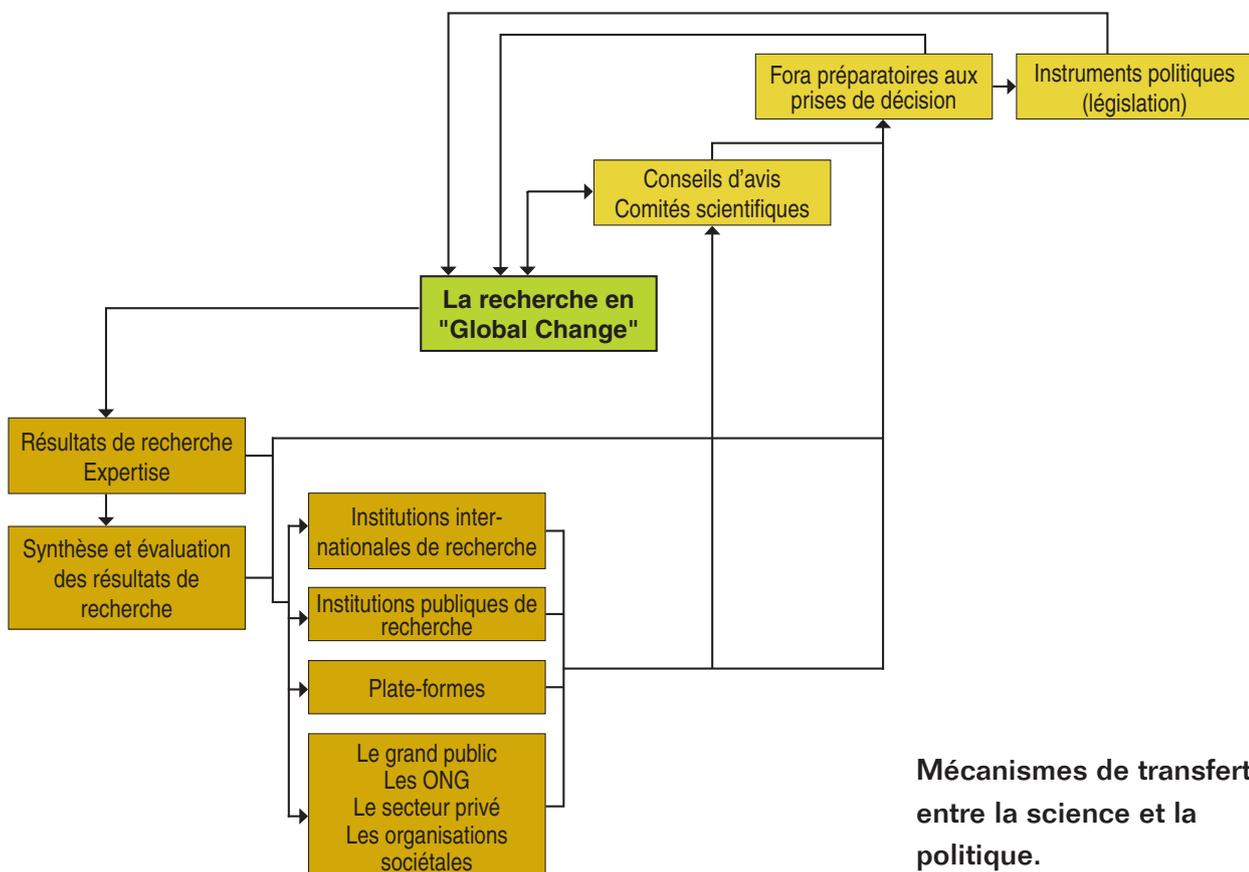
méthodologies, en manuels, en indicateurs, en systèmes d'information (notamment sites web), en plates-formes de discussion, en instruments et recommandations pour la définition des politiques, etc. Le scientifique joue également un rôle indispensable en tant qu'expert de la traduction et de l'interprétation des résultats de la recherche vers la prise de décision ainsi que pour la vérification scientifique de la politique menée.

## Intégration

Les résultats et l'expertise scientifiques ne sont exploitables en politique que s'ils sont correctement intégrés dans le processus décisionnel. C'est la raison pour laquelle un dialogue planétaire intense entre scientifiques et décideurs politiques est indispensable. En outre, il convient de formaliser, de consolider et de renforcer le dialogue existant. Par ailleurs, les bases de notre savoir doivent être étoffées pour

pouvoir répondre rapidement et avec efficacité aux grands défis auxquels nous confronte le *global change*. Divers mécanismes de transfert existent pour l'organisation de ce dialogue, ils sont résumés dans l'illustration présentée ci-dessous.

Les résultats obtenus par les scientifiques sont rendus publics via divers canaux de communication: revues scientifiques, articles de revue, journaux et revues de la presse générale, exposés durant des congrès, participation à des débats publics, etc. Parallèlement à ces canaux classiques, à l'échelle internationale, les résultats de la recherche sont fréquemment regroupés en rapports de synthèse et d'assessment. Les assessments scientifiques comportent des informations scientifiques et techniques détaillées, mais également intégrées, à la pointe des connaissances dans un domaine précis. Souvent, un rapport de synthèse et/ou un résumé est joint pour les décideurs politiques.



**Mécanismes de transfert entre la science et la politique.**

Parfois, les évaluations visent spécifiquement à répondre aux besoins d'une convention internationale. C'est le cas, notamment, du Millennium Ecosystem Assessment, rédigée pour les besoins de la CDB, Convention sur la diversité biologique (UN Convention on Biological Diversity, CBD) et de la convention de Ramsar. Quant aux évaluations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), elles ont servi de base pour l'élaboration de la Convention Climat (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), tandis que la série d'assessments scientifiques du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) et de l'OMM (Organisation météorologique mondiale) sur la dégradation de la couche d'ozone ont motivé divers amendements et adaptations du Protocole de Montréal.

Les rapports de synthèse et d'assessment atteignent non seulement les décideurs politiques nationaux et internationaux, mais aussi le grand public, les ONG, l'industrie et de nombreux autres groupements de la société qui, à leur tour, influencent le processus décisionnel. Phénomène récent, les chercheurs et les utilisateurs potentiels des résultats de la recherche ont été rassemblés au sein de "plates-formes thématiques". Pour les scientifiques, ces "plates-formes" sont l'occasion d'entrer en interaction avec d'autres scientifiques, avec les décideurs concernés et avec le public en général. Enfin, les scientifiques se chargent d'étayer et d'élaborer des politiques relatives à la problématique du *global change* au sein de diverses structures de concertation (telles que conseils et comités) au niveau local, régional, national, européen et mondial.

### **Le rôle de la Politique scientifique fédérale dans la recherche et le dialogue**

Acquérir toutes les connaissances scientifiques nécessaires pour répondre aux interrogations suscitées par le *global change* est tout à fait hors de portée d'un scientifique, d'un institut, d'une

communauté, d'un pays ou d'une discipline de recherche isolés. C'est pourquoi, comme nous l'avons indiqué plus haut, la Politique scientifique fédérale encourage les programmes de recherche s'inscrivant dans un cadre international. Ce faisant, elle met toutefois l'accent sur des thèmes dans lesquels les scientifiques belges possèdent ou peuvent développer une certaine expertise.

Au fil des années, les programmes de recherche sur le *global change* de la Politique scientifique fédérale ont subi une profonde mutation afin que cet objectif puisse être atteint. De monodisciplinaires, ils sont ainsi devenus pluridisciplinaires visant désormais à inclure des groupes d'utilisateurs dans les projets et si possibles de fusionner plusieurs projets (cf. Encadré 2).

#### **Encadré 2: Objectifs des recherches sur le *global change* soutenues par la Politique scientifique fédérale**

- ✓ **Approfondir le savoir scientifique en Belgique.**
- ✓ **Appuyer scientifiquement la prise de décision et les politiques au niveau régional, fédéral et international.**
- ✓ **Favoriser la participation de scientifiques belges aux réseaux de recherche internationaux et aux initiatives internationales d'assessment et d'intégration.**
- ✓ **Encourager la mise en place de réseaux et de stratégies de recherche multidisciplinaires.**
- ✓ **Intégrer et résumer les résultats de la recherche pour la conduite politique et le grand public.**
- ✓ **Promouvoir le dialogue entre les décideurs politiques et les scientifiques.**

# 1. Les modifications au sein de l'atmosphère



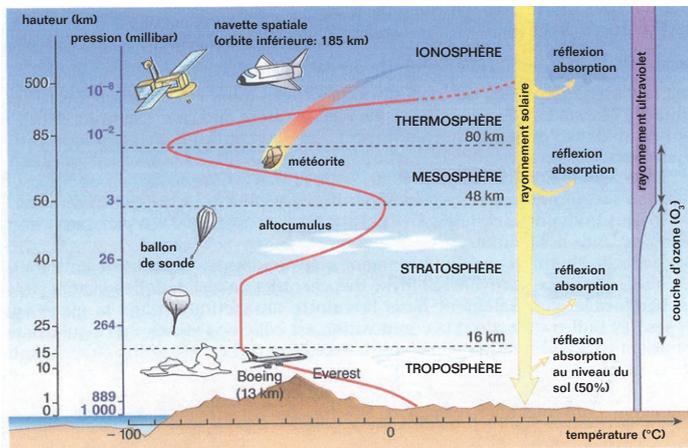
La terre est entourée d'un mélange de gaz constituant l'atmosphère (cf. Encadré 3). Cette atmosphère est caractérisée par différentes couches ayant des propriétés spécifiques. Sans atmosphère, la vie sur terre serait impossible.

Au cours des cent cinquante dernières années (la période industrielle), la composition de l'atmosphère a subi des modifications relativement importantes. La concentration en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), par exemple, a fortement augmenté, ce qui a des conséquences sur le climat. La quantité de particules microscopiques (les aérosols) a également augmenté dans les couches inférieures. Ceci n'a pas seulement des répercussions sur le climat, mais aussi sur notre santé. Ces changements ne peuvent cependant pas tous être exprimés aussi facilement sous une forme linéaire d'augmentation ou de réduction; en effet, en ce qui concerne l'ozone ( $\text{O}_3$ ), par exemple, on observe une augmentation

dans la troposphère (la partie inférieure de l'atmosphère) parallèlement à une réduction de sa concentration dans la stratosphère (cf. Encadré 4). Cette réduction est surtout marquée au-dessus des régions polaires, le fameux "trou dans la couche d'ozone". Au-dessus de la Belgique, nous assistons également à une réduction de l'ozone stratosphérique.

Les indices indiquant que ces changements sont provoqués par l'homme s'accumulent. Via ses zones urbanisées, son industrie, ses transports et son agriculture, l'homme rejette des gaz et des poussières dans l'air qui, directement ou indirectement, ont une influence sur la composition de l'atmosphère et entraînent des problèmes environnementaux divers. Dans ce chapitre, nous nous limiterons à la problématique de l'ozone et des aérosols, les changements de climat seront abordés dans le Chapitre 2.

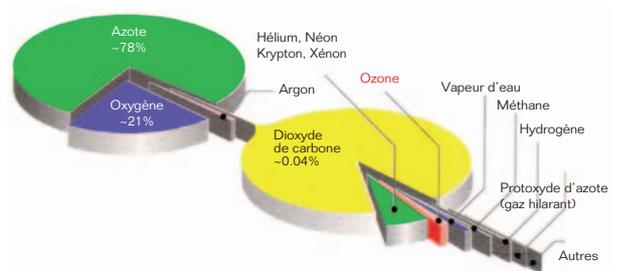
### Encadré 3: L'atmosphère: structure et composition



L'atmosphère est composée de plusieurs couches caractérisées par des gradients de température spécifiques en fonction de l'altitude. Dans la partie la plus basse de l'atmosphère (la troposphère), la température diminue graduellement plus on s'élève. A partir d'une altitude de 10 km environ, il y a inversion du gradient et la température remonte avec l'altitude. Cette couche (la stratosphère) se situe à peu près de 10 à 50 km d'altitude. Entre 50 et 100 km, on trouve la mésosphère où la température diminue à nouveau pour ensuite recommencer à s'élever dans la thermosphère. L'atmosphère est composée principalement d'azote ( $N_2$ , 78%) et d'oxygène ( $O_2$ , 21%). Elle contient également un éventail de gaz

moins abondants. Bien qu'ils soient présents en moindre quantité, ils ont néanmoins une influence importante sur le climat et le filtrage des radiations solaires UV nuisibles. Les deux gaz qui retiennent une attention particulière aujourd'hui sont le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et l'ozone ( $O_3$ ). Le premier atteint une concentration de 0,04% dans l'atmosphère, alors que l'ozone dans la stratosphère atteint une

concentration de 0,0003% - 3 particules d'ozone pour un million de particules d'air. A côté des constituants gazeux, on trouve également de minuscules particules liquides et solides, les aérosols. Ceux-ci ont un diamètre entre 1 nanomètre (nm) et plus de 10 micromètres ( $\mu m$ ), un millionième de millimètre à un centième de millimètre.



(R. Zander, ULg-GIRPAS).

### Encadré 4: L'ozone, la molécule de Janus

L'ozone est un gaz composé de trois atomes d'oxygène, représenté par la formule chimique  $O_3$ . Dans l'atmosphère de la terre, on trouve de l'ozone à deux endroits: 90% dans la stratosphère et 10% dans la troposphère. L'ozone présente une double face. Dans la stratosphère, il forme la "couche d'ozone". Les molécules d'ozone de cette couche constituent la "face protectrice" de l'ozone, car elles absorbent les rayons ultraviolets du

soleil, nuisibles pour les organismes vivants sur terre. Les molécules d'ozone étant fortement oxydantes, elles sont donc également nuisibles. C'est pourquoi il vaut mieux qu'elles soient loin de nous (dans la stratosphère, par exemple) et non dans notre proximité immédiate. C'est pour cette raison que l'ozone présent à la surface de la terre (dans la troposphère) constitue la "face nocive" de ce gaz.

# Les modifications au sein de l'atmosphère

## 1.1 L'ozone dans la stratosphère

### 1.1.1 L'ozone et le trou d'ozone

#### Le trou d'ozone au-dessus du Pôle Sud

Au cours des années 1970-1980, des scientifiques comme P. Crutzen, M. Molina et S. Rowland, ont montré en laboratoire que certains gaz rejetés par l'homme dans l'atmosphère déclenchent des cycles détruisant l'ozone. Il s'agit principalement de composés azotés (N), chlorés (Cl) et bromés (Br). A cette époque déjà, les scientifiques avaient postulé que ces substances pourraient représenter un problème pour la préservation de la couche d'ozone stratosphérique (cf. Encadré 5).

Le problème de l'ozone stratosphérique est devenu apparent dès le début des années 1980-1990. Des mesures effectuées à partir du sol ou de satellites ont démontré la réduction de la quantité d'ozone stratosphérique. C'est essentiellement au-dessus du Pôle Sud, durant le printemps antarctique (septembre-novembre), que l'on observe la destruction d'une grande partie de la quantité totale d'ozone dans l'air (appelée colonne d'ozone). Au début des années 1980-1990, cette réduction s'étalait sur une zone 150 fois plus grande que la Belgique. On observa également que le trou dans la couche d'ozone s'agrandissait et s'approfondissait d'année en année. En 2000, il était déjà cinq fois plus grand et les mesures indiquaient une colonne d'ozone inférieure de 70 à 80% à celle mesurée avant 1980.

La rapidité de l'expansion du trou d'ozone au-dessus du Pôle Sud a clairement indiqué que les seuls cycles catalytiques impliquant des composés azotés, chlorés et bromés ne pouvaient constituer une explication satisfaisante. Des recherches ont montré que ces réactions destructrices s'accéléraient en fonction du froid et de la quantité de nuages stratosphériques polaires (NSP). C'est en effet dans ces nuages que des composés inactifs

sont transformés en destructeurs actifs de l'ozone par ce que l'on appelle des réactions chimiques hétérogènes. La présence du vortex polaire joue également un rôle important dans ce processus (cf. Encadré 5).

#### L'hémisphère Nord est également menacé

Surveiller l'évolution de la couche d'ozone dans l'hémisphère Nord est également très important, car il s'agit de régions avec une forte densité de population. Une réduction des concentrations d'ozone pareille à celle enregistrée au-dessus de l'Antarctique entraînerait de graves problèmes de santé. En effet, la réduction de la couche d'ozone entraîne une augmentation du rayonnement UV solaire à la surface terrestre, un rayonnement nocif pour tous les organismes vivants. Pour l'homme, par exemple, cette augmentation aurait comme conséquence une augmentation des cancers de la peau et des cataractes.

■ **C'est pourquoi l'Union Européenne (UE) a mis en œuvre une série de programmes à large échelle destinés à l'étude de l'évolution de la couche d'ozone au-dessus de l'hémisphère Nord. L'objectif était de vérifier si l'on assiste, ici aussi, à des processus de destruction de l'ozone semblables à ceux qui se produisent au-dessus de l'Antarctique. Des chercheurs belges participèrent aussi à ces programmes via les projets de recherche suivants: European Arctic Stratospheric Ozone Experiment (EASOE), Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment (SESAME) et Third European Stratospheric Experiment on Ozone (THESEO). Le programme VINTERSOL (Validation of International Satellites and Study of Ozone Loss) se déroule actuellement dans ce même cadre.**

## Encadré 5: Formation et destruction de l'ozone: un écheveau complexe de réactions

### Cycle en équilibre

Les quatre réactions du cycle de Chapman forment la base de la formation et de la destruction de l'ozone stratosphérique. Dans la première réaction, une molécule d'oxygène ( $O_2$ ) est décomposée en deux atomes d'oxygène (O) par la lumière ultraviolette (UV) avec une longueur d'onde comprise entre 185 nm et 220 nm (UV-C). Dans une deuxième étape, l'oxygène atomique de la première réaction se recombine avec l'oxygène moléculaire pour former l'ozone:



Le résultat net de ces deux réactions est la production d'ozone. Mais sous l'influence de la lumière ultraviolette avec une longueur d'onde comprise entre 210 nm et 300 nm (UV-B), l'ozone se décompose en une molécule d'oxygène et un atome d'oxygène (O). Si ce dernier entre par hasard en contact avec une molécule d'ozone, il s'ensuit la formation de deux molécules d'oxygène:



Ce cycle est responsable de la plus grande partie de la formation et de la destruction de l'ozone stratosphérique, mais n'explique pas à lui seul les concentrations d'ozone observées. Pour ce faire, il faut prendre en compte des cycles catalytiques complémentaires.

### Cycle catalytique

L'exemple donné est celui des réactions catalytiques des composés chlorés avec l'ozone, le déroulement des réactions de destruction des composés azotés et bromés étant semblable.

Sous l'influence de la lumière, les chlorofluorocarbures (CFC) sont dissociés et libèrent des atomes de chlore. Ainsi, la réaction photolytique de  $CF_2Cl_2$  - (un des CFC les plus courants, également appelé Fréon-12 ou CFC-12) libère un atome de chlore:



Et voilà le ton donné: la suite de la photolyse stratosphérique résulte finalement en une destruction totale des CFC avec libération d'atomes de chlore, initiant à leur tour le cycle des réactions de destruction de l'ozone selon:



L'atome halogène (Cl) est un catalyseur de la destruction d'ozone: le même atome, qui a été utilisé dans la première réaction de cette séquence, est à nouveau libéré dans la dernière réaction. C'est en raison de cette régénération de l'atome de chlore que nous parlons d'un cycle catalytique. Quelques atomes de chlore peuvent ainsi détruire des centaines de molécules d'ozone avant de réagir avec une autre molécule gazeuse et être ainsi rendus inoffensifs. L'autre molécule gazeuse peut, par exemple, être du méthane. Les réactions de ces molécules avec un atome de chlore entraînent la formation d'acide chlorhydrique (HCl): un réservoir stable de chlore. Une autre réaction de neutralisation a lieu entre l'oxyde de chlore (ClO) et le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ):



## Les modifications au sein de l'atmosphère

Les deux molécules (HCl) en le nitrate de chlore ( $\text{ClONO}_2$ ), sont temporairement "inactives" au niveau de la destruction de l'ozone et sont appelées réservoirs temporaires de chlore.

C'est pour la découverte, au début des années 1970-1980, des réactions catalytiques impliquant le chlore, le brome et les oxydes d'azote et l'analyse de leurs importances relatives dans la destruction de l'ozone stratosphérique, que P. Crutzen, M. Molina et S. Rowland obtinrent le Prix Nobel de chimie en 1995. C'était la première fois qu'un Prix Nobel était attribué pour des travaux de recherche relatifs à l'influence de l'homme sur son environnement. Cette découverte avait mené, en 1987, au Protocole de Montréal des Nations Unies afin de bannir la production des produits chimiques industriels détériorant la couche d'ozone.

### Les accusés

Le cycle est toutefois déséquilibré par un concours de circonstances. Le premier rôle revient aux substances destructrices d'ozone fabriquées par les processus industriels et qui ne sont pas présentes comme telles dans la nature. Les gaz les plus actifs et connus dans la destruction d'ozone sont sans aucun doute les produits de dégradation des CFC, qui ont été produits en masse au cours des années 1970-1980. Ils ont servi de liquide réfrigérant pour les réfrigérateurs et les installations frigorifiques industrielles, comme gaz propulseurs dans les bombes aérosols, comme gaz de remplissage des mousses isolantes et des extinctrices, comme dégraissants et produits de nettoyage pendant la production des

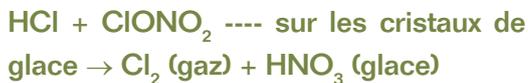
micro-chips électroniques et de pièces optiques, etc. Mais les CFC ne sont pas les seuls destructeurs de l'ozone. Certains composés bromés (appelés halons), qui sont utilisés dans la lutte contre les incendies de forêt, dans les ignifugeants ou pour la désinfection du sol dans des serres, détruisent également l'ozone stratosphérique. Enfin, certains composés azotés, qui sont rejetés dans l'air par l'utilisation d'engrais chimiques, ont également une influence négative sur la couche d'ozone.

### Réservoirs et nuages froids

Les atomes chlorés intervenant dans la destruction de l'ozone sont également formés d'une autre manière: à partir de la molécule de chlore ( $\text{Cl}_2$ ) qui est formée à la surface des nuages stratosphériques polaires (NSP) froids. Ces nuages sont constitués de cristaux d'eau et contiennent à la fois de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et de l'acide azotique ( $\text{HNO}_3$ ). Ils ont deux effets négatifs sur l'ozone stratosphérique.

- ✓ Au cours de la formation de ces nuages, le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) est extrait de l'atmosphère et transformé en acide azotique. Étant donné que normalement le dioxyde d'azote est un important atténuateur du cycle catalytique du chlore (via la formation de  $\text{ClONO}_2$ ), la destruction de l'ozone sera moins freinée.
- ✓ Les nuages stratosphériques polaires (NSP) forment des surfaces sur lesquelles des réactions entre certains gaz peuvent se produire durant le long hiver polaire. Il s'agit de ce que l'on appelle les réactions hétérogènes: des gaz qui réagissent entre eux sur

une surface solide. Une importante réaction hétérogène est:



Le résultat ultime est donc l'accumulation de molécules de chlore ( $\text{Cl}_2$ ) dans l'atmosphère sombre. Lorsqu'au printemps réapparaît le soleil, ces molécules chlorées se dissocient en atomes de chlore (Cl) qui vont alimenter intensément le cycle catalytique de destruction de l'ozone.

Cette chaîne complexe de réactions explique immédiatement plusieurs faits remarquables:

- ✓ Pourquoi le trou d'ozone au-dessus du Pôle Sud apparaît toujours au cours du printemps local. La période d'hiver plus sombre et plus froide est nécessaire à la transformation des réservoirs chlorés "inactifs" en gaz chloré "actif". Ce n'est qu'au printemps, lorsque le soleil réapparaît au-dessus de l'horizon polaire, que le gaz chloré se dissocie en atomes de chlore.
- ✓ Pourquoi, à côté d'un impact direct possible sur la couche d'ozone, le rejet dans l'atmosphère de composés azotés a également une influence négative indirecte. Ces composés sont en effet absorbés temporairement dans les nuages stratosphériques polaires (NSP) et ne peuvent plus fixer les radicaux chlorés réactifs ( $\text{ClO}_x$ ).

Quelques processus chimiques hétérogènes peuvent également se produire sur les aérosols qui sont, par exemple, éjectés dans la stratosphère lors d'éruptions volcaniques intenses.

### **Le vortex polaire**

La présence de ce que l'on appelle le vortex polaire joue également un rôle important dans le processus de destruction de l'ozone stratosphérique polaire. Il s'agit d'une circulation bien structurée des vents dans la stratosphère, qui se manifeste au-dessus des régions polaires au cours des hivers locaux. Il est généralement plus important au-dessus du Pôle Sud que du Pôle Nord. Le vortex polaire empêche l'air stratosphérique au-dessus des régions polaires de se mélanger avec de l'air venant des moyennes latitudes, ce qui entraîne une très forte baisse de la température. La stratosphère locale peut ainsi être considérée comme un corset hermétique au sein duquel le processus de destruction de l'ozone prend place de manière très efficace. Les variations de taille et de profondeur du trou d'ozone résultent des fluctuations interannuelles de la température ainsi que de l'intensité et de la durée du vortex polaire.

### **Un système complexe**

Le cycle du chlore pris comme exemple ici ne représente que la pointe de l'iceberg de la chimie de l'ozone stratosphérique. Il s'insère dans un contexte complexe impliquant divers facteurs importants: l'activité du soleil, la présence de nuages et d'aérosols, l'activité des autres gaz et les échanges entre l'ozone troposphérique et stratosphérique.

En outre, l'impact des changements atmosphériques se fait sentir dans de nombreux domaines: pas seulement sur la couche d'ozone, mais aussi sur les changements de climat. C'est pourquoi une vision scientifique de l'atmosphère et des modifications qui y prennent place en tant qu'ensemble multidisciplinaire intégré, bref en tant que système holistique, est de plus en plus indispensable.

## Les modifications au sein de l'atmosphère

Les campagnes de mesure ont montré que depuis la moitié des années 1980-1990, un trou d'ozone s'est également formé dans la région arctique. La réduction est toutefois moins importante que celle observée au-dessus du Pôle Sud.

En 1997, par exemple, la réduction maximale de la colonne d'ozone ne s'élevait qu'à 22%. En outre les variations annuelles des concentrations d'ozone sont plus importantes au Pôle Nord.

Les recherches ont montré que les processus de destruction de l'ozone dans l'hémisphère Nord sont essentiellement les mêmes que ceux prévalant dans l'hémisphère Sud. Les composés azotés, chlorés et bromés jouent, ici aussi, un rôle clé: le monoxyde de chlore (ClO), le monoxyde de brome (BrO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) sont directement impliqués dans les cycles catalytiques détruisant l'ozone. D'autres composés tels que le dioxyde de chlore (ClO<sub>2</sub>) peuvent de leur côté fonctionner comme indicateurs, permettant de voir dans quelle mesure les réservoirs chlorés à faible activité sont transformés en formes réactives et destructrices d'ozone.

### Renversement de politique

En réponse aux inquiétudes du monde scientifique, les Nations Unies (NU) ont adopté en 1985 la "Convention de Vienne pour la Protection de la couche d'Ozone". Cet accord a été concrétisé en 1987 par le Protocole de Montréal qui prévoit de bannir progressivement la production des gaz destructeurs d'ozone. Tous les consortiums chimiques importants ont respecté les décisions initiales du protocole ainsi que les amendements et les ajustements qui y ont été apportés.

■ **Les adaptations du Protocole de Montréal ont été basées sur des mesures atmosphériques continues et plus globales**

■ **ainsi que sur des nouvelles connaissances scientifiques. Les chercheurs belges ont fortement contribué à ces mises à jour du Protocole, en participant aux 'assessments' internationaux publiés régulièrement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). De plus, les chercheurs belges participent également à de nombreux panels techniques et scientifiques internationaux préparant les processus décisionnels.**

### 1.1.2 Mesurer pour savoir

#### Intégrer les mesures

Les modifications au sein de l'atmosphère sont souvent réparties en fonction des différentes couches (stratosphère et troposphère) ou des différents composés comme l'ozone (O<sub>3</sub>), les aérosols et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), qui ont chacun leur propre impact sur le climat, la santé, les écosystèmes, la biodiversité, etc. Une répartition en soi logique, mais hélas souvent trop simpliste. En effet, la réalité est généralement plus complexe et ne se laisse pas si facilement compartimenter. La stratosphère et la troposphère, par exemple, ne sont pas des couches strictement délimitées de l'atmosphère, bien au contraire: entre elles les échanges sont permanents, ce qui fait que les processus chimiques et physiques de l'une influencent l'autre. Cette situation introduit une dimension complexe supplémentaire à laquelle se trouve confronté quiconque désire explorer le comportement de l'atmosphère. Pour corser le tout, les échanges entre la stratosphère et la troposphère sont tout sauf constants: ils sont différents au niveau des pôles ou au niveau de l'équateur et, de plus, varient en fonction des saisons.

En raison du couplage entre ces différents sous-systèmes, étudier l'évolution de la composition de l'atmosphère doit se faire de manière intégrée et à l'échelle globale. Une telle intégration doit impliquer une combinaison

de techniques de mesure effectuées à partir de différentes plates-formes (mesures au sol, aériennes, par ex. à partir de ballons stratosphériques, d'avions, de satellites) et effectuées avec toute une série d'instruments complémentaires. Parfois il s'agit de données de mesures collectées localement (in situ), mais le plus souvent de mesures effectuées à distance (télé-détection).

Depuis des années, des chercheurs belges de l'ULg-GIRPAS, de l'IASB et de l'IRM participent activement à la collecte de mesures sur l'atmosphère. Celles-ci sont effectuées en premier lieu dans le cadre d'un réseau international de stations de mesures au sol: le Network for the Detection of Stratospheric Change (NDSC). La station de haute altitude du Jungfraujoch, utilisée par des chercheurs belges, est un exemple d'une station du NDSC (cf. photo ci-dessous). Mais ils contribuent également à des expériences satellitaires comme Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy Experiment (ATMOS), Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), European Environmental Satellite ENVISAT, etc. De plus, ils participent aux campagnes de recherche et de mesures européennes et internationales comme EASOE, SESAME, THESEO, le EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Trace Constituents in the Troposphere over Europe (EUROTRAC) et Validation of International Satellites and Study of Ozone Loss (VINTERSOL). Les chercheurs belges effectuent des mesures non seulement à Uccle (Bruxelles), mais aussi à Harestua (Norvège), au Jungfraujoch (Suisse), en Haute Provence (France) et à Saint-Denis (Ile de la Réunion). Pour pouvoir obtenir une image globale, ces mesures doivent être combinées à celles

d'autres scientifiques du monde entier. Les scientifiques belges sont également actifs dans la conception et la réalisation d'instruments de mesure, dans des campagnes d'étalonnage et de validation, dans la production de paramètres spectroscopiques et cinétiques fondamentaux des gaz atmosphériques, dans le développement d'algorithmes permettant de convertir les observations satellitaires en unités utilisables et compréhensibles, par exemple les concentrations des gaz atmosphériques et d'aérosols, etc.



La station Scientifique Internationale du Jungfraujoch (SSIJ), Suisse (3.580 msnm).

### Modéliser pour apprendre et prédire

Sur la base de toutes ces mesures, les chercheurs tentent d'élaborer des modèles numériques permettant de décrire et de comprendre le comportement de l'atmosphère et d'identifier les processus sous-jacents. Ils parviennent ainsi à obtenir une meilleure connaissance des mécanismes impliqués dans la formation et la destruction de l'ozone atmosphérique. Ils acquièrent une meilleure compréhension du caractère et de l'intensité de l'influence anthropique. Ils peuvent également prédire les conséquences de la destruction de l'ozone stratosphérique. A l'aide de simulations, ils peuvent enfin vérifier quelles sont

# Les modifications au sein de l'atmosphère

les stratégies politiques les plus aptes à solutionner le problème de l'ozone stratosphérique et d'autres problèmes.

Des chercheurs attachés à différents instituts belges de recherche (dont l'IASB et l'IRM) travaillent au développement de modèles numériques simulant le comportement de l'atmosphère. BASCOE (Belgian Assimilation System of Chemical Observations from Envisat), par exemple, est un modèle unique qui a été développé à l'IASB. Ce modèle est destiné au traitement des données ENVISAT (un satellite d'observation terrestre qui a été lancé en mars 2002 par l'Agence Spatiale Européenne, ASE). A bord se trouvent trois instruments destinés à l'observation de nombreux constituants chimiques de l'atmosphère. Outre le fait que ces observations ne sont pas continues dans le temps, elles ne peuvent pas assurer une couverture géographique globale en un jour et elles ne mesurent pas tous les constituants.

Pour améliorer cette situation, BASCOE se base, d'une part, sur un modèle numérique développé auparavant et utilise, d'autre part, des données de mesure concrètes livrées par ENVISAT, afin que les analyses de ce modèle numérique collent le plus possible à la réalité des mesures. Il fournit des informations uniformes, dans le temps et dans l'espace, consistantes avec les observations assimilées. Sur la base des observations journalières, les prévisions concernant l'évolution de la composition chimique sont également calculées pour les huit jours suivants. Le modèle de prévision chimique avec assimilation BASCOE est unique au monde. Il est basé sur les technologies les plus avancées utilisées par un nombre limité de grands

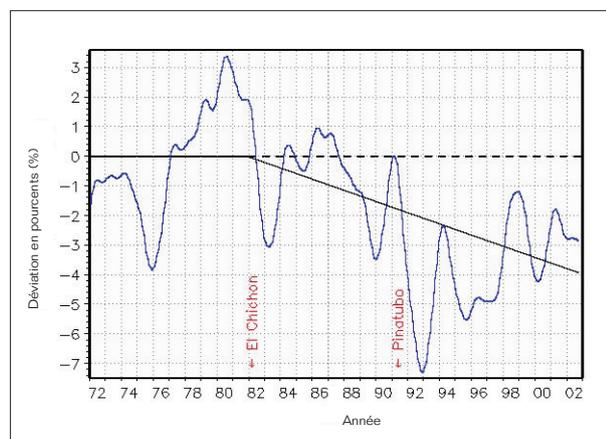
centres de prévisions météorologiques. Il offre également un soutien indispensable à VINTERSOL (cf. Section 1.1.1).

## 1.1.3 Raréfaction de l'ozone au-dessus de la Belgique

### Tendance négative

Alors que, depuis le début des années 1980-1990, la destruction de l'ozone stratosphérique est évidente au-dessus des zones arctiques et antarctiques au cours des printemps locaux, on a également constaté, depuis la moitié des années 1980-1990, une réduction de la colonne d'ozone stratosphérique aux latitudes moyennes. Il s'agit d'un développement à surveiller attentivement étant donné la densité élevée des populations qui y habitent. Une réduction de la protection contre la radiation ultraviolette (UV) offerte par l'ozone stratosphérique peut en effet avoir des conséquences importantes pour la santé.

La concentration d'ozone dans la stratosphère est continuellement mesurée dans l'hémisphère Nord, entre autres par les chercheurs belges de l'IASB, de l'ULg-GIRPAS et de l'IRM (cf. figure ci-dessous). Ce faisant, ils surveillent également les concentrations des autres gaz et



Déviation de la colonne totale d'ozone (en %) par rapport à la colonne moyenne d'ozone au-dessus d'Uccle (Bruxelles) entre 1972 et 1982. (H. De Backer, IRM).

- constituants influençant la destruction de l'ozone stratosphérique.
- En se basant sur les mesures à long terme effectuées par l'IRM, il apparaît que la concentration d'ozone au-dessus d'Uccle a diminué de  $0,27 \pm 0,04$  % par an entre 1982 et 2002. Cette tendance négative s'intensifie principalement en raison de fortes déviations négatives hivernales et printanières. Outre cette tendance négative, on a enregistré de fortes réductions de la concentration d'ozone au-dessus d'Uccle après les éruptions volcaniques intenses d'El Chichón (Mexique, 1982) et du Mont Pinatubo (Philippines, 1991). Ces phénomènes naturels ont en effet éjecté de grandes quantités d'aérosols jusque dans la stratosphère. Les processus chimiques hétérogènes se produisant dans les aérosols ressemblent aux processus observés au sein des nuages stratosphériques polaires (NSP).

#### "Mini-trous"

Les chercheurs ont également constaté que les variations journalières dans la colonne d'ozone peuvent être très importantes. Au-dessus d'Uccle (Bruxelles), par exemple, des diminutions pouvant atteindre 30% ont été observées d'un jour à l'autre par rapport à la moyenne à long terme. Ces mini-trous ne sont pas le résultat de processus d'ordre anthropique, mais plutôt la conséquence de processus dynamiques. De tels mini-trous ont également été observés à d'autres endroits (Harestua, Norvège; Jungfraujoch, Suisse et Haute Provence, France).

### 1.1.4 Aérosols dans la stratosphère

#### Les éruptions volcaniques

L'atmosphère n'est pas composée que de gaz. On y trouve également des aérosols:

un "brouillard" de fines particules liquides ou solides. Leur présence dans la stratosphère dépend fortement de l'activité volcanique sur terre, étant donné que les éruptions volcaniques intenses éjectent parfois de grandes quantités de ce type de particules jusque dans la stratosphère. Les aérosols stratosphériques sont composés principalement d'un mélange d'eau et d'acide sulfurique. Outre leur influence sur le climat (ils sont un facteur de refroidissement – cf. Chapitre 2), ces particules renforcent également de manière indirecte la destruction de l'ozone stratosphérique.

- Au cours des 10 dernières années, les chercheurs belges ont eu l'occasion d'étudier les aérosols stratosphériques. Après l'éruption du Mont Pinatubo (Philippines, 1991), par exemple, ils ont pu fortement élargir leurs connaissances sur la distribution et le comportement des aérosols volcaniques dans la stratosphère. A l'aide du radiomètre d'occultation ORA, construit par des chercheurs de l'IASB et installé à bord du satellite EURECA, ils ont effectué des mesures de l'atmosphère terrestre pendant 7.000 levers et couchers du soleil. Un des résultats scientifiques les plus importants de cette expérience a été la découverte de la distribution et de l'évolution des aérosols situés entre 12 et 35 km d'altitude. Ces données ont été utilisées pour la construction d'un modèle sur la distribution moyenne des aérosols dans l'espace et dans le temps, en d'autres termes 'une climatologie des aérosols'. De tels modèles sont utilisés, entre autres, pour la description des processus atmosphériques incluant la chimie hétérogène. Les scientifiques peuvent ainsi mieux comprendre la destruction de l'ozone et développer des scénarios de lutte contre la poursuite de sa destruction.

# Les modifications au sein de l'atmosphère

## Impact des aérosols sur l'ozone (O<sub>3</sub>) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)

Comme indiqué auparavant, les réactions chimiques hétérogènes jouent un rôle très important dans la destruction de l'ozone. Dans ces réactions, des composés gazeux de la stratosphère (qui au départ ne contribuent pas directement à la destruction de l'ozone et sont de ce fait appelés réservoirs) sont transformés, à la surface de particules solides, en destructeurs d'ozone. Dans les régions polaires, les surfaces solides sont le plus souvent des cristaux se trouvant dans les nuages stratosphériques polaires (NSP). Un grand nombre de ces réactions hétérogènes se produisent à des températures extrêmement basses, en dessous des -78°C. Les aérosols volcaniques servent de support alternatif pour des réactions chimiques hétérogènes. C'est ainsi que le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) peut être transformé en acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) à leur surface. Ce faisant, le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) actifs sont extraits de l'atmosphère et empêchent la transformation des radicaux actifs de chlore et de brome en molécules-réservoirs le nitrate de chlore (ClONO<sub>2</sub>) et le nitrate de brome (BrONO<sub>2</sub>), des molécules inactives donc. Les mesures effectuées après les éruptions d'El Chichón (1982) et du Mont Pinatubo (1991) ont permis de montrer que les aérosols volcaniques ont effectivement détruit l'ozone dans les mois qui ont suivi.

### 1.1.5 La couche d'ozone et son impact sur la santé et le climat

Sans couche d'ozone, la vie sur terre serait totalement différente. L'ozone stratosphérique absorbe en effet le rayonnement UV du soleil, principalement les UV-B (280-315 nm) et dans une moindre mesure les UV-A (315-400 nm). La réduction de l'ozone stratosphérique entraîne une augmentation du rayonnement UV-B atteignant la surface terrestre, un rayonnement

qui est particulièrement nuisible pour la vie biologique (et donc pour la santé de l'homme). En effet, les UV-B entraînent un risque plus élevé de cancers de la peau, de cataracte, de coups de soleil, de vieillissement de la peau et de modifications du système immunitaire.

■ Les chercheurs de l'IASB ont confirmé qu'une réduction de la concentration d'ozone stratosphérique au-dessus d'Uccle allait de pair avec une augmentation du rayonnement UV-B à la surface de la terre. Afin d'attirer l'attention du public sur ces dangers, un consortium international de chercheurs a élaboré un indice UV standard, qui indique les doses d'UV nocives pour la peau humaine. Cet indice est calculé journalièrement par l'IRM et, pendant l'été, porté à la connaissance du public par le biais de bulletins météorologiques.

Les modifications au sein de l'ozone stratosphérique ont également un impact sur le climat. Sa réduction entraîne une diminution de l'absorption de chaleur qui est émise vers l'espace par la surface terrestre. Le trou d'ozone entraîne donc ici un refroidissement (impact sur l'équilibre radiatif - (0,15±0,1) W/m<sup>2</sup>). Certains gaz destructeurs d'ozone ont toutefois eux-mêmes un effet de réchauffement. Mais il faut tenir compte du fait que ces effets ne seront que temporaires. En raison de l'implémentation du Protocole de Montréal (dont l'objectif ultime est le bannissement de la production humaine de gaz réducteurs d'ozone), les scientifiques s'attendent à ce que l'effet de refroidissement résultant d'une plus faible densité de la couche d'ozone et l'effet de réchauffement dû aux destructeurs d'ozone soient tous deux fortement atténués vers la moitié du 21<sup>ème</sup> siècle.

### 1.1.6 Le trou d'ozone est-il sous contrôle?

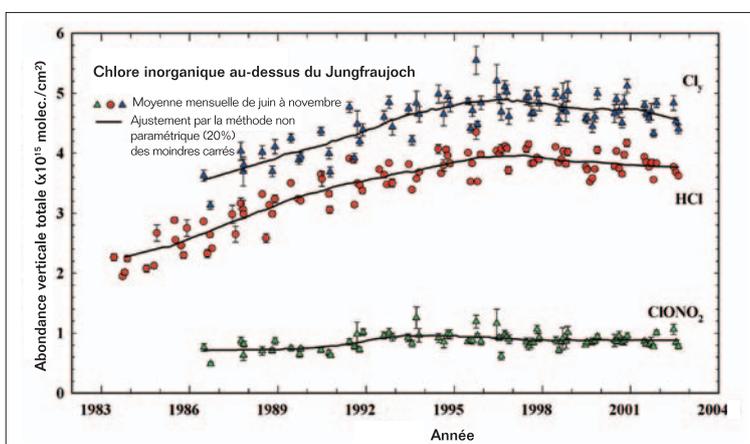
Comme expliqué auparavant, le Protocole de Montréal vise l'élimination progressive de toutes les substances produites par l'homme détruisant la couche d'ozone. Les substances les plus destructrices ont été visées en premier lieu. Pour ce faire, il n'a pas seulement été tenu compte de leur potentiel destructeur d'ozone, mais aussi des quantités produites et libérées dans l'atmosphère ainsi que de leur durée de vie dans la troposphère et stratosphère. C'est pourquoi le protocole s'est d'abord attaqué aux chlorofluorocarbures CFC-11 et CFC-12, ensuite à d'autres CFC, au méthylchloroforme ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ), au tétrachlorure de carbone ( $\text{CCl}_4$ ) et aux composés bromés (halons). Depuis 1995, la production de ces substances est interdite dans l'UE et dans pratiquement tous les pays adhérant au protocole, ce qui a entraîné une stabilisation dans l'atmosphère des composés chlorés produits par l'homme. Cette évolution a d'abord été mesurée dans la troposphère et s'est ensuite propagée à la stratosphère.

Malgré l'arrêt de la production des halons depuis 1994, la concentration en brome dans l'atmosphère n'a cessé d'augmenter. Ceci est la conséquence des réserves importantes de ces composés dans les pays industrialisés et de la poursuite de leur utilisation dans la lutte contre les incendies. Le problème des halons est donc loin d'être résolu.

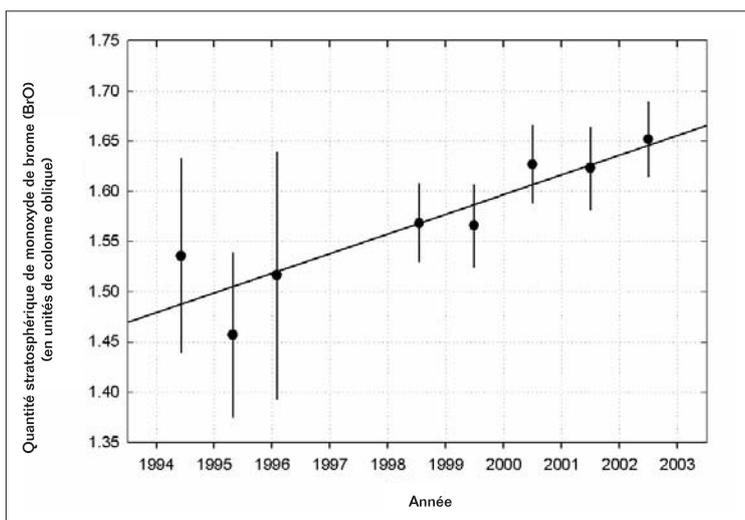
Des mesures continues, effectuées par les chercheurs de l'ULg-GIRPAS et de l'IASB, ont permis de constater que la concentration totale des composés inorganiques chlorés dans la stratosphère s'est stabilisée et

commence à diminuer légèrement, alors que la quantité des composés inorganiques bromés continue à augmenter (cf. figures ci-dessous).

Dans l'hypothèse d'une totale conformité aux restrictions imposées par le Protocole de Montréal, les prévisions des modèles indiquent que vers la moitié de ce siècle, les concentrations atmosphériques des destructeurs d'ozone contenant du chlore produits par l'homme



Evolution de la quantité moyenne mensuelle de acide chlorhydrique (HCl) et de nitrate de chlore ( $\text{ClONO}_2$ ) au-dessus du Jungfraujoch, Suisse (chlore inorganique  $\text{Cl}_y = \text{HCl} + \text{ClONO}_2$ ). (E. Mahieu, ULg-GIRPAS).



Evolution de la quantité moyenne annuelle de monoxyde de brome (BrO) au-dessus de Harestua, Norvège. (M. Van Roozendaal, IASB).

# Les modifications au sein de l'atmosphère

seront retombées à des niveaux permettant à la couche de retrouver son état d'avant 1980. Dès lors, les scientifiques estiment que le trou d'ozone disparaîtra progressivement au cours des 50 années à venir. Toutefois, les différents modèles ne s'accordent pas sur la rapidité de ce rétablissement, car trop d'inconnues persistent comme, par exemple, l'effet d'un refroidissement complémentaire de la stratosphère résultant de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), des modifications dans la circulation atmosphérique et dans les échanges qui ont lieu entre la troposphère et la stratosphère, etc. Ces facteurs d'incertitude impliquent le maintien de la vigilance et des mesures/vérifications continues de l'évolution de la couche d'ozone et des processus qui ont lieu dans l'atmosphère.

## 1.2 Trop d'ozone au niveau du sol

### 1.2.1 La complexe chimie de l'ozone troposphérique

La plus grande partie (~90%) de l'ozone se trouve dans la stratosphère, le reste dans la troposphère. Cette répartition est heureuse, car le contact direct avec trop d'ozone est nocif pour tous les organismes vivants. En raison de sa capacité oxydante, l'ozone attaque les voies respiratoires, principalement chez l'enfant et les personnes âgées, mais également chez l'adulte souffrant d'asthme. L'ozone est également nocif pour les cultures agricoles, les forêts, les écosystèmes et même les matériaux comme le caoutchouc et la peinture. En outre, l'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre: il absorbe la chaleur émise par la surface terrestre et contribue ainsi au réchauffement de la terre.

Les indications confirmant que la concentration d'ozone augmente au niveau des zones fortement industrialisées se multiplient. L'ozone n'est pas directement produit par les activités humaines, mais il est formé à la suite d'une série de processus chimiques dans lesquels les émissions de gaz

polluants dus au transport et à l'industrie ainsi que certaines substances émanant de la nature elle-même, jouent un rôle crucial. Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) et les composés organiques volatils (également appelés COV) comme les alcènes, les aromates et les terpènes, occupent une place importante dans la chimie complexe de l'ozone troposphérique.

L'ozone est principalement formé en présence de températures élevées et de lumière solaire abondante, donc pendant les jours chauds de l'été. La figure qui suit donne un aperçu de la complexité de la chimie de l'ozone troposphérique. Des centaines de constituants, de réactions chimiques et de processus d'échanges interviennent dans la formation et la destruction de l'ozone troposphérique. Actuellement, nous n'en comprenons que quelques-uns, nous pouvons donc parler ici d'un véritable nœud gordien.

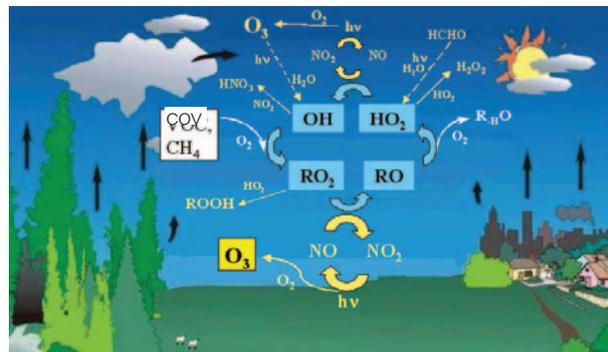


Schéma général de formation d'ozone et de l'oxydation des composés organiques volatils (COV) dans la troposphère. (J. Peeters, KULeuven-PAC; J.F. Muller, IASB).

■ Une compréhension fondamentale des caractéristiques des gaz et de leurs interactions constitue la base d'une interprétation correcte des études atmosphériques plus concrètes. Sans cette connaissance fondamentale, les résultats des mesures sur la composition de l'atmosphère n'ont qu'une valeur toute relative. Au cours de la dernière décennie, l'apport des chercheurs belges

- à cette connaissance fondamentale a été
- important. Les chercheurs de l'ULB-
- SPECAT et de l'IASB ont ainsi étudié
- l'absorption et les caractéristiques
- spectroscopiques de nombreux gaz
- présents dans l'atmosphère. Des
- chercheurs du groupe KULeuven-PAC
- ont notamment étudié les réactions
- chimiques des COV naturels dans la
- basse atmosphère, en se concentrant
- sur celles entraînant la formation et la
- destruction de l'ozone.

Bien que le nœud gordien de la formation de l'ozone ne soit pas encore entièrement dénoué, nous en connaissons cependant les causes principales: les émissions naturelles et anthropiques des composés les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) et des composés organiques volatils (COV). Cette connaissance a entraîné, à plusieurs niveaux dans le processus décisionnel, la prise de mesures afin de limiter la menace croissante due à l'augmentation d'ozone dans la troposphère. L'Europa a émis plusieurs directives visant la réduction des gaz précurseurs d'ici 2010. Pour pouvoir atteindre ces objectifs, la plupart des Etats membres devront sérieusement tailler dans leurs émissions de COV et de  $\text{NO}_x$ . Ces réductions sont décrites dans le Protocole de Göteborg (1999) qui résulte de la "Convention sur la Pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance" (TADPA) et de la directive UE sur les plafonds d'émissions - "National Emissions Ceilings" (NEC, 2001/81/CE). Par son programme "Clean Air for Europe" (CAFE), l'Europe essaie également de développer une stratégie à long terme visant la limitation des effets de la pollution de l'air sur l'homme et son environnement.

### 1.2.2 Evolution future de la concentration moyenne de l'ozone troposphérique

Les premiers résultats de toutes ces mesures sont déjà visibles: par rapport à l'augmentation observée au cours des années 1980-1990, l'augmentation de la concentration moyenne de l'ozone troposphérique a reculé en Europe et aux Etats-Unis d'Amérique durant les années 1990-2000, ce qui est certainement dû à la réduction des émissions des principaux gaz précurseurs. Quant à savoir si ceci offre une garantie pour une réduction durable de l'ozone troposphérique pour le monde entier, le doute reste permis. En effet, l'augmentation des émissions dans les pays avec des industries et des transports émergents, annulera entièrement la réduction engrangée par les pays industrialisés. C'est pourquoi les chercheurs s'attendent plutôt à une augmentation de l'ozone troposphérique au niveau mondial: si nous n'y faisons pas attention, nous cinglerons en droite ligne vers une augmentation.

L'impact de l'ozone troposphérique sur le climat ne doit pas être sous-estimé. Etant donné que l'ozone absorbe le rayonnement thermique émis par la surface terrestre vers l'espace, l'augmentation de l'ozone a un effet de réchauffement de  $(0,35 \pm 0,15) \text{ W/m}^2$ . Cette contribution positive à l'équilibre radiatif correspond à 25% environ de la contribution apportée par l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) depuis le début de l'ère industrielle.

### 1.2.3 Pics de concentration épisodiques et Composés Organiques Volatils (COV)

Bien que la concentration moyenne de l'ozone troposphérique augmente encore toujours de 0,5 à 1% par an au nord-ouest de l'Europe, on observe une nette tendance à la réduction des pics de concentration épisodiques. Ceci est également confirmé par les modèles mathématiques qui prédisent l'évolution de

## Les modifications au sein de l'atmosphère

ces pics et qui évaluent différentes options politiques. Cette réduction est due en premier lieu à la diminution des émissions de COV, telle que fixée dans le Protocole de Genève (1991) à la suite de la Convention TADPA. La Belgique a ratifié ce protocole en 2000, mais n'a pas encore atteint les objectifs fixés.

### 1.2.4 Précurseurs autres que les COV

Alors que la réduction des émissions de COV entraîne effectivement une réduction de la concentration d'ozone troposphérique, il s'avère également nécessaire de réduire les autres précurseurs. La directive UE sur les National Emission Ceilings (2001/81/CE) exige une réduction drastique des émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Ceci n'aura pas seulement un effet sur la concentration d'ozone, mais permettra également de lutter contre l'acidification et l'eutrophisation de l'environnement. Cette approche intégrée, dont l'objectif est le développement d'une stratégie politique à long terme contre les effets combinés de la pollution de l'air sur la santé humaine et sur l'environnement, est relativement récente. Elle se trouve entre autres au centre du programme CAFE qui a été initié il y a peu.

Dans cette perspective, il est essentiel que les scientifiques fournissent aux décideurs politiques des instruments adéquats leur permettant d'évaluer l'impact des différentes stratégies. Des modèles numériques de l'atmosphère s'y adaptent particulièrement bien. En effet, ceux-ci décrivent les processus atmosphériques responsables de la formation ou de la destruction de l'ozone, comme les émissions de précurseurs, la dispersion et le transport atmosphérique, la transformation chimique et la déposition.

■ Le modèle IMAGES (Intermediate Model for the Annual and Global Evolution of Species), développé et utilisé par

■ les chercheurs de l'IASB, est un des modèles qui essaient de quantifier la modification de la composition globale de la troposphère en tant que conséquence des modifications dans les émissions anthropiques.

■ Le modèle EUROS (European Operational Smog model) est un modèle atmosphérique simulant l'évolution à long terme de l'ozone troposphérique en Europe. Ce modèle a été initialement développé par le RIVM (Pays-Bas). Dans le cadre du projet BELEUROS (European Operational Smog model adapted to Belgium), VITO et CELINE ont couplé une nouvelle version d'EUROS à une interface conviviale. Le modèle a été installé dans les locaux de CELINE comme instrument d'appui à la politique en matière d'ozone troposphérique. Il permet d'évaluer l'impact d'une possible réduction des émissions sur les concentrations d'ozone et permet, entre autre, d'établir la relation non linéaire entre la concentration d'ozone troposphérique et la concentration des gaz précurseurs. C'est ainsi qu'aujourd'hui une réduction des  $\text{NO}_x$  qui ne serait pas directement accompagnée par une réduction des COV, n'entraînerait pas de réduction de la concentration d'ozone, au contraire même. Par contre toute réduction des COV entraîne, elle, une réduction de l'ozone, quoique inférieure à celle obtenue en cas de réduction simultanée des émissions COV et de  $\text{NO}_x$ .

### 1.2.5 COV naturels et aérosols

Tous les gaz précurseurs ne sont pas émis par l'homme, loin de là. A l'échelle mondiale, les émissions de composés organiques volatils naturelles non méthaniques (COVNM) sont plus importantes que celles causées par l'homme. Ces COV naturels ont également un

impact important sur la concentration d'ozone troposphérique et la capacité oxydante (auto-nettoyante) de l'atmosphère. Ils ont en effet une influence multiple sur l'ozone et les radicaux. De plus leur dégradation entraîne la formation de composés condensables, qui représentent une source importante d'aérosols organiques secondaires (AOS).

Des modèles numériques montrent que la formation d'AOS consécutive à la libération de COV naturels a été multipliée par 3 à 4 par rapport à la période préindustrielle. Une quantification adéquate de ce phénomène est néanmoins très difficile, parce que les modèles traitant les émissions de COV naturels sont particulièrement simplistes: les émissions sont calculées en supposant des dépendances simples à la température, à la lumière et au type d'écosystème, ce qui contraste violemment avec la chimie particulièrement complexe de ces COV naturels. Il faut en effet tenir compte de milliers de composés organiques et de réactions, puisque tous influencent l'atmosphère. La plupart de ces composés n'ont même pas encore été étudiés en laboratoire, du pain sur la planche donc pour les chercheurs préoccupés par une compréhension approfondie du problème de l'ozone troposphérique.

■ **L'influence, par exemple, des monoterpènes (une importante classe de COV naturels) sur la composition de l'atmosphère est encore insuffisamment connue. Les monoterpènes sont principalement émis par les arbres. A l'aide des techniques modernes de la spectrométrie de masse, des chercheurs du KULeuven-PAC, et depuis peu de l'IASB, tentent de comprendre la chimie de différents monoterpènes. Une bonne compréhension des processus d'oxydation de ces COV permettra de mieux évaluer les contributions respectives des COV**

■ **anthropiques et des COV naturels dans la chimie de l'ozone et la capacité oxydante de l'atmosphère.**

## 1.3 Brouillard d'aérosols dans la troposphère

### 1.3.1 De nano à micro

L'atmosphère n'est pas composée que de gaz. On y trouve également des aérosols: un brouillard de fines particules liquides ou solides dont le diamètre varie d'environ 1 nanomètre (nm) à 10 micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Ces particules se retrouvent dans l'air, partiellement via des processus naturels. Des mesures montrent que la concentration d'aérosols a sérieusement augmenté au cours du 20<sup>ème</sup> siècle comme conséquence des activités humaines. Une fraction importante de ces nano- et microparticules est éjectée directement dans l'air (par exemple, les particules de poussière du sol, les sels marins, la suie, les cendres volantes, des substances industrielles, des particules biogènes, etc.), mais des aérosols peuvent également être formés dans l'atmosphère même, à partir de molécules gazeuses comme les sulfates, les nitrates, l'ammonium et les substances organiques. Ces derniers sont également appelés aérosols secondaires.

### 1.3.2 A ne pas mettre tous dans le même sac

Les aérosols jouent un rôle important dans de nombreuses réactions chimiques au sein de l'atmosphère. Ils influencent également le climat et ont des effets négatifs sur la santé et le bien-être des hommes et des animaux. Mais il ne faut pas mettre tous les aérosols dans le même sac, en effet leur influence dépend de leur composition chimique ainsi que de la taille et de la forme de leurs particules. De même, les risques sanitaires induits par les aérosols dépendent fortement de ces mêmes paramètres.

## Les modifications au sein de l'atmosphère

■ Depuis plusieurs années déjà, des scientifiques de l'UGent-INW sont particulièrement actifs dans la recherche portant sur les aérosols. Ils ont pour ce faire développé des instruments leur permettant de mesurer la concentration des aérosols dans la troposphère ainsi que des méthodes pour en déterminer les caractéristiques physico-chimiques. Ils collectent et analysent des échantillons d'aérosols provenant de la Belgique, de Finlande, de Norvège, d'Israël et du Zimbabwe.

### 1.3.3 Naturels ou anthropiques

L'origine (naturelle ou anthropique) des aérosols peut souvent être déterminée en mesurant leur taille et en déterminant leur composition chimique, ce qui permet aussi d'établir leur distribution. De telles études sont importantes dans le cadre de mesures de politique appropriées.

■ Sur la base d'analyses chimiques et physiques, des chercheurs de l'UGent-INW ont pu montrer que 30% des particules de sulfate relevées en été dans l'air de Spitzbergen (Norvège) proviennent d'une source naturelle: l'émission de diméthylsulfide (DMS) par le phytoplancton marin. Le reste est anthropique. En hiver et au début du printemps par contre, le sulfate fin provient de l'activité humaine en Asie et en Europe.

■ Au cours de leurs campagnes de mesures dans les zones équatoriales et tropicales, ces chercheurs ont montré que pendant la saison sèche, pratiquement toutes les fines particules proviennent de la combustion de biomasse. Au Transvaal (Afrique du Sud), 40% seulement des particules fines proviennent de cette source, tandis que 33 % sont composées de sulfate émis

■ principalement par les centrales d'énergie et les activités industrielles du "Transvaal Highveld".

■ Depuis quelques années, une analyse organique détaillée des aérosols a été entreprise en collaboration avec UA-Phar, afin de pouvoir identifier les types d'activités humaines engendrant des aérosols.

■ De leur côté, les chimistes et physiciens de l'UA-MiTAC utilisent différentes techniques de microscopie pour l'analyse d'aérosols en provenance de maints endroits autour du monde.

### 1.3.4 Aérosols et climat

L'influence précise d'une particule d'aérosol sur l'équilibre radiatif de la terre dépend de sa taille et de sa composition. La plupart des aérosols troposphériques ont un impact négatif direct en réfléchissant le rayonnement solaire incident. La suie, par contre, apporte une contribution positive puisqu'elle absorbe ces rayons solaires. On estime, néanmoins, que la contribution nette des aérosols à l'équilibre radiatif dans la troposphère est négative, mais ceci ne compense que partiellement l'impact positif résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre.

Enfin, les aérosols ont également un effet négatif indirect sur le climat, parce qu'ils influencent la formation de nuages; cet effet pourrait être important, mais son évaluation est difficile.

### 1.3.5 Aérosols et santé

Les aérosols ont une influence sur la santé, car ils entraînent des problèmes respiratoires et un stress cardiovasculaire. Certains aérosols sont également mutagènes ou carcinogènes. Ici aussi, les conséquences pour la santé dépendent des caractéristiques physico-chimiques des particules. Les particules de diamètre supérieur à 10 micromètres ( $\mu\text{m}$ ) ne pénétreront que rarement les poumons, parce qu'elles sont filtrées par les poils du nez. Les particules entre 5 et 10  $\mu\text{m}$  se

déposent dans les voies aériennes supérieures, celles entre 1 et 5  $\mu\text{m}$  dans les bronches et les particules d'une taille inférieure à 1  $\mu\text{m}$  pénètrent les plus fines alvéoles pulmonaires. De plus, les effets immédiatement irritants (asthmatiques) et les effets nocifs secondaires (fibrose pulmonaire et perte d'élasticité des alvéoles pulmonaires) dépendent de la composition chimique. On conçoit ici la nécessité d'une caractérisation chimique et physique des aérosols.

Plusieurs études épidémiologiques ont permis d'établir un lien entre l'exposition aux microparticules dans l'air et une augmentation de la mortalité et de la morbidité. Il va de soi que la présence d'aérosols dans les bâtiments doit également être surveillée, car l'homme occidental passe 80% de son temps à l'intérieur. La fumée de tabac représente la source la plus importante de particules fines dans les pièces d'habitation et de travail.

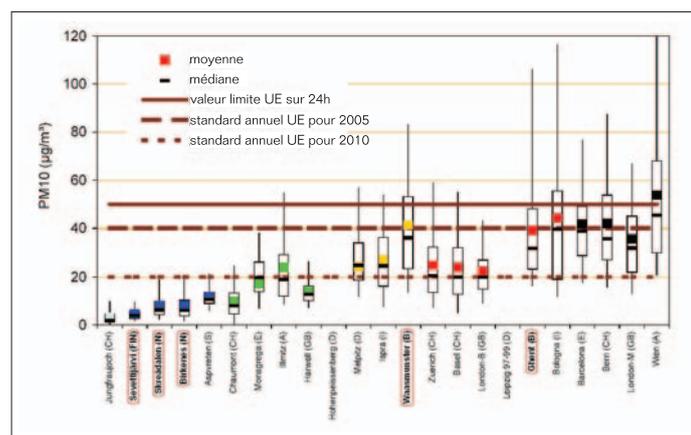
- L'UA-MiTAC est impliqué dans une série d'études épidémiologiques portant sur la quantification des effets sur la santé des microparticules de l'air extérieur et intérieur.
- Les chercheurs ont, entre autres, constaté que l'asthme se manifeste 2,5 fois plus souvent chez les jeunes adultes vivant au centre d'Anvers que chez le même groupe de population habitant des régions plus rurales.

### 1.3.6 Normes européennes et processus décisionnel belge

La législation UE sur les aérosols est exprimée en termes de valeurs indicatives pour PM10 – "particulate matter" (particules très fines) avec un diamètre  $<10 \mu\text{m}$ . A partir de janvier 2005, la valeur limite de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10 sur 24 heures ne peut être dépassée que 35 fois par an et la moyenne annuelle ne peut atteindre que 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10. Pour 2010, la valeur limite et la norme annuelle seront encore diminuées, la norme

annuelle ne pouvant plus dépasser 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

- Des chercheurs de l'UGent-INW ont effectué des mesures d'aérosols dans les communes de Gand et Waasmunster (cf. figure ci-dessous). Ils ont également effectué des mesures à trois endroits ruraux "propres" de Scandinavie. Les résultats ont été intégrés aux résultats d'autres groupes de recherche européens au sein d'un projet coordonné par le Centre Commun de Recherche (CCR) à Ispra (Italie). Les mesures rassemblées ont montré que la quantité d'aérosols d'un diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  était approximativement cinq fois plus élevée dans les villes que dans les zones rurales. Ces concentrations sont particulièrement élevées à proximité des voies urbaines à forte circulation. De nombreux efforts seront encore nécessaires pour pouvoir respecter les valeurs indicatives européennes pour 2005 et surtout pour 2010. En tant que principal malfaiteur, l'étude met particulièrement en exergue la circulation routière.



Concentrations d'aérosols à différents endroits en Europe. Seuls les aérosols avec un diamètre  $<10 \mu\text{m}$  ont été comptabilisés. (Putaud et al, 2002; W. Maenhaut, UGent-INW).

## 2. Les changements climatiques



Pour savoir si les changements climatiques actuels représentent un phénomène inhabituel, il faut les replacer dans le contexte de la variabilité du climat à plus long terme. Au cours des dernières centaines de milliers d'années, les changements globaux les plus importants sont les cycles glaciaires-interglaciaires. Le climat est influencé par de nombreux facteurs dont les plus importants sont la position de la Terre par rapport au soleil, l'activité solaire, les gaz à effet de serre, certains polluants atmosphériques et l'activité volcanique. L'étude des changements climatiques en lien avec ces différents facteurs contribue à mettre en évidence l'effet des activités humaines et permet de faire des projections relatives à l'évolution future du climat. Quelques informations de fond sur le système climat sont présentées dans les Encadrés 6 et 7.

### 2.1 Indices d'un changement de climat

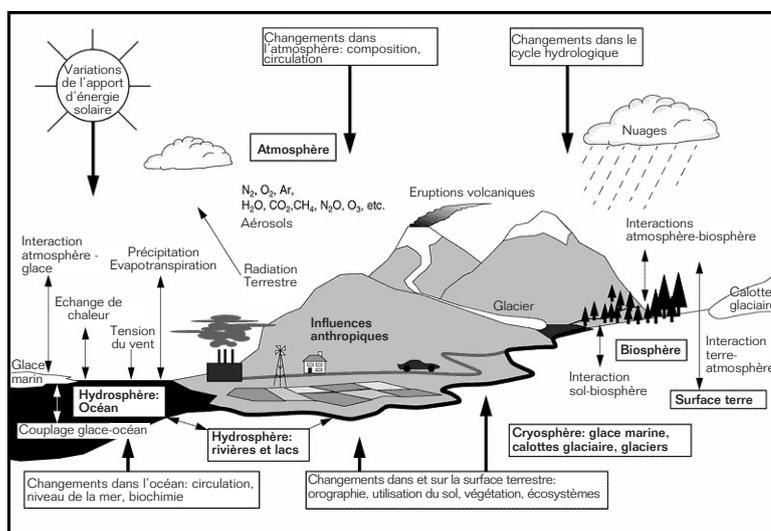
Des changements climatiques sont en cours,

comme le montre quantité d'observations mettant notamment en évidence l'augmentation des températures moyennes et des précipitations sur une grande partie du globe, la fonte des glaciers et de la calotte glaciaire du Groenland, ainsi que la réduction des surfaces océaniques couvertes de glace.

#### Encadré 6: Définition du climat

**En termes simplifiés, le climat est la moyenne du temps sur une longue période. De façon plus détaillée, le climat peut être défini comme une description statistique – en termes de moyenne et de variabilité – d'une série de paramètres pertinents comme la température, les précipitations et le vent, mesurés sur une longue période. La période habituellement considérée est de 30 ans.**

## Encadré 7: Le système climatique



*Aperçu schématisé des composantes du système climatique, de leurs processus et interactions et de certains aspects susceptibles de changer. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).*

à savoir l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la géosphère et la biosphère, ainsi que leurs interactions. L'hydrosphère comprend les océans, mers, cours d'eau, lacs d'eau douce et eaux souterraines. La cryosphère est constituée par l'ensemble de la couverture de neige et de glace, ainsi que le pergélisol (terres gelées en permanence). Enfin, la biosphère comprend l'ensemble des écosystèmes et organismes vivants (y compris la matière

organique morte dérivée). Le climat sur terre est déterminé par des facteurs externes tels que l'énergie solaire reçue par la terre, et des processus internes tels que les circulations atmosphériques, océaniques, et leurs interactions. De façon plus détaillée, ces processus internes sont ceux qui sont à l'œuvre dans le "système climatique". Par système climatique, on entend cinq grandes composantes,

Le système climatique évolue au cours du temps sous l'influence de sa propre dynamique interne et par suite de forçages externes tels que les éruptions volcaniques, les variations de l'activité solaire ou les forçages dus à l'activité humaine (par exemple les variations de la composition de l'atmosphère ou les changements d'affectation des sols).

### 2.1.1 Température

Le réchauffement apparaît de différentes manières, dont on retiendra surtout:

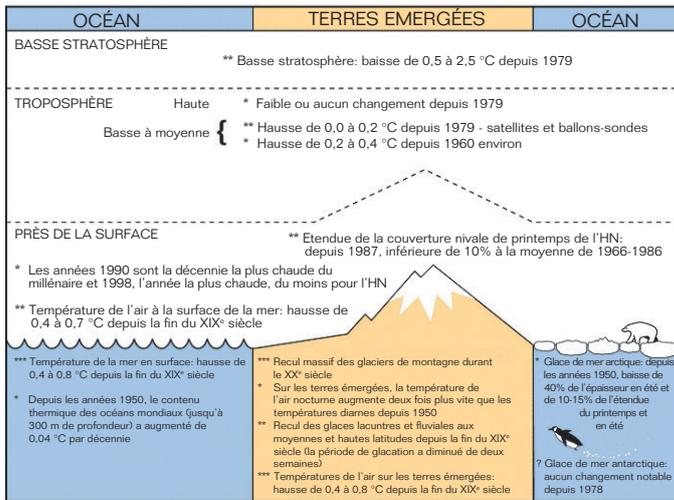
- ✓ Une augmentation de 0,6°C de la température moyenne à la surface de la Terre au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Dans l'hémisphère Nord, la décennie 1990-2000 a probablement été la plus chaude décennie du dernier millénaire (et 1998 l'année la plus chaude).
- ✓ Depuis la fin des années 1960-1970, la superficie de la Terre couverte de glace ou de neige a diminué de 10%. De plus, au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les glaciers des

montagnes dans les régions non polaires ont également fortement reculé. Il existe une forte corrélation entre l'augmentation des températures à la surface de la terre et la diminution de la couverture de neige et de glace.

La figure qui suit donne un aperçu des principaux "indicateurs de température". Il semble acquis que la rapidité et la durée du réchauffement que nous observons depuis le 20<sup>ème</sup> siècle soient plus importantes que toutes les variations de température des 1.000 dernières années.

# Les changements climatiques

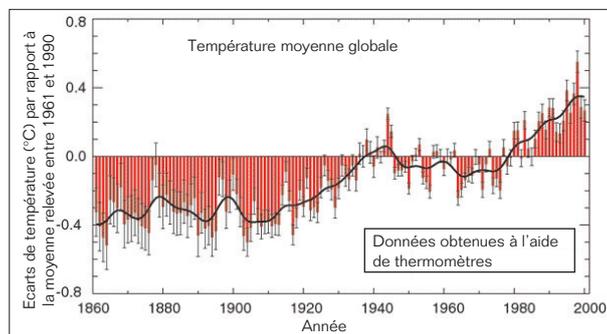
## a) Indicateurs de Température



Probabilités: {  
 \*\*\* Pratiquement certain (probabilité >99%)  
 \*\* Très probable (probabilité ≥ 90%, mais ≤ 99%)  
 \* Probable (probabilité ≥ 66%, mais < 90%)  
 ? Probabilité moyenne (probabilité > 33%, mais ≤ 66%)

Schéma des variations observées pour différents indicateurs de température. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).

Les augmentations de température les plus importantes depuis le 19<sup>ème</sup> siècle se sont produites durant deux périodes: entre 1910 et 1945 et depuis 1976. Comme le montre la figure suivante, la température a augmenté de 0,15°C par décennie depuis 1976. Les températures moyennes maximales enregistrées jusqu'à présent ont été relevées en 1997-1998 (période qui correspond à un événement El Niño).



Déviations des températures de surface annuelles entre 1861 et 2000 par rapport à la moyenne entre 1961 et 1990. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).

Au cours des dernières décennies, l'élévation de température a affecté la Terre

pratiquement dans son ensemble, mais de façon plus marquée aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

■ L'augmentation de la température moyenne a également été constatée à l'IRM à Uccle (Bruxelles, Belgique): au cours des 170 dernières années, on y a relevé une augmentation de 1 à 2°C. A Uccle, le réchauffement ne s'est pas fait progressivement, mais plutôt par étapes (principalement vers 1910 et 1985).

■ Les chercheurs de l'UGent-PAE, du MRAC-GEO, de l'UCL-ASTR et des FUNDP-URBO ont également pu mesurer un réchauffement dans les régions tropicales. Selon leurs mesures, au cours de la dernière décennie, la température de l'air a augmenté de 0,7 à 0,9°C à Bujumbura et Mbala – respectivement les points les plus au Nord et au Sud du lac Tanganyika en Afrique orientale. Parallèlement à ce réchauffement, ils ont également pu mettre en évidence l'impact sur le lac du El Niño / oscillation australe (ENSO). Le phénomène El Niño entraîne dans cette région une augmentation de la température, de l'ensoleillement et de la pression atmosphérique ainsi qu'une réduction de la vitesse du vent. D'après les premières recherches effectuées, cette situation particulière durant les périodes El Niño entraîne une réduction du mélange des eaux profondes du lac, riche en nutriments, avec les couches plus proches de la surface. Il en résulte très probablement une réduction de la productivité biologique du lac Tanganyika, d'où une pêche moins abondante et des conséquences sur la situation socio-économique de la population locale (cf. Encadré 8)

### Encadré 8: El Niño, un cadeau de Noël empoisonné

El Niño, au sens originel du terme, est un courant marin chaud qui se manifeste périodiquement le long de la côte équatorienne et péruvienne. El Niño signifie "Enfant Jésus" et ce nom a été donné par les pêcheurs péruviens, qui, tous les 3 à 7 ans, voyaient disparaître tous les poissons devant la côte du Pérou.

L'arrivée d'eaux chaudes empêche en effet une remontée d'eaux froides riches en éléments nutritifs qui se produit en conditions "normales" dans la région.

Jusque dans les années 1960-1970, ce phénomène a été considéré comme une apparition purement régionale.

Ce phénomène océanique est lié à une fluctuation de la configuration de la pression en surface et de la circulation dans la partie intertropicale des océans Indien et Pacifique, appelée oscillation australe. La combinaison de ces phénomènes atmosphérique et océanique est appelée El Niño / oscillation australe, ou ENSO. Pendant un épisode El Niño, les vents alizés, qui soufflent toujours d'est en ouest, faiblissent et le contre-courant équatorial se renforce. Cette diminution du vent soufflant vers l'ouest permet aux eaux chaudes de surface de la zone indonésienne de se déplacer vers l'est, où elles viennent recouvrir les eaux froides du courant péruvien. Ce phénomène exerce une influence considérable sur le vent, la température de la surface de la mer et les précipitations dans la partie tropicale du Pacifique. Il a des effets climatiques sur l'ensemble du bassin du Pacifique et dans de nombreuses autres

régions du monde, ce qui n'a été découvert que dans les années 1960-1970. El Niño cause des sécheresses en Afrique du Sud-est et dans le Nord du Brésil, alors que la côte Ouest du continent américain se noie sous les pluies torrentielles et les inondations. Le plus souvent, une année El Niño est suivie par une année La Niña, où l'océan est plus froid que la normale avec, donc, les conséquences inverses.

Le climat en Afrique de l'Est semble être également influencé par ENSO. A l'aide d'images satellitaires, des chercheurs analysent si l'on y retrouve des anomalies en ce qui concerne les pluies et la croissance végétale chaque fois que l'on est confronté à un phénomène ENSO. Selon les premiers résultats, il semble qu'une zone située au Nord-est du Lac Tanganyika et de la région Kivu au Congo est fortement influencée par ENSO.

El Niño n'est pas un phénomène passager, mais bien un phénomène qui revient très régulièrement depuis des siècles. Ce schéma régulier semble toutefois être perturbé depuis les années 1970-1980, ce qui fait que l'on soupçonne l'influence des gaz à effet de serre.

L'évènement El Niño de 1991-1992 a causé les pires sécheresses du siècle dernier en Afrique du Sud, qui ont touché près de 100 millions de personnes. Au cours de l'évènement El Niño de 1997-1998, on a pu constater de sévères inondations au Kenya, au Soudan, en Ouganda et dans les pays avoisinants.

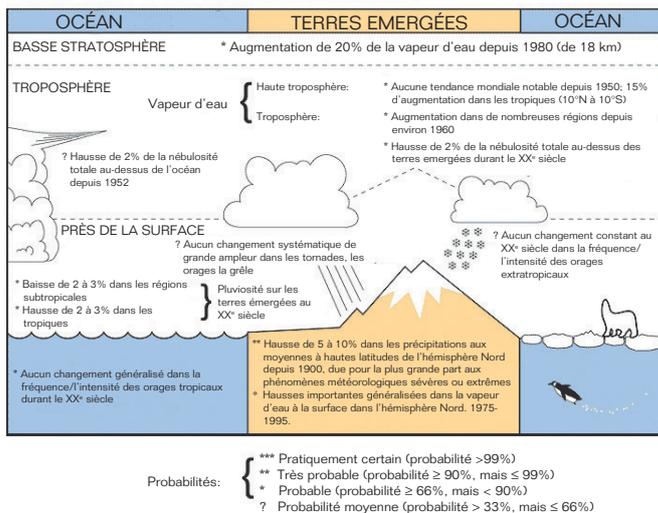
#### 2.1.2. Précipitations et humidité atmosphérique

Dans l'hémisphère Nord, sur une grande partie des continents aux latitudes moyennes et plus proches du pôle, le volume des précipitations a

très probablement augmenté de 5 à 10% au cours des 100 dernières années. Cette observation est à mettre en relation avec le fait que l'humidité a probablement augmenté de façon très significative, ce qui rend disponible pour les précipitations une

# Les changements climatiques

plus grande quantité d'eau. La fréquence des événements de fortes précipitations a augmenté au cours de la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. La couverture nuageuse a vraisemblablement augmenté également. L'augmentation des précipitations n'est toutefois pas systématique: elle touche particulièrement l'Europe du Nord, mais pas l'Asie Orientale. Dans le bassin méditerranéen, les précipitations sont même plus faibles qu'auparavant. En ce qui concerne la Belgique (située entre l'Europe du Sud et l'Europe du Nord), la situation semble être plus ou moins inchangée pour l'instant (au moins en moyenne annuelle). La figure suivante montre les tendances des indicateurs hydrologiques et des indicateurs de tempêtes.



*Schéma des variations observées pour les indicateurs hydrologiques et les indicateurs liés aux orages. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).*

Dans la zone subtropicale (entre 10°N et 30°N), le volume des précipitations a diminué mais ces dernières années la tendance est au retour à la situation antérieure. A proximité de l'équateur (entre 10°N et 10°S), il semble y avoir une légère tendance à la hausse.

## 2.1.3 Niveau de la mer, calottes glaciaires et glaciers

Au cours des 3.000 dernières années, le niveau

de la mer a augmenté de 1 à 2 cm par siècle en moyenne. Cette élévation s'est nettement accélérée ces derniers temps: en effet, les enregistrements des marées indiquent une élévation de 10 à 20 cm pour le siècle dernier.

Deux facteurs principaux expliquent cette élévation: premièrement, l'eau de mer occupe un volume plus important lorsque sa température est plus élevée, et deuxièmement la quantité totale d'eau dans les océans a augmenté en raison de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Si les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique devaient fondre dans leur totalité, le niveau de la mer s'élèverait respectivement de 7 et de 60 mètres. Un scénario qui ne se produira vraisemblablement pas dans un futur proche, mais qui montre bien à quel point le niveau de la mer est sensible, même à une fonte limitée de ces énormes quantités de glace terrestre.

Le recul des glaciers alpins et continentaux est par ailleurs un fait indéniable. La communauté scientifique s'accorde sur le fait que le volume global des glaciers a diminué depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle. L'estimation de la contribution de la fonte des glaciers à l'élévation du niveau de la mer nécessiterait des données précises quant à la diminution du volume global des glaciers; malheureusement, nous ne disposons de mesures volumétriques que pour une partie des 100.000 glaciers de la Terre.

■ **ULg-URAP et UGent-PAE (projet LAQUAN)** ont récemment étudié l'historique des modifications relatives du niveau de la mer dans la région des Larsemann Hills (Antarctique), afin d'en savoir plus sur les modifications régionales de l'épaisseur de la calotte glaciaire continentale ainsi que sur le rythme du recul de la glace. Ces connaissances sont importantes pour la validation de modèles sur la dynamique des calottes glaciaires.

## 2.1.4. Glace marine

Les glaces marines se trouvent principalement dans les zones polaires. L'épaisseur de glace marine (banquise) s'élève à trois mètres en moyenne dans l'océan arctique et à un mètre dans les mers autour de l'Antarctique. La modification de l'épaisseur des glaces marines peut être un indicateur important d'un réchauffement.

- Les chercheurs de l'ULB-GLACIOL ont constaté une diminution importante de la quantité de glace marine, principalement dans les océans autour du pôle Nord.
- Cette diminution touche l'épaisseur et la superficie. Les chercheurs estiment que la calotte glaciaire a perdu 1,3 mètres d'épaisseur au cours des 30 ou 40 dernières années et que chaque année, la surface d'eau recouverte par la glace arctique diminue de 25.000 km<sup>2</sup>, une diminution annuelle qui correspond à la surface totale de la Belgique.

La question de savoir si ces changements sont seulement des fluctuations naturelles ou s'il existe une tendance liée aux activités humaines n'est toutefois pas définitivement tranchée.

## 2.2 Et avant?

### 2.2.1 Comment savoir sans mesurer?

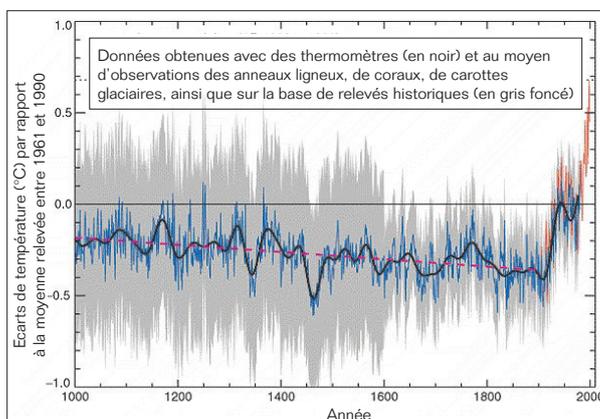
Pour déterminer si le réchauffement du 20<sup>ème</sup> siècle est exceptionnel, il est essentiel de le replacer dans le contexte d'une variabilité à long terme, c'est-à-dire d'étudier les paléoclimats. Aujourd'hui, nous disposons d'une panoplie d'instruments pour mesurer la température, les précipitations, la composition de l'atmosphère, etc... mais cela n'a évidemment pas toujours été le cas. La collecte systématique de données climatiques ne se fait que depuis 100 à 150 ans. L'estimation de la variabilité climatique des siècles passés ne peut donc se baser que sur

des "archives naturelles" telles que les carottes de glace et sédiments marins ou lacustres. Ces variables "archivées" permettent de reconstruire des valeurs de températures, précipitation, etc., grâce aux calibrations par rapport aux observations instrumentales (cf. Encadré 9).

- Parmi d'autres, des chercheurs de l'ULB-GLACIOL participent à la reconstitution du climat sur la base de carottes glaciaires.
- Des chercheurs de l'équipe CALMARS (IRSNB, MRAC, ULB-BIOMAR, VUB-ANCH, UA-EFB) étudient la sédimentation de squelettes marins calcaires (éponges calcaires, bivalves et échinodermes) dans l'Atlantique Nord et les Caraïbes. Ces squelettes donnent des indications sur l'évolution du climat. Des chercheurs de l'équipe LAQUAN (UGent-PAE, ULg-URAP) étudient également l'histoire du climat sur la base de sédiments de microfossiles.

### 2.2.2 Les 1.000 dernières années

Lorsque l'on effectue une reconstitution des températures de l'hémisphère Nord au cours du dernier millénaire, l'ampleur du changement climatique actuel apparaît nettement (cf. figure ci-dessous).



Reconstitution des températures de l'hémisphère Nord de 1000 à 1999. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).

# Les changements climatiques

## Encadré 9: L'histoire du climat

Il existe toute une série de sources permettant aux scientifiques de reconstituer l'historique du climat:

- ✓ **Données météorologiques** – Depuis environ 150 ans, des données concernant la température, les précipitations, la pression atmosphérique et le vent sont systématiquement conservés pour divers endroits du globe. L'IRM dispose de données depuis 1870.
- ✓ **Données historiques** – Depuis que l'homme a noté sa propre histoire, il consigne également l'histoire du temps. Des documents historiques – livres de bord des navires, journaux intimes, registres paroissiaux, comptes-rendus annuels et comptabilité des abbayes et propriétés terriennes...- mais aussi peintures et fresques nous donnent toutes sortes d'informations sur le climat du dernier millénaire.
- ✓ **Données indirectes (reconstructions)** - La nature, elle aussi, tient également une sorte de livre de bord de l'histoire du temps. La reconstruction des paléoclimats - les variations climatologiques au cours des âges - se fait à partir d'archives biologiques et géologiques. La neige s'est ainsi amoncelée sur les calottes glaciaires depuis des milliers d'années.

Les scientifiques forent dans cette couche de glace à des centaines de mètres de profondeur et, en analysant les carottes glaciaires ainsi obtenues, peuvent en déduire les climats ayant régné ainsi que la composition de l'atmosphère. L'étude des sédiments rocheux est également fort instructive. A l'aide des minéraux dans les sédiments, ils peuvent déduire les schémas d'érosion, des précipitations et des températures. Sur la base des sédiments biologiques - pollen, diatomées et fossiles -, on peut obtenir des informations sur la végétation qui croissait à une certaine époque en un endroit donné. Ces informations permettent de tirer des conclusions en ce qui concerne la présence ou l'absence de la mer et divers facteurs climatiques - température, degré d'humidité, vent. Lire et interpréter correctement le langage des archives biologiques et géologiques est toutefois complexe: il faut trouver un lien entre les éléments analysés, telles que des compositions isotopiques, et des variables climatiques, telles que les températures, ainsi que dater chaque partie de l'enregistrement. Les méthodes utilisées dans ce but sont calibrées sur la base d'autres sources indirectes et des données historiques.

Les estimations de température moyenne en surface pour l'hémisphère Nord montrent qu'il faisait relativement chaud au début du deuxième millénaire. Un refroidissement progressif a ensuite commencé à la fin du 13<sup>ème</sup> siècle. Cette période froide, également appelée "petit âge glaciaire", s'est terminée au 19<sup>ème</sup> siècle et a été suivie par une augmentation de température comparativement très prononcée au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. A l'échelle planétaire, cette dernière élévation de température est

probablement la plus rapide et la plus importante du millénaire.

### 2.2.3. Niveaux de la mer

Sur une échelle temporelle de 10.000 à 100.000 années, les causes principales de fluctuation du niveau de la mer sont la croissance et la fonte des calottes glaciaires au cours des cycles période glaciaire / période plus chaude interglaciaire.

- Parmi d'autres, des chercheurs de la VUB-DG ont pu démontrer que des fluctuations du niveau de plusieurs dizaines de mètres ne sont pas une exception et que ces augmentations peuvent parfois aller très vite – parfois de 10 mm à 40 mm par an.

#### 2.2.4. Modifications brutales du climat

La reconstitution de l'histoire du climat suggère que certaines modifications climatiques peuvent probablement survenir très brutalement, en tout cas au niveau régional.

- Au cours de la dernière période interglaciaire, l'Eémien (130.000 – 100.000 ans avant le présent) un refroidissement important semble s'être produit au Groenland (10°C sur une période d'environ 70 ans). Ces observations sont basées sur l'analyse d'une carotte glaciaire longue de 3.000 mètres provenant d'un forage dans le centre du Groenland (Greenland Ice Core Project, GRIP), une recherche à laquelle l'équipe ULB-GLACIOL a contribué. Il n'est pas encore certain que ce refroidissement majeur a bien eu lieu, car il est possible que l'analyse des résultats ait été faussée par la présence de déformations complexes des couches profondes de la calotte glaciaire, non liées aux changements climatiques. Cette incertitude démontre l'importance des études de terrain pour décrire de manière pertinente les processus physiques qui servent à l'établissement de modèles.

### 2.3. Causes des changements climatiques passés

#### 2.3.1 Les facteurs qui modifient l'équilibre du système climatique

Quels sont les facteurs qui déterminent notre climat? A la base, il y a le soleil. Le rayonnement

qu'il envoie vers la terre est absorbé par la surface terrestre et transformé en chaleur. Cette énergie est ensuite redistribuée via les courants atmosphériques et marins et réémise vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge (cf. Encadré 7).

#### Facteurs externes

Si l'on considère l'ensemble du globe sur une année, l'énergie du rayonnement entrant est approximativement contrebalancée par celle du rayonnement sortant. Chaque facteur qui modifie le rayonnement entrant ou sortant influence le climat. De même, les facteurs modifiant la distribution de l'énergie au sein de l'atmosphère ou entre l'atmosphère, la terre et les océans, influencent le climat. Tout facteur agissant sur cet équilibre entraîne une modification de ce que l'on appelle le bilan radiatif (c'est-à-dire la différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) du système terre-atmosphère. Les facteurs entraînant une modification positive du bilan radiatif réchauffent la terre; les facteurs dont l'effet est négatif la refroidissent.

Une série de facteurs naturels externes ont influencé l'histoire du climat terrestre dans le passé. Parmi ceux-ci on peut citer:

- ✓ Le rayonnement du soleil. Le rayonnement émis par le soleil varie très faiblement (0,1%) selon un cycle solaire de 11 années. Des variations de l'apport énergétique du soleil sur de plus longues périodes peuvent également se produire.
- ✓ De faibles variations de la trajectoire orbitale de la terre et de l'inclinaison de son axe de rotation donnent lieu à des modifications de la distribution de la radiation solaire (théorie astronomique des paléoclimats, dont la validité a d'abord été montrée par Milankovitch, et dont la validité a été confirmée par les travaux de l'UCL-ASTR). Ces variations ont joué un rôle important dans les variations climatiques

# Les changements climatiques

- passées (cycles glaciaires).
- ✓ Les gaz à effet de serre. Certains gaz atmosphériques renforcent l'absorption du rayonnement sortant. Etant donné la diminution de la quantité de chaleur terrestre rejetée vers l'espace, la surface terrestre et la basse atmosphère se réchauffent. L'effet positif de ces gaz est également appelé effet de serre. En effet, ces gaz fonctionnent selon le principe d'une serre: ils laissent entrer les rayons du soleil, mais retiennent la chaleur. Depuis des milliards d'années, les gaz à effet de serre jouent un rôle important dans le climat de la terre. Sans eux, la température moyenne sur terre serait de  $-20^{\circ}\text{C}$ .
  - ✓ Les gaz à effet de serre d'origine naturelle les plus importants sont la vapeur, le dioxyde de carbone, l'ozone, le méthane et l'oxyde d'azote.
  - ✓ Les aérosols (cf. Chapitre 1). Les éruptions volcaniques peuvent rejeter d'importantes quantités de gaz contenant du soufre (principalement du dioxyde de soufre) qui sont transformés en aérosols sulfatés. Ces aérosols ont la propriété de réfléchir fortement le rayonnement solaire entrant, ce qui entraîne un effet négatif sur le bilan radiatif.

## Facteurs internes

Les changements de climat d'origine naturelle ne doivent pas nécessairement être entraînés par une modification au niveau des facteurs externes avec un impact sur le bilan radiatif – par exemple des modifications dans la quantité de gaz à effet de serre ou des éruptions volcaniques. Un changement de climat peut également se produire sans indice d'une raison définie, par exemple à la suite d'interactions complexes entre

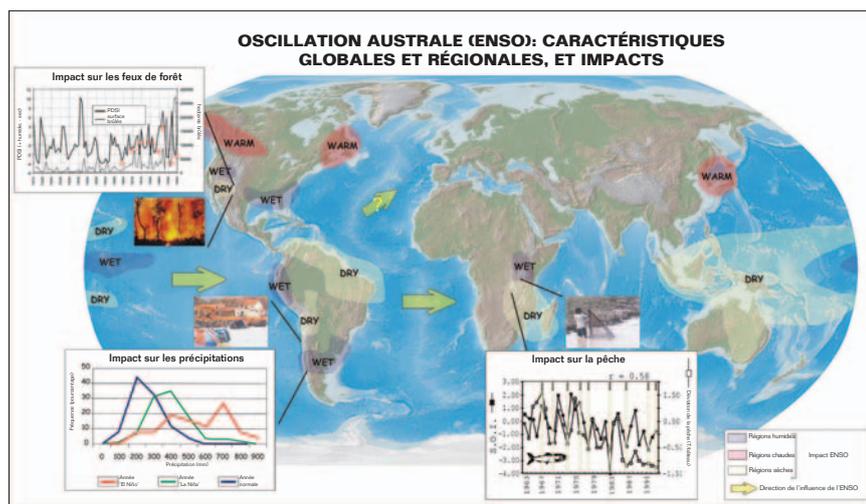
les composantes de notre système climatique terrestre. L'effet El Niño et El Niño / oscillation australe (cf. Encadré 8) en sont des exemples. Ceux-ci sont dus à un enchaînement de réactions entre l'atmosphère et l'hydrosphère étalées sur plusieurs années.

Une oscillation semblable et récurrente de ce type existerait également dans l'hémisphère Nord: "l'oscillation nord-atlantique" (NAO). Cette oscillation est attribuée au courant thermohalin Nord-Atlantique. La NAO est due à la différence de pression atmosphérique mesurée à la hauteur de l'Islande et des Açores.

- Des chercheurs belges de l'ULg-URAP,
- de l'UGent-RCMG, du MRAC-GEO et de
- l'UCL-ASTR étudient les interactions entre
- 'El Niño / oscillation australe' (ENSO) et
- 'Oscillation nord-atlantique' (NAO).
- Quelques résultats sont présentés dans la
- figure ci-dessous.

## 2.3.2 Réactions différées

La rapidité de réaction des différents composants du système climatique à un



Caractéristiques régionales et globales du "El Niño / oscillation australe" (ENSO) et certaines conséquences: feux de forêt en Californie, précipitations au Chili et pêche dans le Lac Tanganyika, Afrique. (ULg-URAP, UGent-RCMG, UGent-PAE, MRAC, UCL-ASTR, UCL-GEOG and FUNDP-URBO).

changement du bilan radiatif est variable. Certains composants comme l'atmosphère réagissent très rapidement, d'autres ont besoin de temps pour rétablir l'équilibre. Parfois cela prend des siècles, voire des millénaires.

Les océans ont une grande capacité de stockage de la chaleur. C'est pourquoi ils ne s'adaptent que lentement aux différentes phases de réchauffement ou de refroidissement de la surface ou de l'atmosphère. En d'autres mots, les océans ont un effet retardateur sur le réchauffement global.

Ces effets retardateurs concernent également la hausse ou la baisse du niveau de la mer: la croissance ou la fonte des calottes glaciaires peut prendre des centaines ou des milliers d'années. Le réchauffement des couches océaniques profondes est également très lent, donc l'effet de la dilatation thermique apparaît progressivement. C'est pourquoi le niveau de la mer peut changer pendant une très longue période en réponse à un changement de facteurs influençant le bilan radiatif.

- Des chercheurs de la VUB-DG étudient les caractéristiques des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Ils ont développé des modèles tridimensionnels afin de cartographier les caractéristiques (thermomécaniques, masse/équilibre et croûte terrestre) de ces calottes glaciaires et de prédire leur réaction à une aggravation du réchauffement.
- Récemment, ces modèles ont été intégrés aux "Modèles de circulation générale" (General Circulation Models, GCMs) et "Modèles de système terrestre" afin de pouvoir étudier les interactions et les mécanismes de rétroaction entre la cryosphère continentale, l'atmosphère et les océans.
- La recherche VUB décrite a également soutenu la recherche des localisations

- pour les forages de carottes glaciaires, leur interprétation et l'interprétation des données satellitaires sur ces régions.
- Ces modèles de calottes glaciaires ont été intégrés en Belgique dans des modèles de l'ensemble du système terrestre (océan, atmosphère, glace, végétation) dans le cadre des réseaux de recherche MILMO et CLIMOD (UCL-ASTR, VUB-DG, ULg-LPAP, IRM).

## 2.4. Gaz à effet de serre et aérosols: les principaux coupables?

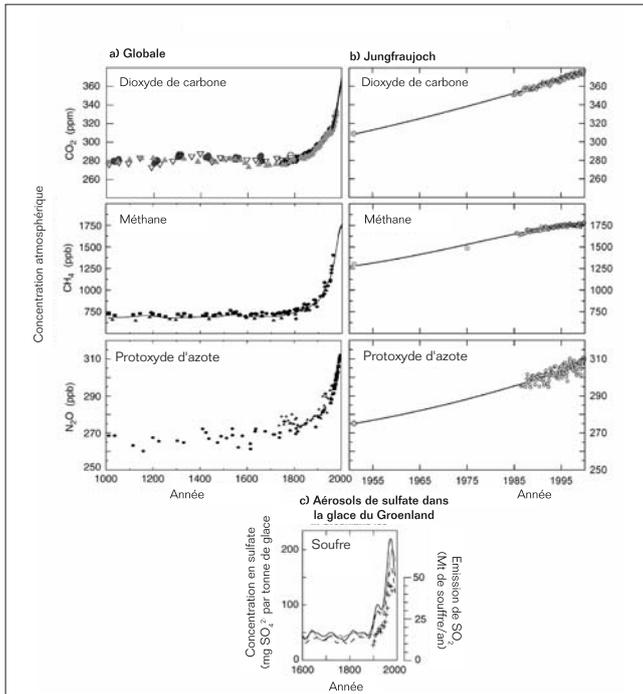
### 2.4.1 Les mesures

Depuis la période préindustrielle, les activités humaines ont été responsables d'une forte augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et en aérosols. Au cours du siècle dernier, les concentrations en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>) et le gaz hilarant (N<sub>2</sub>O) ont atteint des niveaux jamais enregistrés, en conséquence principalement de la combustion de combustibles fossiles, de l'agriculture et des modifications dans l'utilisation des sols (cf. figure suivante).

- Les mesures faites par des chercheurs belges (ULg-GIRPAS) dans la station du Jungfraujoch en Suisse (cf. photo p. 22) montrent que les concentrations en gaz à effet de serre ont continué à augmenter au cours des cinq dernières décennies. Une diminution du taux d'accumulation n'est constatée que pour le méthane, un phénomène non expliqué jusqu'à présent.

Les différents gaz ne contribuent pas tous dans la même mesure à l'effet de serre. L'effet global d'un kilogramme de gaz à effet de serre dépend de son temps de résidence

# Les changements climatiques

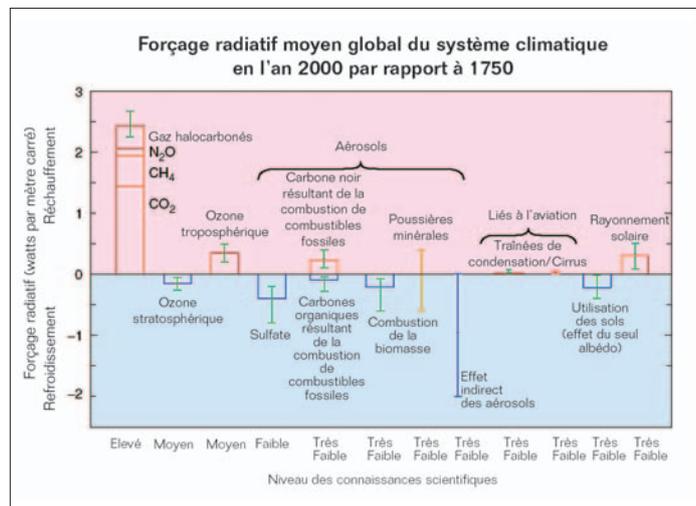


Les données relatives aux modifications des concentrations des gaz dans l'atmosphère sur une longue période mettent en évidence l'influence des émissions anthropiques. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse; E. Mahieu, ULg-GIRPAS).

dans l'atmosphère et de l'impact de ce gaz sur le bilan radiatif. L'effet comparatif des différents gaz est résumé par un indice appelé "potentiel de réchauffement global" (Global Warming Potential, GWP). Par exemple, le potentiel de réchauffement du  $N_2O$  est approximativement 310 fois plus important que celui du  $CO_2$ , mais les concentrations en  $CO_2$  dans l'atmosphère sont plus de 1.000 fois supérieures. Le dioxyde de carbone est le gaz qui contribue le plus à l'accroissement de l'effet de serre. Etant donné que les gaz à effet de serre présentent une grande longévité et se mélangent dans les différentes couches d'air, leur influence est mondiale.

L'inverse vaut pour les aérosols dans les couches d'air inférieures – la troposphère: leur influence sur le climat est souvent plus locale. L'influence d'un aérosol sur le bilan radiatif dépend de sa taille et de sa composition. L'effet net de ces aérosols troposphériques sur le bilan

radiatif est négatif, du fait qu'ils réfléchissent et absorbent les rayons du soleil entrants. Les aérosols ont également un effet négatif indirect parce qu'ils influencent la formation des nuages, mais cet impact est encore très difficile à évaluer. Ils ont également un effet positif parce qu'ils absorbent la chaleur renvoyée par la terre dans l'espace. On peut néanmoins affirmer que l'effet net des aérosols sur le bilan radiatif est un effet négatif. Mais cet effet négatif ne compense que partiellement l'effet positif dû à l'augmentation des gaz à effet de serre (cf. figure ci-dessous).



Evaluations actuelles de la contribution au bilan radiatif du fait de l'augmentation de la concentration des composants atmosphériques et autres mécanismes. Certains types d'aérosols (sulfate, aérosols provenant de la combustion de biomasse) entraînent un refroidissement, alors que d'autres aérosols (suie) entraînent un réchauffement. La contribution indirecte des aérosols est très incertaine. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).

## 2.4.2 Les modèles

Comment savoir si les activités humaines sont la cause principale du changement climatique actuel et qu'il ne s'agit pas à la base de l'action combinée de changements naturels?

Pour répondre à cette question, les scientifiques construisent des modèles qui tiennent compte du plus grand nombre

de facteurs possibles pouvant influencer le climat. A l'aide des données-sources (rayonnement solaire, position terre-soleil, éruptions volcaniques, activités humaines...), ces modèles tentent de reproduire les climats passé, actuel et futur. Les modèles peuvent être validés sur base des reproductions des climats actuels et passés, permettant ainsi de diminuer l'incertitude quant à leur valeur prédictive.

■ Au sein des réseaux de recherche belges tels que CLIMOD et MILMO, des chercheurs de l'équipe UCL-ASTR ont développé différents modèles pour le système climatique. En utilisant ces modèles, ils ont contribué à une meilleure compréhension d'une série de mécanismes importants régissant le climat et ont pu réduire les incertitudes concernant son évolution. Les thèmes étudiés sont:

- ✓ La reproduction des puissants vents catabatiques le long des pentes de glace polaire de l'Antarctique à l'aide de modèles atmosphériques.
- ✓ L'identification des processus régissant la variabilité de la surface et du volume occupés par les glaces marines dans les deux hémisphères. Ces modèles permettent une meilleure compréhension de la variabilité naturelle du système et de la réponse de la glace marine au réchauffement au cours des 50 dernières années.
- ✓ La simulation de la réponse du système climatique aux facteurs anthropiques et naturels ayant influencé le bilan radiatif au cours du deuxième millénaire.
- ✓ L'analyse des modifications potentielles de la circulation thermohaline dans les océans.

Les modèles utilisés aujourd'hui par les scientifiques permettent de voir comment, jusqu'à la révolution industrielle, des variations principalement naturelles expliquent les changements climatiques. En ce qui concerne le réchauffement des 50 dernières années, il y a de fortes présomptions qu'il soit principalement dû aux activités humaines, notamment parce que les modèles ne peuvent reproduire les changements observés que lorsque les émissions anthropiques sont prises en compte.

Un des aspects les plus difficiles à analyser concerne l'élévation du niveau de la mer. Il est très difficile de quantifier les différentes contributions aux 10 à 20 cm d'élévation observée pour le 20<sup>ème</sup> siècle (cf. Section 2.1.3).

■ L'une des plus importantes contributions des chercheurs de la VUB à la recherche belge sur l'Antarctique et le *global change* est le développement de modèles thermomécaniques en trois dimensions sur l'évolution des calottes glaciaires. Ces modèles ont été appliqués avec succès à la calotte glaciaire antarctique, à la calotte glaciaire groenlandaise et à la calotte glaciaire quaternaire de l'hémisphère Nord au cours des périodes glaciaires. Les chercheurs sont parvenus à déterminer la forme, les dimensions et les caractéristiques physiques de ces calottes glaciaires depuis leur apparition au cours des ères glaciaires du tertiaire et du quaternaire. Ils ont également pu évaluer leur comportement en cas de poursuite du réchauffement de la Terre. Ces modèles ont été intégrés dans des "Modèles de circulation générale" et "Système terrestre", afin d'analyser l'interaction et les mécanismes de rétroaction entre la cryosphère continentale, l'atmosphère et les océans.

## 2.5. Le 21<sup>ème</sup> siècle

### 2.5.1 Au plan mondial

#### Point de départ

Dans leurs modèles prédictifs, les scientifiques partent de l'idée que l'homme continuera à influencer la composition de l'atmosphère au cours du 21<sup>ème</sup> siècle (Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions, GIEC-SRES, 2000). Les influences seront particulièrement ressenties au niveau de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols. Les points de départ sont les suivants:

- ✓ Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de combustibles fossiles resteront quasiment à coup sûr la cause principale de changements de concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au 21<sup>ème</sup> siècle.
- ✓ Les modèles prédisent une concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> atteignant 490 à 1.260 ppm (parts de CO<sub>2</sub> par million de parts d'air) en 2100 (cette concentration était de 280 ppm en 1750 et atteint 380 ppm en 2004).
- ✓ Des changements d'utilisation du sol (notamment le déboisement) influencent la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Hypothétiquement, si on parvenait à restituer à la Terre tout le carbone perdu auparavant par des changements d'occupation du sol, la concentration en CO<sub>2</sub> pourrait être réduite de 40 à 70 ppm.

#### Les changements attendus

Les projections pour le futur sont:

- ✓ Température
  - Une augmentation de la température de surface globale moyenne de 1,4 à 5,8°C en 2100 par rapport à 1990, c'est-à-dire une vitesse du réchauffement

encore beaucoup plus élevée qu'au 20<sup>ème</sup> siècle et sans précédent depuis au moins 10.000 ans.

- Une accentuation probable du phénomène El Niño dans les régions tropicales de l'Océan Pacifique.
- ✓ Précipitations
  - Une humidité de l'air globale moyenne plus élevée et une augmentation des précipitations. Au cours de la deuxième moitié du 21<sup>ème</sup> siècle, les précipitations seront probablement plus abondantes aux latitudes moyennes et hautes et au-dessus de l'Antarctique en hiver. Aux basses latitudes, les précipitations seront plus ou moins importantes selon les régions.
- ✓ Evénements météorologiques extrêmes et risques pour la santé
  - La fréquence, l'intensité et la durée des événements météorologiques extrêmes augmentera – vagues de chaleur, nombre de jours chauds, périodes avec fortes précipitations, moins de journées froides dans les zones tempérées, des cyclones tropicaux probablement plus intenses. Par conséquent, le risque d'inondations comme de sécheresses augmenterait, avec des impacts sur les systèmes écologiques, sur divers secteurs socio-économiques et sur la santé humaine.
  - Une augmentation des menaces pour la santé humaine, surtout dans les pays tropicaux et subtropicaux. Les effets sur la santé peuvent être directs (effets de vagues de chaleur, pertes de vies lors d'inondation ou de tempêtes) ou indirects (modification de la gamme et de la répartition géographique de vecteurs de maladies comme les moustiques, qualité de l'eau, de l'air ou de la nourriture...). L'impact sur

la santé dépendra très fortement des conditions environnementales et socio-économiques locales et des adaptations sociales, institutionnelles, technologiques et comportementales.

- ✓ Circulation thermohaline
  - Un affaiblissement probable de la circulation thermohaline dans l'hémisphère Nord, avec pour conséquence une diminution de la chaleur transportée par ces courants océaniques vers l'Europe. Cet affaiblissement n'empêcherait toutefois pas le réchauffement de l'Europe dû à l'augmentation des gaz à effet de serre. Des modifications du bilan radiatif suffisamment importantes et longues pourraient même aboutir à un arrêt complet et peut-être irréversible de cette circulation océanique après 2100.
- ✓ Neige et glace
  - La surface recouverte par la neige et les glaces marines continuera à diminuer dans l'hémisphère Nord.
  - La fonte des glaciers et des calottes glaciaires se poursuivra au cours du 21<sup>ème</sup> siècle.
  - La calotte glaciaire de l'Antarctique pourrait augmenter de volume en raison de l'augmentation des précipitations, tandis que la masse de la calotte groenlandaise diminuera probablement. Si le réchauffement continue au-delà de 2100, la fonte des deux calottes pourrait être responsable d'une augmentation du niveau de la mer de 60 cm par siècle.
- ✓ Niveau de la mer
  - Entre 1990 et 2100, l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre 9 cm à 88 cm, en raison de la dilatation de l'eau liée à la température plus élevée et de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires.

Cette élévation pourrait continuer pendant plusieurs siècles après une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre.

- La fonte de tous les glaciers augmenterait le niveau de la mer de 0,5 m.
- La contribution actuelle du Groenland et de l'Antarctique à l'élévation du niveau de la mer est légèrement négative du fait d'une accumulation de neige sur l'Antarctique, mais au cours des 1.000 prochaines années, leur fonte pourrait être responsable d'une élévation de 6 m.
- Des différences régionales très fortes peuvent apparaître. De plus, l'augmentation du nombre d'événements météorologiques extrêmes entraîne une augmentation des tempêtes et donc de la fréquence élévations extrêmes du niveau de la mer par rapport au passé.

## 2.5.2 Niveau régional

La communauté scientifique, le monde politique et le public demandent de plus en plus des projections réalistes des impacts régionaux des changements climatiques futurs. Ces simulations impliquent la prise en compte de facteurs atmosphériques à grande échelle (par exemple l'abondance des gaz à effet de serre) qui déterminent la circulation générale mais aussi de facteurs à méso-échelle influençant la circulation locale et régulant la distribution régionale des variables climatologiques.

Les modèles utilisés aujourd'hui par les scientifiques sont des "Modèles de circulation générale" (General Circulation Models, GCMs), qui simulent et prédisent le climat pour toute la terre. Leur résolution n'est toutefois pas suffisamment fine, - actuellement, ils utilisent une résolution horizontale de 300 km -, pour pouvoir incorporer de manière adéquate les facteurs d'impact sur le bilan radiatif à méso-

## Les changements climatiques

échelle et effectuer une prédiction régionale. C'est pourquoi il faut développer de meilleurs modèles climatiques avec une résolution horizontale de 10 à 50 km, pouvant de plus être intégrés dans des modèles globaux.

Des différences sensibles entre les changements globaux et régionaux sont attendues:

- ✓ Il est très probable que la plupart des terres émergées se réchaufferont plus vite que le taux moyen global, surtout aux hautes latitudes en hiver.
- ✓ Aux hautes latitudes, les précipitations augmenteront en hiver comme en été. Les risques d'inondation augmenteront sur quasiment toute l'Europe.
- ✓ La gamme des variations régionales d'élévation du niveau de la mer est substantielle par rapport à l'élévation moyenne globale projetée.
- ✓ Le Sud de l'Europe sera plus sec.
- ✓ A la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, la moitié des glaciers alpins et une grande partie du permafrost (régions dont le sol est gelé en permanence) pourraient disparaître.

■ **Un réseau de recherche multidisciplinaire composée de chercheurs belges (ULg-CEME, ULg-LGIH, FUSAGx-UHAGx, KULeuven-H&EG, IRM) ont testé trois modèles hydrologiques sur trois bassins versants belges (bassins de la Gette, du Geer et de l'Ourthe) pour estimer les changements dans ces bassins sous l'influence des changements climatiques. Les résultats obtenus démontrent clairement que les changements climatiques projetés pourraient avoir des impacts importants sur les cycles hydrologiques de ces bassins: abaissement du niveau de la nappe phréatique, diminution du débit**

- **de la rivière et diminution de l'humidité des sols, principalement en été. Il serait nécessaire de prendre en compte de nouveaux résultats des Modèles de circulation générale pour obtenir une estimation plus précise de l'augmentation du risque d'inondations.**

### 2.6. Possibilité d'effets inattendus à long terme.

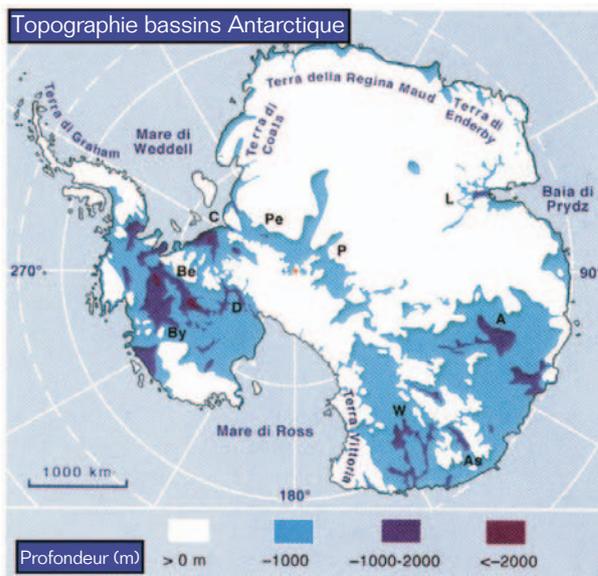
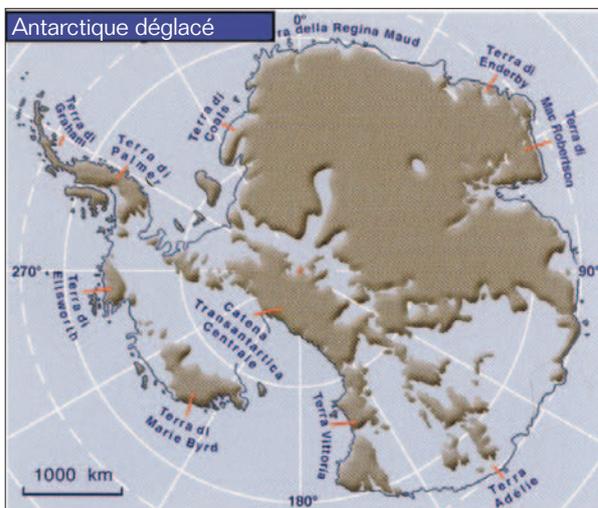
Il n'est pas exclu qu'au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, la perturbation du bilan radiatif due aux gaz à effet de serre mette en route des modifications profondes des systèmes physiques et biologiques qui pourraient survenir de manière brutale. Certains de ces changements pourraient être irréversibles, comme l'arrêt de la circulation thermohaline au déversement plus rapide de glace et d'eau glacée en provenance du Groenland et de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest. Beaucoup d'écosystèmes pourraient également être perturbés de façon brutale, avec des conséquences sur leur fonction, leur biodiversité et leur productivité. Le blanchiment du corail dû à l'élévation de la température de l'eau en est un exemple.

Actuellement, prédire le risque d'apparition d'un de ces phénomènes est très difficile, les processus à la base étant insuffisamment connus.

#### 2.6.1 La calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest

La calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest (abrégé WAIS pour Western Antarctic Ice Sheet, cf. figure ci-dessous) contient suffisamment de glace pour élever le niveau de la mer de 6 mètres. La stabilité de cette calotte glaciaire, qui en grande partie est soutenue par un sol qui se trouve lui-aussi en dessous de la surface de la mer, est remise en question par toute une série de scientifiques. Selon eux, il n'est pas

tout à fait impensable que la glace en marge de la calotte glaciaire, se détache et entraîne donc une grande quantité de glace WAIS dans la mer. Un consensus voit cependant le jour entre les scientifiques en ce sens que ce phénomène ne se produira peut-être pas au 21<sup>ème</sup> siècle. Mais ce danger est bien réel à long terme. Le panel d'experts WAIS estime le risque d'une élévation du niveau de la mer de plus de 2 mm par an sur 1.000 ans à 50%, mais aussi à 50% que le WAIS ne contribue pas à l'élévation du niveau de la mer pour les prochaines 1.000 années.



*Instabilité potentielle de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest (West Antarctic Ice Sheet, WAIS). (ULB-GLACIOL).*

## 2.6.2 La circulation thermohaline

Une conséquence probable du réchauffement global est une fonte partielle de la calotte glaciaire groenlandaise. Cette fonte pourrait d'une part contribuer à une élévation du niveau de la mer à raison de 9 cm d'ici à 2100 (et même plus si le réchauffement se poursuit au-delà du 21<sup>ème</sup> siècle), et d'autre part entraîner un flux d'eau douce à proximité des deux sites de formation d'eau profonde de l'Atlantique Nord. Cet apport d'eau douce contribuera à moduler la circulation thermohaline, et il est donc très important d'en tenir compte dans les modèles – ce qui a été rarement le cas jusqu'à présent. Des simulations effectuées notamment par des chercheurs belges, ont montré qu'au delà du 21<sup>ème</sup> siècle, ce phénomène pourrait donner lieu à une diminution importante et abrupte du Gulf Stream (courant chaud du nord de l'océan Atlantique), avec pour conséquence un refroidissement local dans le nord de l'Atlantique.

## 2.6.3 Des surprises biogéochimiques

Un autre effet qui préoccupe les scientifiques est la libération due au changement de climat de grandes quantités de gaz à effet de serre – respectivement du CO<sub>2</sub> et du méthane -, pour l'instant emprisonnés sous forme d'hydrates gazeux dans le permafrost et dans des sédiments du sol marin et du sol des grands lacs. La libération de ces gaz renforcerait encore l'effet de serre.

- Des chercheurs de UGent-RCMG étudient la déstabilisation des hydrates gazeux dans le lac Baïkal. Un autre projet couvre l'étude du phénomène dans la mer Noire.

## 2.7. Les changements climatiques et l'ozone

Au Chapitre 1 on a abordée la problématique de l'ozone. Il existe des mécanismes de rétroaction entre l'ozone et les changements climatiques: non seulement l'ozone, tant stratosphérique que troposphérique, influence les changements climatiques, mais aussi à l'inverse, les changements climatiques ont une incidence sur les concentrations et la distribution de l'ozone. Il est cependant encore difficile de mesurer les conséquences en raison de notre connaissance encore limitée des processus liés au climat qui peuvent influencer les concentrations d'ozone.

Le trou dans la couche d'ozone et l'effet de serre présentent une série de processus physiques et chimiques communs. C'est pourquoi le Protocole de Kyoto est lié au Protocole de Montréal. Par exemple, la diminution de la concentration en CFC (chlorofluorocarbures) destructeurs d'ozone suite à la mise en oeuvre du Protocole de Montréal aura une influence bénéfique sur le réchauffement global, du fait que les CFC sont aussi de puissants gaz à effet de serre. Mais certains substituts des CFC sont également des gaz à effet de serre.

De nombreux modèles utilisés pour étudier les mécanismes de rétroaction entre le climat et la couche d'ozone ont montré que l'effet combiné de la diminution de la couche d'ozone et de l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre ont contribué à un refroidissement de la stratosphère. Ce refroidissement pourrait aussi favoriser la formation et la persistance des nuages stratosphériques responsables de la décomposition de l'ozone.

Tous ces processus sont donc très complexes et couplés entre eux. La question de savoir si les changements climatiques vont avoir un impact sur la diminution ou l'agrandissement

du trou d'ozone est importante et reste non résolue.

Le réchauffement entraîne une végétation plus sèche dans de nombreuses régions. Si l'on ajoute à cela le fait qu'une concentration plus élevée de  $\text{CO}_2$  augmente le risque d'éclairs, il y aura peut-être plus d'incendies de forêt libérant des précurseurs d'ozone  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ . Les changements de climat influencent l'émission des précurseurs d'ozone:  $\text{N}_2\text{O}$  en  $\text{NO}$  provenant du sol à la suite d'une activité plus élevée des micro-organismes et  $\text{CH}_4$  provenant des terres humides et des hydrates gazeux du sol marin ou du permafrost. L'émission des composés organiques volatils biogènes qui entraîne la formation des précurseurs d'ozone et des aérosols dépend des conditions météorologiques.

Une augmentation de l'humidité de l'air augmente la concentration des radicaux  $\text{OH}$ , qui raccourcissent la durée de présence des précurseurs d'ozone dans l'atmosphère. Les changements climatiques influencent également le transport de l'ozone dans la troposphère ainsi que le transport entre la stratosphère et la troposphère.

## 2.8. Kyoto sauvera-t-il le climat?

### 2.8.1 Pourquoi le climat doit-il être sauvé?

Selon les projections du GIEC, les changements climatiques vont s'intensifier dans les décennies et les siècles à venir. Ces changements auront des impacts positifs et négatifs sur le développement humain. Parmi les effets bénéfiques, on peut citer:

- ✓ l'augmentation des surfaces cultivables, certaines régions actuellement trop froides pour l'agriculture étant soumises à des conditions plus favorables;
- ✓ l'ouverture de nouvelles routes maritimes suite à la réduction des glaces arctiques;

- ✓ une diminution de la mortalité due aux hivers rigoureux.

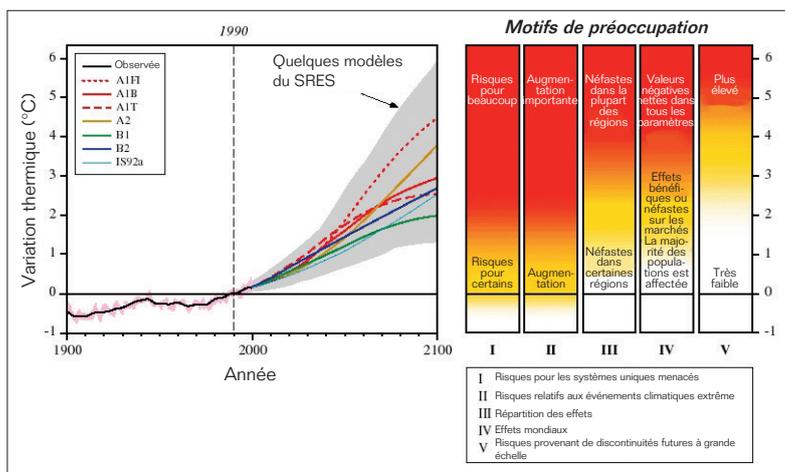
Mais les quelques impacts positifs ne compensent malheureusement pas les nombreux impacts négatifs:

- ✓ diminution générale des rendements agricoles dans la plupart des régions tropicales et sub-tropicales pour tous les scénarios envisagés, ainsi qu'aux latitudes moyennes à partir d'une augmentation de la température moyenne annuelle de 2-3°C;
- ✓ diminution de la quantité disponible en eau potable, particulièrement dans les régions sub-tropicales;
- ✓ augmentation du nombre de personnes exposées aux maladies transmises par des vecteurs (malaria)
- ✓ augmentation de la mortalité due aux vagues de chaleur;
- ✓ augmentation du risque d'inondations.

Les effets négatifs pourraient avoir un impact beaucoup plus grand que les quelques effets positifs. La communauté internationale a entériné ce fait en adoptant la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC, 1992) dont l'objectif ultime est "de stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable." (UNFCCC - Article 2). La Convention Climat ne s'étend pas sur ce que ce

niveau signifie en termes quantitatifs absolus. Les sciences sociales, naturelles et appliquées peuvent contribuer à la détermination de ce niveau en élargissant les connaissances et en réduisant les incertitudes. La définition de ce qui constitue "une perturbation anthropique dangereuse" reste toutefois un jugement de valeur, qui doit être fondé sur un processus socio-politique prenant en compte des considérations sur le développement, l'équité et la durabilité de même que les incertitudes et les risques (cf. Encadré 10).

Afin de simplifier la prise de décisions éventuelles concernant le "niveau de danger", les impacts des changements climatiques futurs possibles ont été résumés par le GIEC en cinq catégories de risques. La figure ci-dessous montre clairement que les risques de conséquences



Raisons d'inquiétude en ce qui concerne les conséquences des changements climatiques projetés. Les risques de conséquences négatives des changements climatiques augmentent selon leur importance. La partie gauche du tableau montre l'augmentation relative de la température observée par rapport à 1990 et les températures estimées par le Groupe de travail 1 pour les scénarios du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions du GIEC (GIEC-SRES, 2000). La partie droite reprend les cinq motifs d'inquiétude en ce qui concerne les risques de changement climatique d'ici à 2100. La couleur blanche indique les conséquences neutres et les conséquences négatives et positives de peu d'importance; le jaune, les conséquences négatives faibles et le rouge, les conséquences négatives plus manifestes.

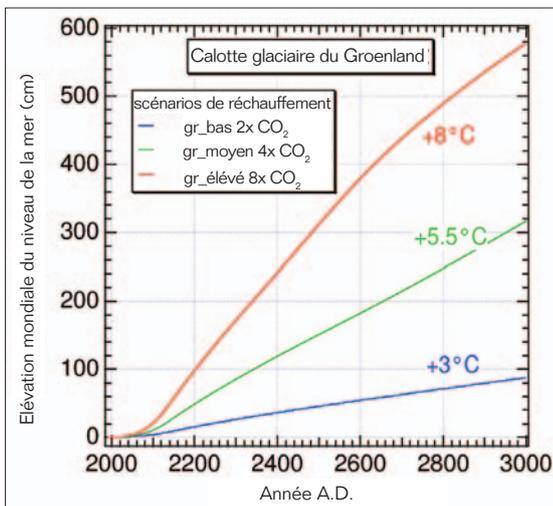
# Les changements climatiques

## Encadré 10: Quelques exemples de systèmes physiques sensibles étudiés par les chercheurs belges

### La calotte glaciaire du Groenland

Même après une stabilisation du climat, la calotte glaciaire groenlandaise continuera à réagir au changement de climat pendant plusieurs millénaires. Sur la base de modèles, les chercheurs s'attendent à la disparition quasi totale de cette calotte glaciaire en cas d'élévation de la température annuelle moyenne locale de 3°C pendant plusieurs millénaires, avec pour conséquence une contribution finale de 7 mètres à l'élévation mondiale du niveau de la mer.

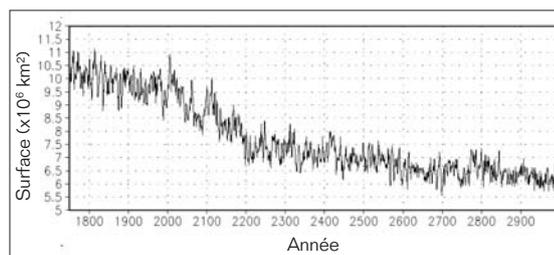
Le réchauffement au Groenland devrait être supérieur à la moyenne mondiale. Dans le cas d'un réchauffement de 5,5°C au Groenland, la contribution à la hausse du niveau de la mer serait de 3 mètres après un millénaire.



Réaction de la calotte glaciaire du Groenland à trois scénarios de réchauffement du troisième millénaire. Les chiffres des courbes font référence à l'élévation moyenne par an de la température au-dessus du Groenland jusqu'à l'année 3000. L'élévation des températures projetées pour le Groenland est supérieure à la moyenne mondiale (d'un facteur 1.2 à 3.1). (VUB-DG).

### La glace marine dans l'hémisphère Sud

Selon une simulation par un modèle globale atmosphère – océan – mer – glace, la réaction de l'Océan austral à une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère peut être divisée en deux phases différentes. Grâce à son énorme capacité de stockage de la chaleur, l'océan adoucira d'abord le réchauffement de la surface terrestre. Mais un siècle après l'augmentation importante des gaz à effet de serre, le réchauffement sera renforcé à la suite d'une rétroaction positive liée à un transport océanique renforcé de la chaleur vers l'Océan austral. Cette phase de renforcement du réchauffement sera responsable d'une diminution importante de la surface couverte de glace marine dans l'Océan austral, et doit probablement encore venir. Cet effet doit être pris en compte dans les modèles ainsi que dans l'interprétation des observations.



Evolution dans le temps (en années) de la surface de glace marine moyenne (en millions de km<sup>2</sup>) autour de l'Antarctique, simulée par un modèle climatique utilisant l'élévation de la concentration des gaz à effet de serre observée au cours de la période 1750-2000. Au cours du troisième millénaire, la concentration des gaz à effet de serre est maintenue au niveau observé en 2000. Même dans ce scénario trop optimiste pour être réaliste, la simulation montre une diminution énorme de la glace au cours du troisième millénaire. (UCL-ASTR).

négatives augmentent en fonction de l'importance des changements. Chaque catégorie de risques est perçue de manière différente par les différents acteurs et pays. C'est pourquoi aucun consensus n'a encore été atteint au plan international sur le niveau à partir duquel le changement climatique ou les concentrations de gaz à effet de serre doivent être considérés comme dangereux. Le Conseil des Ministres de l'Union européenne a toutefois adopté une position officielle en 1996: *"Etant donné le risque sérieux d'une telle augmentation, et principalement le rythme très rapide du changement, le Conseil pense que la température moyenne mondiale ne devrait pas dépasser 2°C au-dessus du niveau préindustriel (...)"*. La figure suivante montre les motifs de préoccupation en ce qui concerne les risques liés aux changements climatiques. Pour répondre à la question de savoir si le Protocole de Kyoto sauvera le climat, nous considérerons que 'sauver le climat' implique d'atteindre les objectifs de l'Union européenne.

### **2.8.2 Une nature lente**

Pour pouvoir estimer les contraintes à imposer au niveau des émissions pour arriver à stabiliser le climat et à éviter une augmentation de la température moyenne mondiale de plus de 2°C au-dessus du niveau préindustriel, il faut comprendre l'enchaînement de causes à effets entre les émissions et la température globale et il faut identifier les sources d'inertie du système climatique. L'inertie est en effet une caractéristique inhérente aux systèmes climatiques, écologiques et socio-économiques. Les effets combinés des inerties des composants des différents systèmes sont tels que la stabilisation du climat et des systèmes qui en dépendent ne sera atteinte que longtemps après la réduction des émissions.

Ainsi, les perturbations atmosphériques et océaniques entraînées par les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> depuis 1750 se

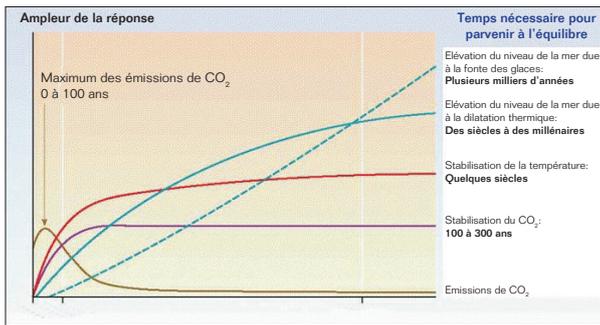
maintiendront pendant des siècles du fait de la lente redistribution du carbone dans les réservoirs terrestres et océaniques. On estime également que la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> restera durant des siècles à un niveau proche du plus haut niveau jamais atteint, les processus naturels ne pouvant réduire la concentration de CO<sub>2</sub> au niveau préindustriel qu'après une période fort longue (à l'échelle géologique). Par contre, la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre avec une durée de vie plus petite, comme le méthane, pourrait mener à une stabilisation des concentrations atmosphériques en quelques décennies.

Ainsi que posé auparavant, le climat réagit toujours avec un certain retard à une perturbation du bilan radiatif. Les océans et la cryosphère (calottes glaciaires, glaciers et permafrost) sont les causes principales de l'inertie physique du système climatique à l'échelle du millénaire, et ce du fait de leur masse, de leur épaisseur. L'élévation du niveau de la mer prendra plusieurs millénaires. Et ceci pour plusieurs raisons: la pénétration de la chaleur atmosphérique dans les couches mixtes superficielles de l'océan ne prend que quelques décennies, mais cela peut prendre des siècles avant que cette chaleur ne parvienne dans les couches profondes. C'est pourquoi une élévation du niveau de la mer comme conséquence de l'expansion thermique de l'eau de mer prendra des siècles, même si l'atmosphère s'est déjà stabilisée. De plus, la fonte des calottes glaciaires prendra encore plus de temps (cf. figure ci-dessous).

### **2.8.3 Kyoto, un premier pas important**

Les changements climatiques futurs sont déterminés par les émissions passées, actuelles et futures. Plus importantes seront les réductions des gaz à effet de serre et plus tôt elles seront introduites, plus faibles et plus lents seront les processus de réchauffement et d'élévation du niveau de la mer projeté.

# Les changements climatiques



Concentration de CO<sub>2</sub>, température et niveau de la mer continuent à augmenter longtemps après la diminution des émissions. (GIEC-SYR - Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse).

Le Protocole de Kyoto adopté en 1997 a pour objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 5% en moyenne dans le monde industrialisé entre 1990 et la période 2008-2012. Cet objectif de réduction est en fait très loin de ce qui serait nécessaire pour "sauver" le climat et maintenir l'augmentation de la température en dessous du seuil de 2°C par rapport à la période préindustrielle. On a pu établir que si le Protocole de Kyoto était entièrement mis en oeuvre par tous les pays industrialisés, on arriverait à une concentration en CO<sub>2</sub> en 2010 qui ne serait inférieure que de 1 à 1,5 ppm par rapport à la concentration qui aurait été atteinte si aucune mesure n'avait été prise.

Kyoto est néanmoins important, comme le disait le Professeur Bolin, ancien Président du GIEC: "étant donné le temps de résidence du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la plus petite réduction du taux de croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique a une importance considérable à long terme." Mais beaucoup d'autres pas seront nécessaires.

## 2.9. Incertitudes-clés à aborder dans de futures recherches

Des progrès importants ont été réalisés dans la connaissance des différents aspects des changements climatiques et la réponse

anthropogène. Le troisième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC-TAR - Climate Change 2001: The Scientific Basis) souligne toutefois la nécessité d'études supplémentaires:

- ✓ Détection et recherche des causes du changement climatique.
- ✓ Compréhension et prédiction des changements climatiques régionaux et des extrêmes climatiques.
- ✓ Quantification de l'impact des changements de climat aux niveaux mondial, régional et local.
- ✓ Analyse des activités d'adaptation et d'atténuation.
- ✓ Intégration de tous les aspects du changement climatique dans les stratégies de développement durable.
- ✓ Recherches intégrées et détaillées pour l'évaluation de la notion de "perturbation anthropique dangereuse du système climatique".



## 3. Le rôle des océans au sein du *global change*



### 3.1 D'une source de CO<sub>2</sub> à un puits de CO<sub>2</sub>

Jusqu'il y a peu, les océans constituaient pour l'atmosphère une source de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Chaque année, ils envoyaient dans l'atmosphère 520 millions de tonnes (Mt) de CO<sub>2</sub> provenant des réactions chimiques et biologiques impliquées dans le cycle marin du carbone. Cette situation s'est inversée de nos jours: les concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont tellement augmenté (cf. Chapitres 1 et 2) que les océans réabsorbent maintenant d'énormes quantités de CO<sub>2</sub>. Quelques chiffres: selon le "IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995" (IPCC, 1995a), l'homme rejette annuellement dans l'atmosphère  $7.100 \pm 1.100$  Mt de carbone sous forme de dioxyde de carbone. Environ  $3.800 \pm 200$  Mt sont réabsorbés: la plus grande partie par les océans ( $2.000 \pm 800$  Mt) et le reste par une série d'accepteurs (ou puits de carbone) qui ne sont pas encore tous identifiés.

Malgré l'importance des océans dans la modération des changements climatiques, tous les paramètres impliqués dans les processus complexes du cycle marin du carbone sont loin d'être connus. De plus, les mesures et les modèles décrivant les échanges de CO<sub>2</sub> entre l'atmosphère et les océans sont encore trop lacunaires. Les modèles globaux, par exemple, tiennent uniquement compte des mers et des océans et négligent l'importance des zones côtières, du plateau et du talus continental. Or, c'est précisément dans ces zones qu'ont lieu les processus biologiques les plus actifs.

### 3.2 Les pompes physiques, chimiques et biologiques

#### 3.2.1 Les formes de carbone dans les océans

Dans l'hydrosphère, le carbone (C) est présent sous forme inorganique (minérale) et organique. Dans la suite de ce chapitre, nous parlerons souvent de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dissous ou de CO<sub>2</sub> dans l'eau. En réalité, CO<sub>2</sub> dissous

se trouve essentiellement sous la forme d'ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et dans une moindre mesure, sous forme d'ions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). En évoquant le  $\text{CO}_2$  dissous, nous penserons donc implicitement aux réactions d'équilibre suivantes:

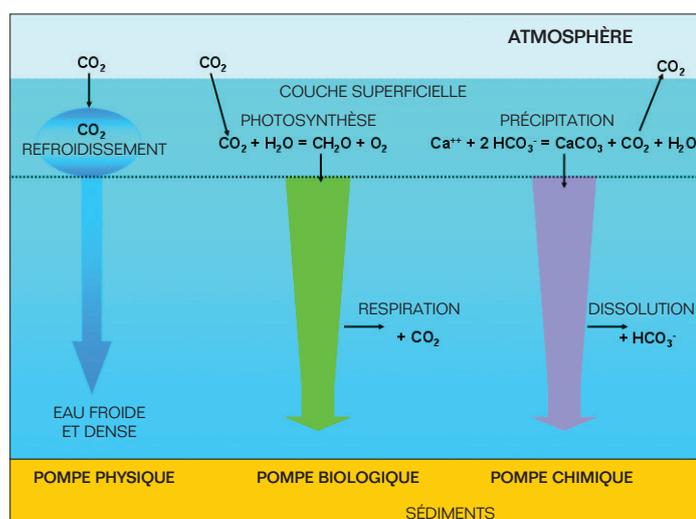


Comme le montrent ces équilibres (où intervient l'ion  $\text{H}^+$ ), le carbone inorganique joue un rôle important dans la régulation du degré d'acidité (pH) de l'eau de mer. Le carbone inorganique est également présent sous la forme de particules solides de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). De nombreux organismes vivants (depuis les algues microscopiques jusqu'aux coraux en passant par les coquillages) utilisent le  $\text{CaCO}_3$  pour renforcer leur squelette intérieur ou extérieur.

### 3.2.2 Des eaux superficielles aux eaux profondes

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est un gaz qui se dissout facilement dans l'eau, c'est pourquoi il y a un échange continu de ce gaz entre l'atmosphère, les mers et les océans. Lorsque la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique augmente, sa concentration dans les couches d'eau de surface (en contact avec l'atmosphère) augmente également. La quantité totale de  $\text{CO}_2$  échangée entre les océans et l'atmosphère dépend avant tout de la superficie et de l'épaisseur de la couche d'eau en contact avec l'air. Le plus souvent, l'épaisseur de cette couche "de mélange" se limite à quelques centaines de mètres. La température est un deuxième facteur important. La solubilité du  $\text{CO}_2$  est inversement proportionnelle à la température de l'eau: plus celle-ci est basse, plus la quantité de gaz dissous est élevée.

Les couches profondes des océans ne sont pas en contact direct avec l'atmosphère. Dans ces couches, l'accumulation du  $\text{CO}_2$  est due à d'autres mécanismes. Les trois processus principaux assurant le transfert du  $\text{CO}_2$  des couches superficielles vers les couches d'eau profonde sont les pompes physique, biologique et chimique (ou pompe à carbonate) (cf. figure ci-dessous).



Représentation schématique des principales pompes à carbone dans les océans.

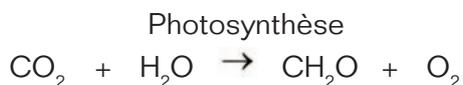
### 3.2.3 La pompe physique

Les différences de densité de l'eau de mer (dues aux variations de température et de salinité) créent des courants qui parcourent la totalité des océans: c'est ce qu'on appelle la circulation thermohaline. Dans l'océan Atlantique Nord, l'eau froide et dense (riche en  $\text{CO}_2$  dissous) migre vers les profondeurs et assure de cette manière un transfert du carbone des eaux de surface vers les eaux profondes. Ce processus (également appelé pompe physique) constitue un puits de carbone pour une période de quelques milliers d'années: autrement dit, le carbone entraîné vers les couches profondes de l'océan devra attendre plusieurs millénaires pour revenir au contact de l'atmosphère.

## Le rôle des océans au sein du *global change*

### 3.2.4 La pompe biologique

La photosynthèse est un autre mécanisme important qui permet de lier le carbone atmosphérique. Sous l'influence de la lumière, les organismes photosynthétiques assimilent le  $\text{CO}_2$  et le transforment en matière organique (les hydrocarbonés). Ce faisant, ils libèrent également de l'oxygène ( $\text{O}_2$ ). L'équation chimique simplifiée du processus peut être décrite comme suit:



où le formaldéhyde ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) est la représentation simplifiée du matériau organique synthétisé.

La photosynthèse n'est toutefois possible que dans la partie supérieure des océans (la zone photique), où il y a suffisamment de lumière. Dans les océans, cette photosynthèse est principalement assurée par les algues: les algues vivantes ou mortes servent de nourriture à d'autres organismes (zooplancton, poissons, bactéries) qui transforment à leur tour une partie du carbone organique fixé en  $\text{CO}_2$ . Ce processus, appelé 'respiration', est exactement l'inverse du processus de la photosynthèse:



Lorsque la respiration a lieu dans les couches d'eau supérieures, le  $\text{CO}_2$  libéré peut être recyclé via la photosynthèse ou rejeté dans l'atmosphère. Toutefois, une partie du carbone organique sédimente vers les couches profondes sous forme d'organismes morts ou de matières fécales. Ce carbone organique est lui aussi transformé en  $\text{CO}_2$  (généralement par des bactéries) dans les couches intermédiaires (au-dessus de 1.000 mètres), mais le  $\text{CO}_2$  libéré ne peut pas être échangé avec l'atmosphère et

reste sous forme dissoute. Ces masses d'eau intermédiaires forment un puits de carbone pour une période de quelques dizaines d'années.

Seule une petite fraction du carbone organique sédimentant depuis les couches d'eau supérieures atteint finalement le fond de l'océan. Une fois déposées, ces molécules sont encore transformées par les organismes vivant sur le sol marin (les organismes benthiques). Enfin, une fraction encore plus petite du matériau organique sédimenté est enfouie et préservée dans les sédiments marins. Ce carbone y est stocké pour des millions d'années.

### 3.2.5 La pompe chimique

La pompe chimique ou pompe à carbonate est considérée depuis peu comme un mécanisme important qui permet de transférer le carbone des couches supérieures vers les couches d'eau profondes. De nombreux organismes marins forment un squelette de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) à partir du bicarbonate dissous et d'ions de calcium. La réaction est la suivante:



C'est donc un processus qui produit du  $\text{CO}_2$ , mais qui permet également la sédimentation des squelettes d'organismes morts. Dans les couches profondes, sous l'influence de la température plus basse et de la pression plus élevée, une partie du  $\text{CaCO}_3$  peut à nouveau se décomposer en bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et ions de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Néanmoins une fraction importante du  $\text{CaCO}_3$  est enfouie dans les sédiments marins pour des millions d'années.

### 3.3 Quelle est l'efficacité des océans en tant que puits de carbone?

#### 3.3.1 Etude des côtes et de l'océan Austral

Nous savons aujourd'hui que les océans absorbent une grande partie du rejet atmosphérique de CO<sub>2</sub> anthropogène. Il est toutefois encore difficile de prédire l'évolution des concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'air ainsi que l'évolution du climat. Un des problèmes est dû au fait que les modèles décrivant le cycle global du carbone ne tiennent compte que des océans ouverts et donc pratiquement pas des talus continentaux, des zones côtières et des estuaires. L'hétérogénéité de ces milieux et la complexité des processus qui s'y déroulent, compliquent en effet leur intégration dans les modèles globaux du cycle du carbone. Et pourtant ces zones (qui ne représentent que 7% de la surface totale des océans) sont extrêmement importantes: des processus physiques, chimiques et biologiques très actifs s'opèrent à leur niveau, influencent fortement le cycle du carbone des océans et sont responsables d'une grande partie de l'échange de carbone à l'échelle mondiale.

Une autre zone très importante est l'océan Austral entourant l'Antarctique. Selon les estimations, cet océan contribue pour 30% à la fonction de puits de carbone des océans du monde entier, alors qu'il ne représente que 10% à peine de leur superficie totale. Mais les processus impliqués dans le cycle du carbone dans cet océan sont encore mal quantifiés.

Plusieurs chercheurs belges ayant contribué à la résolution de ces questions, nous avons synthétisé une partie de leurs réponses dans les paragraphes qui suivent.

#### 3.3.2 Le CO<sub>2</sub> dans les eaux de surface des zones côtières

La meilleure méthode pour évaluer les échanges de dioxyde de carbone entre l'atmosphère et

les océans au niveau mondial est de mesurer la concentration en CO<sub>2</sub> des eaux superficielles dans le plus grand nombre d'endroits possibles. La contribution des chercheurs belges est importante, car il est frappant de constater à quel point les données sur les zones côtières, les marges continentales et l'océan Austral sont lacunaires

#### Cours d'eau et estuaires

L'eau des rivières contient généralement des concentrations élevées de CO<sub>2</sub> dissous provenant de la décomposition des matières organiques contenues dans les eaux résiduaire déversées par l'homme et dans les eaux de ruissellement ayant lessivé les sols. L'homme joue également un rôle important dans l'érosion.

- L'ULg-OCEANCHEM étudie intensivement
- a distribution du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)
- dissous et l'échange avec l'atmosphère
- dans les estuaires. Les chercheurs ont
- développé eux-mêmes la plus grande
- partie de leur matériel de mesure. Grâce
- à ces appareils, ils peuvent non seulement
- mesurer la concentration de CO<sub>2</sub> dissous,
- mais ils peuvent également mesurer
- directement l'échange gazeux entre l'air
- et l'eau. Leurs premières mesures ont
- été réalisées dans l'estuaire de l'Escaut
- (Belgium), où la concentration de CO<sub>2</sub>
- est 25 fois supérieure à la concentration
- d'équilibre, ce qui fait de l'Escaut
- une source importante de CO<sub>2</sub> pour
- l'atmosphère: la quantité de carbone
- échangée peut atteindre 790 tonnes par
- jour.
- Entre-temps, les chercheurs de l'ULg ont
- sérieusement augmenté le nombre de
- zones de mesure. Plus particulièrement, ils
- ont étudié dix estuaires européens (projet
- européen BIOGEST, "Biogas Transfer in

## Le rôle des océans au sein du *global change*

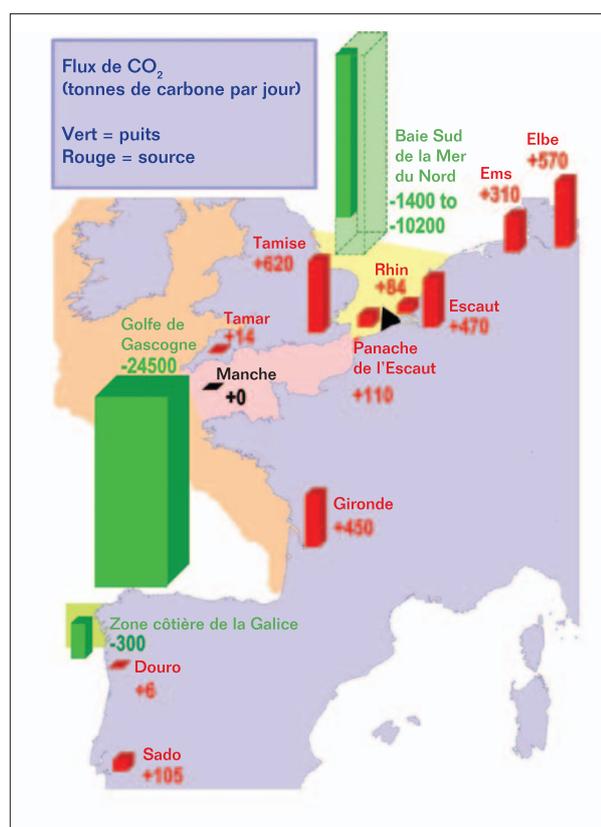
- Estuaries"). Cette recherche a permis de montrer que les estuaires européens apportent 30 à 60 Mt de carbone dans l'air chaque année, ce qui correspond à 5-10% du total du rejet anthropogène pour l'Europe.
- Les chercheurs de l'ULg-OCEANCHEM et de la VUB-ANCH) poursuivent actuellement leur campagne de mesure en dehors de l'Europe, entre autres dans une série d'estuaires à mangroves de l'Asie du Sud-est et de l'Afrique de l'Est.

### Zones côtières

Dans les zones côtières, la concentration de CO<sub>2</sub> dissous dépend de divers processus tels que l'arrivée ou non d'une eau riche en CO<sub>2</sub> provenant des cours d'eau ou la remontée d'eau provenant des couches plus profondes, notamment sous l'effet du vent. Dans ce dernier cas, l'eau est non seulement froide, mais également riche en CO<sub>2</sub> à la suite de la dégradation du matériau organique ayant sédimenté. L'eau est également riche en substances nutritives, ce qui stimule la croissance des algues et, à terme, entraîne une assimilation plus élevée de CO<sub>2</sub>.

- Grâce à leurs expériences dans le golfe de Gascogne, des chercheurs belges (ULB-GMMA, ULB-OCEAN, ULg-OCEANBIO, ULg-OCEANCHEM, ULg-LPAP, VUB-ANCH) ont été parmi les premiers à étudier le rôle des remontées d'eau des couches plus profondes vers les marges du plateau continental. Le projet européen OMEX (Ocean Margin Exchange) a été lancé à la suite de ce travail de pionnier, sous la coordination de l'équipe de l'ULB-OCEAN.
- Les zones côtières étudiées plus en détails par les chercheurs belges (le golfe de Gascogne, la zone côtière de la

- Galice et de la mer du Nord) fonctionnent comme puits de carbone sur une base annuelle (cf. figure ci-dessous). Leur contribution à l'échelle mondiale est toutefois encore sujette à caution, c'est pourquoi des recherches supplémentaires portant sur d'autres zones côtières sont nécessaires.



Echange de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) entre l'atmosphère et la mer pour différentes zones côtières européennes. (ULg-OCEANCHEM).

### 3.3.3 La pompe biologique dans les zones côtières

Sur le plateau continental, la pompe biologique est influencée par un grand nombre de paramètres qui diffèrent des paramètres de l'océan ouvert. Dans ces zones moins profondes, les particules contenant du matériau organique atteignent plus vite les sédiments et y sont plus rapidement enfouies. De plus, les zones côtières sont également les zones où se dépose le matériau organique provenant

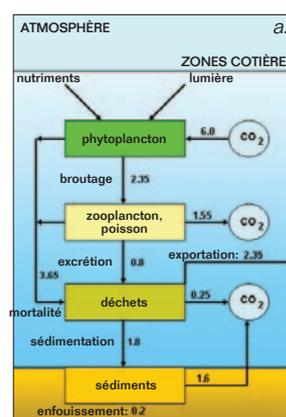
des cours d'eau et des estuaires. Cette accumulation rapide de sédiments organiques favorise une activité biologique nettement plus importante (mollusques, poissons, vers, bactéries, etc.) que celle présente dans l'océan ouvert.

■ Afin d'élucider les processus et les paramètres les plus importants du cycle du carbone dans la baie sud de la mer du Nord, plusieurs équipes de chercheurs belges ont mis en place une approche multidisciplinaire. Leurs recherches ont notamment permis de mieux comprendre la distribution verticale des matières organiques, des organismes benthiques (organismes vivant sur et dans le fond marin), des oxydants et des métabolites dans les sédiments marins.

■ Ils ont également développé plusieurs modèles: hydrodynamique (IRSNB-MUMM), chimique (ULB-GMMA, ULB-OCEAN, ULg-OCEANCHEM, VUB-ANCH) et biologique (UGent-MARBIOL, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN, ULg-OCEANBIO, VUB-ECOL), ce qui leur permet de mieux intégrer les données à long terme et ainsi de prédire les effets sur le milieu d'une modification des conditions environnementales (par ex. en cas de travaux de dragage).

■ En résumé, les chercheurs ont démontré que la production photosynthétique de la baie sud de la mer du Nord correspond à environ 230 g de carbone par m<sup>2</sup> par an, soit trois fois plus que l'océan ouvert. La plus grande partie de cette production est à nouveau décomposée et transformée en CO<sub>2</sub> ou exportée vers la partie Nord de la mer du Nord. Environ 4% de la production totale est déposée et enfouie dans le sédiment.

Ces résultats sont en accord avec ceux des chercheurs étudiant les zones côtières des océans Atlantique Nord ou Pacifique Nord. La mise en commun de toutes ces données a permis d'établir un bilan provisoire des flux de carbone pour toutes les zones côtières du monde, comme présenté dans la figure suivante.



Cycle du carbone (C) pour toutes les zones côtières du monde (en milliards de tonnes de carbone -C- par an). (ULB-OCEAN).

### 3.3.4 La pompe biologique dans l'océan profond

Jusqu'il y a peu, l'importance de la pompe biologique dans les mers entourant l'Antarctique n'avait pas encore été évaluée correctement. Grâce à des recherches à long terme (effectuées notamment par des chercheurs belges), nous savons maintenant que ces océans constituent un puits de carbone sur une base annuelle. C'est ainsi que le secteur indien de l'océan Austral absorbe 250 Mt de carbone annuellement. Ce CO<sub>2</sub> est stocké dans les couches profondes de cet océan pour une durée allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles. La pompe biologique n'est pas seulement active dans l'océan profond, mais aussi sur les marges continentales, ainsi que l'ont démontré plusieurs équipes de recherche belge pour le golfe de Gascogne.

■ VUB-ANCH et ULB-OCEAN se concentrent sur l'amélioration des techniques de

## Le rôle des océans au sein du *global change*

- mesure de la concentration du carbone organique stocké dans les couches d'eau profondes. Grâce à des mesures océanographiques étalées sur 10 ans et à l'élaboration de modèles (VUB-ANCH, ULB-ESA, ULg-OCEANCHEM, UCL-ASTR, MRAC), les connaissances sur le rôle des océans entourant l'Antarctique comme puits de carbone ont pu être sérieusement enrichies.

### 3.3.5 L'importance de la pompe chimique

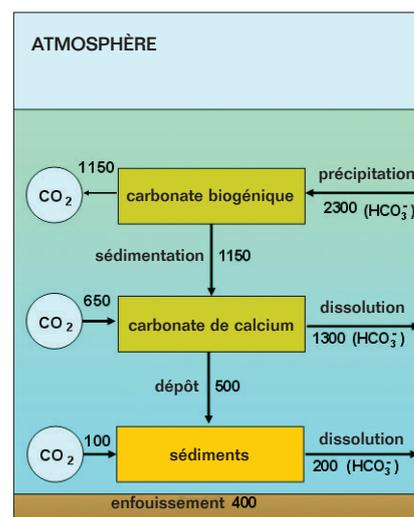
Jusqu'à présent, contrairement au cycle du carbone organique, le cycle du carbone inorganique n'avait que peu retenu l'attention de la recherche. Et pourtant, le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) joue un rôle important dans le cycle global du carbone. En effet, les roches calcaires des continents sont soumises à l'érosion et à la dissolution par l'eau de pluie, qui se charge en ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et en ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Ces composés atteignent finalement les mers et les océans avec, au niveau mondial, un apport total égal à 390 Mt de carbone par an. Pour maintenir la composition chimique de l'océan, une moitié de ce carbone doit être précipitée sous forme de  $\text{CaCO}_3$  et l'autre moitié doit être envoyée dans l'atmosphère sous forme de  $\text{CO}_2$ .

Les coccolithophores sont un important groupe d'algues qui produisent un squelette calcaire. Il s'agit, par exemple, de l'espèce dominante dans le golfe de Gascogne. Par  $\text{m}^2$  de surface, ces algues peuvent transformer en  $\text{CaCO}_3$  jusqu'à 100 g de carbone par an. Toutefois, seule une petite partie du carbone se dépose sur le fond marin et y est enfouie, la plus grande partie étant à nouveau dissoute en ions calcium et bicarbonate.

- Les récifs coralliens sont les principaux producteurs de carbonate de calcium. La fixation du carbone y est évaluée à 100 millions de tonne de carbone par an.

- Mais ils sont construits par des algues présentant un métabolisme du carbone relativement actif, de telle sorte qu'il est souvent difficile de calculer leur effet net sur le bilan du  $\text{CO}_2$ . Selon des recherches effectuées par l'ULg-OCEANCHEM, les récifs coralliens sont plutôt une source de  $\text{CO}_2$ , qui serait encore renforcée en cas d'augmentation de la concentration du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. C'est uniquement dans un environnement eutrophe (riche en nutriments) que les coraux agissent comme un puits de carbone.

La figure ci-dessous donne un bilan provisoire des flux liés à la pompe chimique au niveau mondial. La précipitation de carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) dans l'eau superficielle et sa redissolution dans les couches d'eau profondes ou sa sédimentation sur le sol forment une pompe de carbone efficace, qui, comme la pompe biologique, est responsable d'un flux vertical du carbone.



Cycle global provisoire du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) dans le système marin (tous les flux sont indiqués en millions de tonnes de carbone -C- par an). (R. Wollast, ULB-OCEAN).

On peut conclure de cette figure que les océans ne sont pas, à l'heure actuelle,

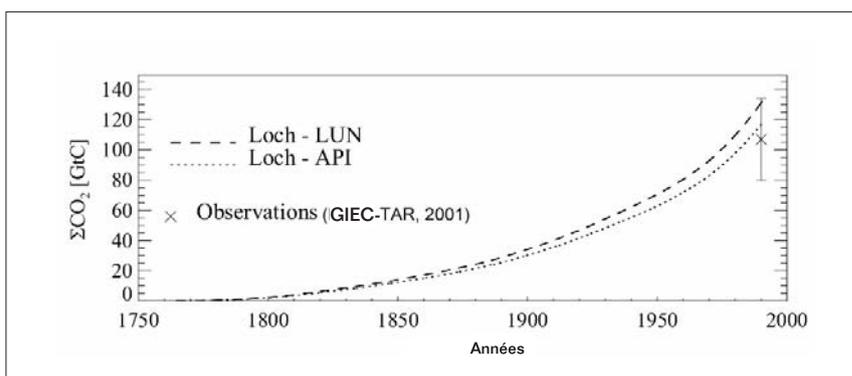
un système en équilibre: par rapport à la quantité de carbonate amenée par les cours d'eau un surplus de carbonate y est précipité. Néanmoins, la formation excédentaire de ce carbonate ne constitue pas un puits de carbone supplémentaire pour le  $\text{CO}_2$ , étant donné que la précipitation d'une molécule de carbonate s'accompagne de la formation d'une molécule de  $\text{CO}_2$ . Il existe encore de nombreux paramètres inconnus dans le cycle du carbonate océanique et, au sein de la communauté belge de la recherche, diverses initiatives tentent d'élucider ces questions.

### 3.3.6 L'utilisation de modèles

Comme exposé plus haut, les océans absorbent de nos jours des quantités considérables de carbone. Pour évaluer plus précisément l'impact des activités humaines dans ce phénomène, les chercheurs élaborent des modèles pouvant également effectuer des prévisions.

- Depuis un certain temps déjà, les chercheurs belges sont impliqués dans le développement de modèles décrivant les échanges entre l'atmosphère et l'hydrosphère. Ce travail est non seulement important pour le calcul des flux, mais également pour pouvoir prédire l'évolution future de l'ensemble du cycle du carbone.
- LOCH, un modèle développé par l'ULg-LPAP, est, par exemple, un modèle tridimensionnel de transport-réaction permettant de calculer toute une série de paramètres dans les océans: la quantité totale de carbone organique et inorganique, l'alcalinité, la teneur en phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ),

- en silice ( $\text{SiO}_2$ ) et en oxygène ( $\text{O}_2$ ). Les principaux processus pris en compte par le modèle sont l'échange gazeux entre l'atmosphère et l'eau de mer ainsi que les processus physiques, chimiques et biologiques entraînant la migration du carbone vers les couches profondes.
- LOCH fonctionne au sein de modèles décrivant la circulation générale dans les océans et permet notamment d'évaluer la quantité de carbone absorbée depuis 1765 (cf. figure ci-dessous). En plus, il semble que l'échange total de carbone entre les océans et l'atmosphère soit en réalité un multiple des 2,000 Mt absorbées annuellement par l'océan.



Quantité de carbone (C) absorbée par les océans depuis 1765 selon différents modèles numériques. Ceux-ci tiennent compte de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique. (ULg-LPAP).

## 3.4 L'importance des nutriments

### 3.4.1 La lumière seule ne suffit pas

Les organismes photosynthétiques n'ont pas seulement besoin de lumière, ils ont également besoin de nutriments. Les nutriments principaux sont l'azote (N) et le phosphore (P), mais des éléments-trace comme le fer (Fe) et le zinc (Zn) sont également nécessaires. De plus, certains organismes comme les diatomées ont besoin de silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ) pour former leur squelette. Si ces nutriments ne sont pas

## Le rôle des océans au sein du *global change*

présents en suffisance, la production primaire sera arrêtée. C'est pourquoi la disponibilité de ces éléments dans l'environnement marin joue un rôle important dans le fonctionnement des océans en tant que puits de carbone.

### 3.4.2 L'azote

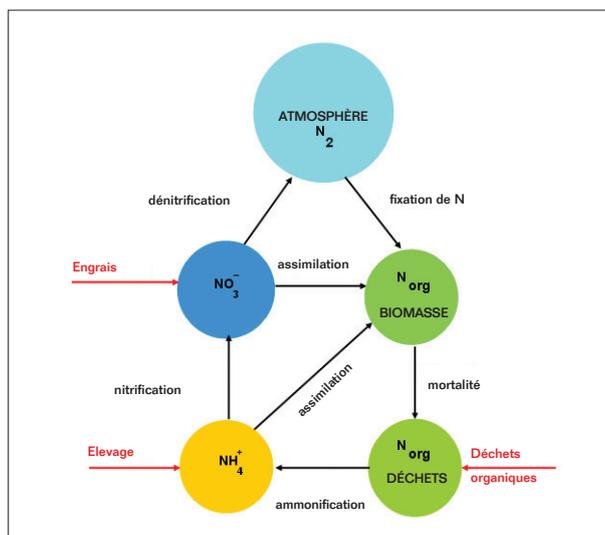
#### Cours d'eau pollués

Sous forme de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), l'azote (N) est souvent considéré comme le principal agent limitant dans la plupart des systèmes marins, c'est pourquoi on lui a accordé plus d'attention qu'aux autres nutriments.

Le cycle de l'azote est relativement complexe (voir figure ci-dessous). Dans l'eau, l'azote est présent sous forme d'azote gazeux dissous ( $\text{N}_2$ ), mais, sous cette forme, il n'est que très difficilement utilisable par le phytoplancton. Par contre, le phytoplancton peut absorber l'azote sous forme de nitrates et l'utiliser pour la production de biomasse. Lorsque cette biomasse est à nouveau décomposée, l'azote est libéré dans l'eau sous forme d'ammonium. Ce dernier peut facilement être absorbé par le phytoplancton. Il peut, de plus, être transformé en nitrate par des bactéries (nitrification). En

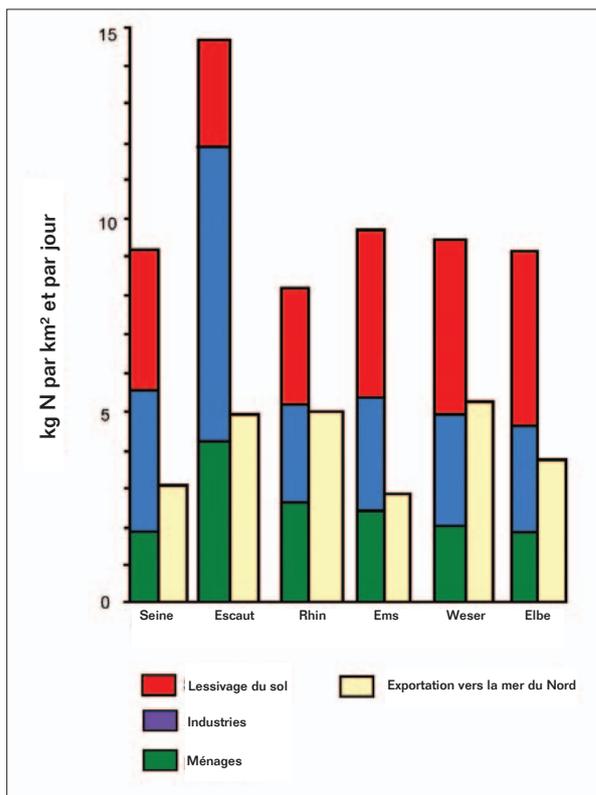
l'absence d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), les bactéries peuvent également retransformer le nitrate en azote gazeux (dénitrification).

Les activités de l'homme ont une influence considérable sur le cycle de l'azote. Des composés azotés se retrouvent de façon massive dans les cours d'eau, notamment à cause d'un excédent d'engrais et du déversement des eaux résiduaires (industrielles et ménagères). Mais les cours d'eau sont loin d'être les seules sources d'azote pour les zones côtières.



Représentation schématique du cycle de l'azote (N) dans les cours d'eau et l'environnement marin.

Le cycle de l'azote dans l'hydrosphère a été étudié par UA-MiTAC, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN et VUB-ANCH. Les résultats indiquent que la concentration en composés azotés dans les cours d'eau européens est de dix à cent fois supérieure à celle des cours d'eau non pollués. Cet excédent entraîne une prolifération des algues, un processus également appelé eutrophisation. Mais, il est étonnant que seule la moitié de l'excès en azote atteint en fin de compte la mer du Nord. Ceci signifie qu'une partie est "digérée" en chemin, d'une part par les bactéries anaérobiques qui convertissent les composés azotés en gaz azotés et d'autre part par les précipitations des composés azotés au fond des rivières (cf. figure à la page suivante). Selon une étude de l'ULB-GMMA, l'épuration conventionnelle des eaux résiduaires serait responsable d'une diminution de la dénitrification des cours d'eau. L'épuration entraîne, en effet, une diminution de la charge organique totale, de telle sorte que la colonne d'eau et les sédiments restent aérobies. Ce phénomène est même renforcé par la gestion actuelle des cours d'eau, qui favorise une augmentation de la vitesse



Evaluation de l'apport d'azote (N) via l'agriculture, l'industrie et les activités ménagères dans les principaux cours d'eau se jetant dans la mer du Nord. (ULB-GMMA).

- du courant et une meilleure aération de la colonne d'eau. Les investissements importants consentis pour l'épuration conventionnelle et la gestion des cours d'eau auraient donc plutôt pour effet paradoxal un accroissement de l'apport d'azote vers la mer.
- Dans une autre étude, l'ULB-ESA a montré que la mise en œuvre du traitement tertiaire des eaux usées (c'est-à-dire l'élimination de l'azote et du phosphore des eaux résiduaires) serait insuffisant pour lutter contre l'eutrophisation croissante des zones côtières de la baie sud de la mer du Nord, si l'on ne diminue pas en même temps l'apport d'azote d'origine agricole.
- L'ULB-GMMA et de l'ULB-OCEAN ont également étudié les processus influençant le cycle de l'azote dans les

- sédiments. Ils ont développé des modèles prévisionnels décrivant le recyclage de l'azote organique et les flux des différents composés azotés ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{N}_2$ ). Ces modèles montrent que le recyclage rapide de l'azote à partir des sédiments constitue une cause importante de la productivité élevée du plateau continental.

### Couches profondes

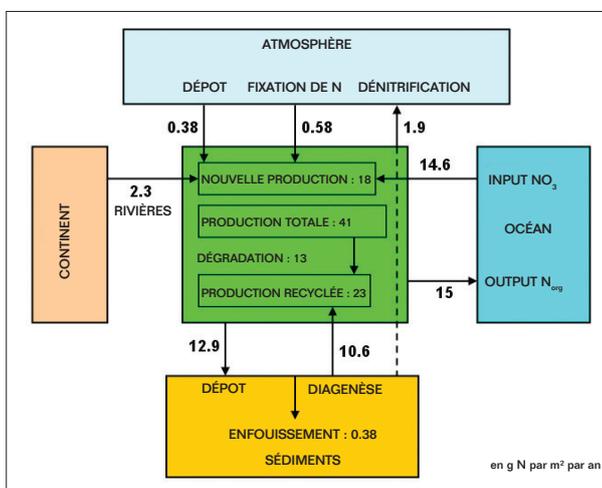
Au cours des années 1960-1970, on considérait que la source principale de nutriments dans les zones côtières était l'apport par les cours d'eau. Des études récentes démontrent néanmoins l'importance de la remontée des couches d'eau profondes, riches en nutriments, le long du plateau continental. L'importance exacte de cet apport n'était pas claire jusqu'il y a peu. Des chercheurs belges ont été parmi les premiers à effectuer des expériences à ce sujet.

- ULB-OCEAN, ULg-OCEANCHEM et VUB-ANCH ont étudié la remontée des couches profondes et son influence sur le cycle du carbone dans le golfe de Gascogne. Les résultats indiquent que le mélange vertical des couches d'eau intermédiaires assure une production de carbone organique atteignant jusqu'à 200 g de carbone par  $\text{m}^2$  et par année. Ceci correspond à plus du double de la production mesurée dans les stations de mesure océaniques les plus proches, où cette remontée n'a pas lieu. De plus, les chercheurs ont montré que la présence de cette eau riche en nutriments ne se limite pas au golfe de Gascogne, en effet, les courants entraînent cette eau dans la Manche, jusque dans la baie sud de la mer du Nord. Les couches profondes de l'océan Atlantique formeraient ainsi la source principale de nutriments azotés pour toute cette zone, source plus

## Le rôle des océans au sein du *global change*

- importante que les cours d'eau se jetant
- dans la mer du Nord.

La figure suivante donne une évaluation provisoire des flux d'azote dans les zones côtières du monde entier. Cette évaluation a été faite sur la base de données de mesure et de modèles développés par l'UA-MiTAC, l'ULB-GMMA, l'ULB-ESA, l'ULB-OCEAN et la VUB-ANCH. On y remarque le rôle du recyclage de l'azote, de même que celui du flux d'azote provenant des couches profondes. Les nutriments exportés doivent être remplacés dans l'eau superficielle, soit par le mélange vertical dans la colonne d'eau, soit par l'apport des cours d'eau et de l'atmosphère. La production associée à ces nutriments non recyclés est également appelée production nouvelle. La contribution des cours d'eau est relativement faible: 15% de la production nouvelle.



Flux moyen global de l'azote (N) dans les zones côtières. (UA-MiTAC, ULB-GMMA, ULB-ESA, ULB-OCEAN et VUB-ANCH).

### 3.4.3 Le phosphore

Sous forme de phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), le phosphore (P) est un deuxième nutriment important pour le phytoplancton. Dans la plupart des systèmes marins, il y a suffisamment de phosphore disponible. Il est rare que cet élément soit totalement absent de la colonne d'eau.

Proportionnellement, l'apport de phosphore anthropogène dans l'hydrosphère est moins important que celui de l'azote. Depuis l'apparition sur le marché des poudres à lessiver 'sans phosphate', le déversement de phosphore dans les eaux de surface a même sérieusement diminué. C'est pourquoi le phosphore peut devenir un élément limitant la croissance dans certains bassins fluviaux. Dans ces environnements, le recyclage du phosphore constitue un facteur important pour la production primaire du carbone organique.

- ULB-OCEAN, ULB-ESA et VUB-ANCH,
- entre autres, ont étudié la dynamique
- du phosphore dans la baie sud de la mer
- du Nord. Ils cherchent à comprendre
- quels sont les organismes impliqués
- dans l'assimilation et le recyclage du
- phosphore. Les résultats préliminaires
- semblent indiquer que, dans les zones
- côtières, ce sont les bactéries qui sont les
- principaux consommateurs de phosphate
- dissous.

### 3.4.4 La silice

Les activités humaines contribuent fortement à l'augmentation des nutriments (principalement l'azote et le phosphore) qui sont transportés vers la mer du Nord par les cours d'eau. Cette augmentation entraîne l'eutrophisation de l'eau au niveau des côtes belges.

La silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ) est néanmoins un nutriment important pour certains micro-organismes, comme les diatomées: celles-ci ont besoin de silice pour former leur squelette.

L'intervention de l'homme dans le cycle hydrologique, par exemple par la construction de barrages ou d'écluses, a entraîné une augmentation de la rétention de la silice dans les lacs, les réservoirs et les cours d'eau. Cette augmentation a entraîné à son tour une carence relative en silice par rapport à la teneur

en nitrates et phosphates. La composition du phytoplancton peut ainsi se modifier et modifier par conséquent l'ensemble de la chaîne alimentaire des zones côtières marines.

- Dans le cadre du projet SISCO ("Rétention de la silice dans le continuum de l'Escaut et impact sur l'eutrophisation des eaux côtières"), l'ULB-OCEAN et l'UGent-PAE étudient le flux de la silice dans l'Escaut et son impact sur l'eutrophisation de l'eau de mer au niveau des zones côtières.
- Chaque année, au printemps, on assiste à une croissance explosive des algues (colonies de *Phaeocystis*) dans l'eau de la baie sud de la mer du Nord, une conséquence de l'apport d'azote et de phosphore entraînés par les cours d'eau. Selon les chercheurs de l'ULB-ESA, ces colonies présentent une forte résistance par rapport aux prédateurs traditionnels du phytoplancton et ont un impact négatif sur l'écosystème marin et l'environnement. Dans un environnement marin équilibré, sans apport de nutriments azotés et phosphorés et avec suffisamment de silice, le développement des colonies de *Phaeocystis* est limité par l'efflorescence précoce des diatomées. L'ULB-ESA a développé un modèle biologique complexe (MIRO&CO) permettant de calculer le moment d'apparition, la taille et la distribution géographique de l'efflorescence des diatomées et des *Phaeocystis* en partant de la synergie entre le climat et les activités humaines.

### 3.4.5 Le fer

On a montré récemment que le fer (Fe) pourrait être un facteur limitant la production de matière organique par le phytoplancton. Ceci est plus particulièrement le cas dans l'océan Austral entourant l'Antarctique. Cette découverte a

donné lieu à plusieurs expériences à grande échelle, dans lesquelles l'océan est "enrichi" avec du fer. Des chercheurs belges ont été impliqués dans une de ces expériences, montrée dans le paragraphe suivant.

## 3.5 Donner un coup de main aux océans

### 3.5.1 Enrichir ou injecter

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est le principal gaz à effet de serre (cf. Chapitres 2 et 3). Selon les estimations, il contribue pour deux tiers au processus du changement du climat. La cause principale de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est la combustion des combustibles fossiles par l'homme. Une possibilité de réduction du rejet est de passer à des sources d'énergie alternatives, ne générant pas de gaz à effet de serre. Une deuxième alternative est de faire absorber les gaz à effet de serre rejetés par ce que l'on appelle des puits de carbone ou réservoirs. Selon les évaluations, les océans contiennent déjà 40.000 milliards de tonnes de carbone: 50 fois plus que ce qui est stocké dans l'atmosphère. Ces seuls chiffres montrent clairement que l'hydrosphère semble représenter l'endroit de stockage idéal et potentiel pour l'excédent de CO<sub>2</sub>.

Les scientifiques analysent comment accélérer l'absorption de carbone par les océans. Ils envisagent pour ce faire deux techniques: enrichir les couches supérieures des océans avec des nutriments ou injecter directement le CO<sub>2</sub> dans les couches profondes.

L'étude de ces processus est fortement soutenue par toute une série de pays comme les États-Unis, le Japon et la Norvège. Ces pays financent des expériences à grande échelle, des brevets pour le développement et l'exploitation de ces technologies ayant même déjà été déposés, ce qui montre clairement les énormes intérêts économiques en jeu.

## Le rôle des océans au sein du *global change*

D'autres chercheurs voient toutefois ces expériences d'un autre œil. Ils considèrent que les risques potentiels ont été insuffisamment évalués par rapport aux avantages et constatent l'absence de dialogue quant à la détermination de critères d'évaluation scientifiques sérieux.

### 3.5.2 L'efficacité de l'enrichissement

#### La théorie

Une augmentation de la production primaire de matériau organique à la surface des océans devrait entraîner une absorption plus élevée du carbone atmosphérique. L'idée de base est que le matériau organique migre ensuite vers les couches profondes et y soit décomposé, le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) libéré étant ainsi stocké sous forme dissoute pour des dizaines, voire des milliers d'années. Selon les partisans de cette voie, un avantage supplémentaire serait le fait qu'une concentration plus élevée de carbone organique stimulerait la chaîne alimentaire, ce qui, en finale, devrait avoir un impact positif sur la production halieutique.

#### L'expérience

Que ce soit dans l'océan Austral ou dans le Pacifique à la hauteur de l'équateur, la production de phytoplancton y est entravée par un manque de fer, alors qu'il y a suffisamment d'azote et de phosphore dans l'eau. C'est pourquoi les chercheurs ont choisi ces deux zones pour effectuer quatre expériences à grande échelle sur l'enrichissement en fer.

#### Les résultats

Il ressort des expériences que la production de phytoplancton augmente fortement après l'enrichissement en fer. Mais tous les scientifiques ne sont pas convaincus. Pour certains, cette augmentation n'est que provisoire: les prédateurs du phytoplancton ne se sont pas encore adaptés à la nouvelle situation. Ils observent également que la

migration vers les couches intermédiaires ne concerne qu'une petite quantité de carbone, ce qui fait que l'absorption plus élevée de carbone juste après l'enrichissement en fer formerait un puits de carbone pour quelques années seulement.

Même si une plus grande quantité de carbone migrait vers les couches profondes, il faut encore tenir compte des risques liés à d'éventuels effets secondaires. L'apport accru de carbone pourrait en effet mener à une augmentation de la respiration, ce qui entraînerait rapidement l'apparition d'un manque d'oxygène dans les couches profondes et pourrait finalement conduire à la formation d'un gaz toxique, le sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ou même à la formation de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et d'oxyde d'azote ( $\text{NO}_x$ ), deux gaz à effet de serre nettement plus actifs que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )!

Etant donné le grand nombre d'incertitudes liées à un enrichissement à grande échelle des océans, de nombreux scientifiques souhaitent un consensus sur des critères d'évaluation scientifiques. Malheureusement, à l'heure actuelle, ils doivent constater l'absence de toute discussion approfondie sur ce sujet.

### 3.5.3 L'efficacité de l'injection

Cette technique consiste à introduire du dioxyde de carbone sous forme pratiquement pure dans les océans. Afin d'éviter que le gaz ne revienne trop rapidement dans l'atmosphère, il serait injecté dans l'océan à grande profondeur (> 1.000m), ce qui assurerait un stockage pour des milliers d'années. La technique équivaldrait en fait à accélérer les mécanismes naturels, au cours desquels le carbone est absorbé dans les couches superficielles et migre (toutefois très lentement) vers les couches profondes.

Jusqu'à présent, diverses techniques d'injection du  $\text{CO}_2$  dans les couches d'eau plus profondes ont été proposées. Toutefois,



les risques possibles pour l'écosystème sont encore pour la plupart inconnus. Les scientifiques craignent en premier lieu une acidification locale de l'eau. Le degré d'acidité de l'eau pourrait atteindre un pH de 4, ce qui représenterait certainement une menace pour les écosystèmes locaux. Il faut cependant tenir compte du fait que la biomasse de matériau vivant dans les océans à une profondeur de plus de 1.000 mètres est relativement limitée.

Déterminer si l'injection massive de CO<sub>2</sub> dans les couches profondes représente une option pour atténuer le changement climatique semble dépendre en premier lieu de critères sociaux et politiques. Compte tenu du principe de précaution par rapport aux écosystèmes océaniques, l'implémentation de cette stratégie ne sera apparemment possible que lorsque toutes les parties (publiques et privées) auront pu participer au débat.

## 4 Le *global change* dans les systèmes biologiques



### 4.1. L'érosion de la biodiversité

Depuis ses tous premiers balbutiements, voici 3,8 milliards d'années, la vie sur Terre subit d'innombrables mutations. Les périodes d'extrême diversification de la vie biologique ont alterné avec des périodes d'extinction massive. Les biologistes estiment qu'il y a eu, jusqu'à ce jour, cinq épisodes d'extinction massive des espèces. De même, nous sommes aujourd'hui dans une ère où les espèces s'éteignent en grand nombre: selon les estimations, 137 espèces animales disparaîtraient chaque jour. À ce rythme-là, la moitié environ des espèces actuelles auront disparu dans 100 ans. C'est pourquoi la période actuelle est qualifiée de sixième vague d'extinction massive. La différence avec les autres vagues d'extinction est que la disparition des espèces se produit avec une rapidité bien supérieure à celle des vagues d'extinction précédentes, et que les causes ne sont pas toujours naturelles.

#### 4.1.1 Les effets de la diversité sur le fonctionnement des écosystèmes

Afin de mettre le holà à la dégradation de la biodiversité, de plus en plus d'efforts sont consentis pour protéger les systèmes biotiques contre la disparition des espèces, des habitats et des écosystèmes. L'intérêt croissant pour cette problématique s'est traduit notamment par la conclusion de la Convention sur la diversité biologique (UN Convention on Biological Diversity, CBD). Cet accord a redynamisé les projets de recherche axés sur l'extinction des espèces, ses implications sur la biodiversité et ses effets sur le fonctionnement des écosystèmes. Depuis, les études de terrain, et plus encore les modélisations, ont été centrées sur la relation entre la réduction de la diversité et la stabilité du fonctionnement des écosystèmes. Les résultats ne sont pas toujours indiscutables et peuvent même être contradictoires, mais globalement, ils démontrent néanmoins qu'une réduction de la biodiversité a des conséquences directes sur le fonctionnement des écosystèmes (cf. Encadré 11).

## Encadré 11: Biodiversité et stabilité

Biodiversité = diversité taxonomique +  
équilibre entre les espèces

Quoique l'on confonde souvent diversité taxonomique et biodiversité, il existe une différence. La biodiversité dépend non seulement de la diversité taxonomique (richness), mais aussi de l'équilibre entre les espèces (evenness). Dans leur zone de répartition géographique naturelle, leur aire de distribution, toutes les espèces sont présentes en certains nombres. C'est ce que l'on appelle l'abondance d'une espèce. Au sein d'un habitat, le nombre d'espèces et l'abondance maximale de chacune sont limités par les ressources présentes en quantité restreinte. Lorsqu'un même milieu ou habitat naturel héberge diverses espèces possédant chacune leur propre abondance, on parle de hiérarchie de dominance. Au sein de cette hiérarchie, les rapports s'organisent entre les abondances des diverses espèces. Nous parlons donc d'espèces dominantes et sous-dominantes présentes en nombre limité. Un exemple:

- ✓ Lorsque l'abondance des diverses espèces est plus ou moins identique et que le nombre maximal d'espèces est donc réparti de manière équilibrée entre les diverses 'niches' d'un habitat, la diversité sera élevée.
- ✓ Par contre, si l'abondance des diverses espèces n'est pas identique et qu'une seule espèce est présente en grande abondance, cette espèce va alors occuper un grand nombre de niches qui, par conséquent, ne pourront être habitées par d'autres espèces. Ceci réduira donc le nombre d'espèces dans l'habitat et la diversité sera donc moindre. Lorsqu'une seule espèce occupe pratiquement toutes les niches et que les autres espèces sont présentes en nombre très limité, on parle de 'monoculture'. Beaucoup de nos systèmes agraires actuels sont des exemples de monocultures.

Stabilité = résistance + résilience

La 'stabilité' exprime dans quelle mesure un écosystème ou une communauté est à même de surmonter les situations de stress et les perturbations. Le 'stress' englobe tous les facteurs anthropogènes et naturels ayant un impact négatif sur la croissance. Nous pensons par exemple à une pénurie de nutriments ou de lumière, à des températures sous-optimales... Les perturbations désignent tous les processus et facteurs mécaniques et non mécaniques réduisant la biomasse. Pour les plantes, il peut s'agir des herbivores et des agents pathogènes.

La stabilité d'un écosystème est déterminée par deux facteurs: la résistance, à savoir le degré de déviation par rapport à la situation de départ, et la résilience, à savoir le temps nécessaire pour revenir à la situation de départ.

Diversité  $\approx$  Stabilité

La relation entre la diversité et la stabilité d'un écosystème est exprimée par l'hypothèse 'diversité - stabilité'. Quoiqu'il ait été démontré qu'il ne s'agit pas simplement d'une relation de cause à effet, ces deux aspects sont fortement interdépendants. Les communautés et écosystèmes à diversité élevée peuvent répartir les effets des perturbations et des situations de stress entre différentes espèces, faisant ainsi tampon pour protéger la communauté de l'extinction. D'autre part, un système stable permet aux espèces délicates de se maintenir, elles aussi, ce qui augmente le nombre d'espèces et donc la diversité de l'écosystème. En d'autres termes, il existe également une rétroaction entre les systèmes stables et la biodiversité. La clarté n'a pas encore été complètement faite sur la relation de cause à effet entre la diversité et la stabilité, mais il est certain que ces deux composantes s'influencent mutuellement sur différents plans.

## Le global change dans les systèmes biologiques

En outre, la perte de biodiversité aurait des effets indirects sur la manière dont les écosystèmes réagissent à d'autres changements planétaires, d'ordre climatologique. Ainsi, il a été démontré lors de simulations de vagues de chaleur naturelles que la stabilité du fonctionnement des écosystèmes dépend de la diversité des espèces présentes. Selon les prévisions des Modèles de circulation générale (General Circulation Models, GCMs), de telles vagues de chaleur vont devenir plus fréquentes, tout comme d'autres manifestations météorologiques extrêmes telles que les inondations, les tempêtes tropicales, etc. (cf. Chapitre 3).

- Les chercheurs de l'UA-PLECO et de la UGent-PP ont recouru à des modèles d'écosystèmes artificiels (cultures d'herbacées) pour étudier les effets de la diversité taxonomique sur la survie après des épisodes de températures extrêmes. Les modèles climatiques prévoient une multiplication de ces extrêmes climatologiques. Assez étonnamment, les expériences montrent que les systèmes moins diversifiés ne sont pas nécessairement moins bien armés contre les événements extrêmes. Cela signifie néanmoins que les mesures freinant les changements climatiques protégeront surtout les systèmes divers, précisément en limitant la réduction de la biodiversité.
- D'autres expériences visant à étudier les effets de la diversité dans une communauté végétale sont venues étayer l'hypothèse de la complémentarité des espèces. Selon cette hypothèse généralement acceptée, les différences interspécifiques et le traitement préférentiel de certaines espèces permettent une exploitation plus efficace des diverses ressources

- d'un écosystème. La grande variété des espèces empêche la disparition des ressources du système. Une réduction de la diversité des espèces entraîne donc un appauvrissement de l'écosystème dans son ensemble.

### 4.1.2 Effets de la gestion sur la diversité

En Belgique, les écosystèmes (contrôlés) les plus importants sur le plan quantitatif sont les prairies: ils couvrent 50% des surfaces agricoles et 30% de la superficie totale. En comparaison, les forêts et friches ne recouvrent que 12% du territoire belge. Cette position dominante des prairies découle de leur avantage économique. Mais les prairies ont également une valeur écologique. Vu leur caractère permanent, elles fournissent un habitat à un grand nombre d'espèces végétales. En outre, leur gestion ne nécessite pas l'emploi de moyens antiparasitaires. Seul le fumage peut poser un problème écologique si l'apport d'éléments nutritifs est trop important.

Les prairies sont dominantes dans le paysage belge où elles sont permanentes. Elles sont ainsi source importante de diversité botanique. La biodiversité peut être maintenue ou maximisée par une gestion correcte.

- Les effets des diverses méthodes de gestion des prairies sur la diversité - 3, 4, 5 ou 6 fauchages par an et 100, 250 ou 400 kg d'azote (N) par ha par an - ont fait l'objet d'une étude expérimentale. Cette étude a permis de conclure que c'est en combinant une fréquence de fauchage élevée (6 fauchages par an) à un épandage d'azote peu important (100 kg par ha par an) que l'on obtient la plus grande biodiversité dans les prairies. Le faible apport d'éléments nutritifs et leur évacuation continue lors des fauchages permet aux espèces compétitives

- comme aux espèces moins compétitives
- de s'installer. Par conséquent, il serait possible d'augmenter le nombre total d'espèces dans les écosystèmes des prairies belges en passant d'une stratégie d'exploitation intensive à une stratégie extensive (pour ce qui est de l'apport d'éléments nutritifs).

#### 4.1.3 Prévoir et prévenir l'extinction d'une espèce

Le terme *global change* recouvre toutes les modifications physiques et biologiques à l'échelle mondiale, mais aussi les changements induits par l'homme. Les changements naturels sont généralement progressifs et relativement constants dans le temps et les influencer est, de plus, pratiquement impossible. Les changements anthropiques, quant à eux, se produisent en général très rapidement et à une échelle locale. Ils peuvent toutefois acquérir un caractère mondial par leur généralisation sur terre. Contrairement aux changements naturels, cet impact de l'homme sur les systèmes biologiques peut toutefois être réduit, surtout à l'échelle locale.

L'élaboration de modèles analytiques simulant le fonctionnement des écosystèmes ou des populations permet de tenir compte de cet impact humain, et donc d'en prédire les effets à long terme.

Le morcellement des habitats est un exemple de composante très locale et anthropique du *global change*. L'anéantissement et l'éparpillement des habitats résiduels sont des processus lourds de conséquences pour les populations et les espèces. Les effets de cet élément anthropique peuvent être prédits au moyen de modèles, et le cours des choses peut facilement être corrigé au niveau local.

- À ce propos, l'UCL-ECOL a élaboré
- l'analyse de la viabilité des populations.

- Cette analyse permet d'anticiper les réactions des populations de Damiers de la Succise à divers scénarios. Ce papillon se rencontre essentiellement dans les marais (tourbeux), comme dans la vallée de la Lienne (Lierneux). Dans cette zone, on a voulu introduire des bœufs comme mesure de régulation. Sur la base des prévisions réalisées dans le cadre de l'analyse de la viabilité des populations, cette introduction a été confinée à des endroits précis, ce qui a permis d'empêcher que la végétation des renouées ne soit consommée dans son entièreté. Etant donné que la renouée est un maillon essentiel du cycle de vie du Damier de la Succise, sa disparition aurait des conséquences désastreuses pour cette population de papillons (cf. figure suivante).

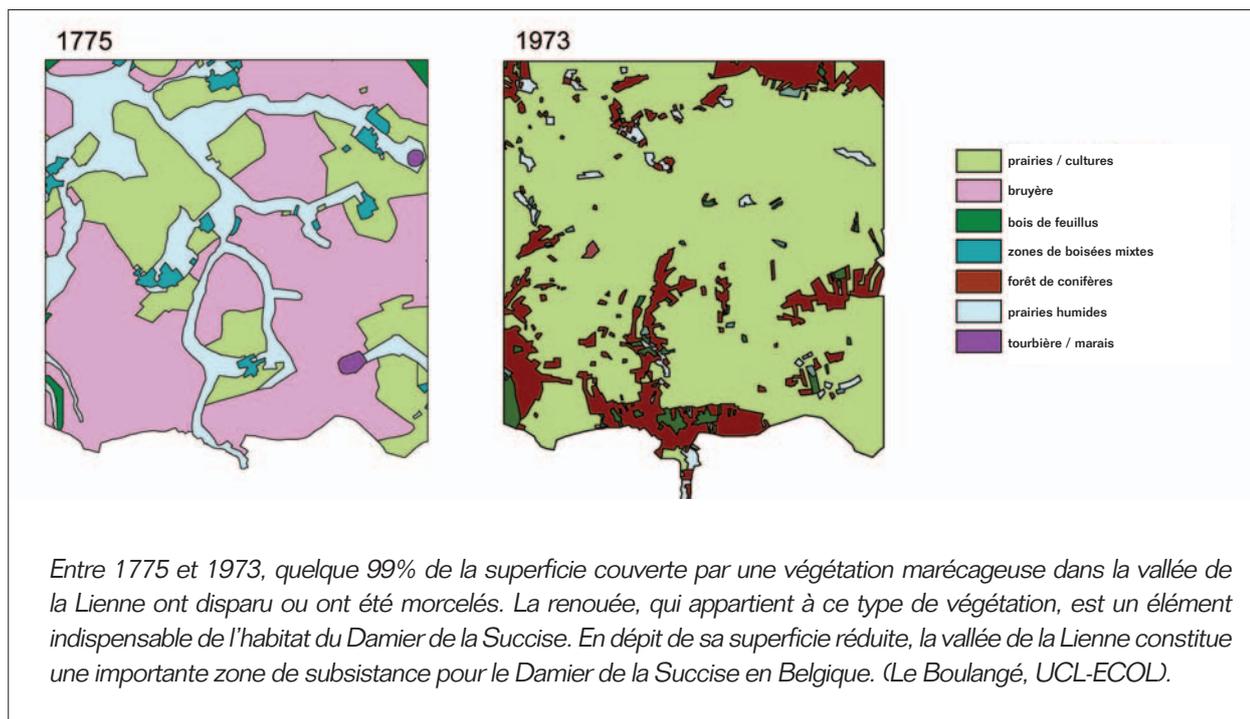
Les modèles et analyses telles que l'analyse de la viabilité des populations donnent aux chercheurs et aux gestionnaires l'occasion de réagir avant qu'il ne soit trop tard. L'une des étapes ultérieures du processus est l'élaboration de modèles adaptés aux différents types de sites, de régions et de groupes d'espèces. Les gestionnaires disposeront ainsi d'un instrument leur permettant d'évaluer les effets des divers modes de gestion avant leur application.

## 4.2 Ecosystèmes et accumulation des gaz à effet de serre

### 4.2.1 Les puits de carbone du territoire belge

Les échanges de carbone entre l'atmosphère, les systèmes terrestres et le sol sont contrôlés par la photosynthèse et par la respiration de la végétation terrestre, ainsi que par la respiration des organismes du sol. Cependant, toutes les molécules de carbone ne participent pas à cette circulation: une partie d'entre elles s'accumule

## Le global change dans les systèmes biologiques



notamment dans les écosystèmes terrestres. La quantité de carbone accumulé dépend de la 'Productivité Nette des Ecosystèmes' (PNE). Quoique divers facteurs influencent les flux et l'accumulation de carbone, à l'échelle planétaire, la température et les précipitations sont, de loin, les facteurs les plus importants (cf. Encadré 12).

### Les modèles

Puisque les relations entre les stocks de carbone (biomasse vivante, production de bois et sol) et les flux de carbone (respiration hétérotrophe, coupe de bois) sont quantifiables, les forêts peuvent faire l'objet d'une modélisation d'après leur superficie, leur volume et l'augmentation annuelle par classe d'âge. Le "European Forest Information Scenario Model" (modèle EFISCEN) décrit ainsi 2.689 classes de forêts en Europe. Sur base de ces modèles et des données rassemblées lors d'études de terrain, il est possible de faire des prévisions concernant les caractéristiques des forêts européennes (cf. figure ci-dessous). Ces prévisions ont une importance capitale dans le cadre du protocole de Kyoto (articles 3.3 et

3.4) et des Conférences des Parties (CdP) concernées.

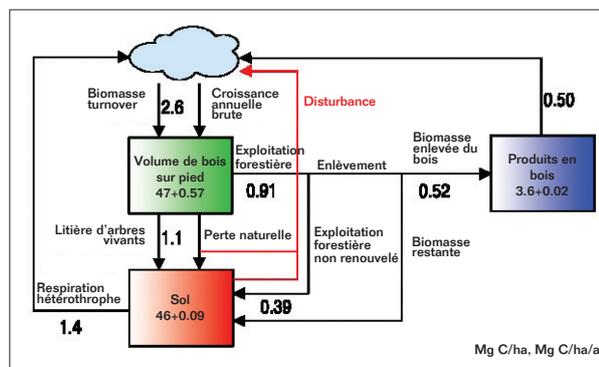
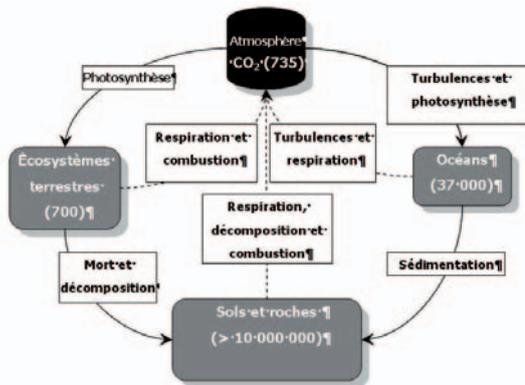


Schéma des rapports bilatéraux entre les stocks (biomasse vivante, bois et sol) et les flux de carbone (exploitation forestière et respiration hétérotrophe) d'après le modèle EFISCEN. (Pussinen et al, 2000).

La coupe et la production de bois font partie des mesures de gestion des flux et des puits de carbone. Dans le modèle EFISCEN, les mesures de gestion forestière sont classées en deux niveaux: la gestion de base, dont les éclaircies et les coupes, et le volume total d'abattage, spécifié par pays et par type d'espèce. Dans le modèle, ces mesures de

## Encadré 12: Les puits de carbone



La quantité de carbone (C) dans les compartiments est exprimée en unités de 10<sup>9</sup> tonnes (Gt) de carbone. (d'après IPCC, 1995b).

La séquestration du carbone désigne tous les processus par lesquels le carbone se combine de manière quasi permanente. Elle englobe l'assimilation de carbone par les écosystèmes terrestres, dans le sol et les roches, et par les océans. Dans ces puits de carbone, le carbone se présente sous diverses formes: sous forme de matière vivante dans tous les écosystèmes terrestres, sous forme de solution ou carbonate de calcium dans les océans et sous forme de litière et de roche dans le sol. Les plus grands puits sont, de loin, ceux des océans et des sols.

Le carbone présent dans l'atmosphère et contenu dans les organismes vivants est d'une importance quantitative moindre, mais entre dans le réservoir du carbone en circulation. Le système terrestre et le système atmosphérique s'échangent continuellement ce carbone par la photosynthèse et la respiration. La Productivité primaire nette (PPN) exprime le degré d'assimilation du carbone par la végétation, déduction faite de la part épuisée par le processus de respiration. Il ne s'agit pas du 'produit' final d'une végétation, puisqu'une fraction accessoire est toujours consommée par les organismes hétérotrophes. En déduisant cette fraction de la PPN, on obtient la Productivité nette des écosystèmes (PNE).

Quoique les roches et les minéraux soient des puits de carbone à caractère très statique, des changements s'y sont produits, principalement depuis la révolution industrielle. La combustion de combustibles fossiles (et de systèmes terrestres) y a entraîné un important déplacement de molécules de carbone vers l'atmosphère. Etant donné que ce carbone est libéré sous forme de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et que cette molécule est un gaz à effet de serre, le tout n'est pas sans conséquences pour le climat.

gestion sont envisagées au niveau national, de sorte que le pays constitue l'unité spatiale de base du modèle.

Par ailleurs, la quantité de carbone présente dans le sol est fonction de la vitesse de décomposition (elle-même déterminée par la biomasse aérienne et souterraine), du rapport entre les composants ligneux et non ligneux et de la concentration de lignine dans les feuilles. Ainsi, l'écart entre les quantités de carbone (C) présentes dans le sol des forêts de feuillus (120 ktonnes C par ha) et dans celui des forêts

de conifères (150 ktonnes C par ha) s'explique par le fait que la qualité de la litière influence la vitesse de décomposition.

- Les recherches menées par le VITO-TAP et l'UCL-GEOG sur les puits de carbone terrestres et les flux de carbone en Belgique ont montré que le réservoir de carbone du sol des forêts est en équilibre avec celui de la biomasse vivante (cf. tableau ci-dessous).
- Ces statistiques ont été établies d'après

## Le global change dans les systèmes biologiques

Stocks (Réserves) et flux de carbone des écosystèmes terrestres et sols belges. (F. Veroustraete, VITO-TAP et B. Van Wesemael, UCL-GEOG).

Stocks	Par unité de surface (tonne de C/ha)	Totaux pour la Belgique (ktonne de C)
Biomasse forestière	94.4	53,800
Sol (relevé pédologique national 1950-1970)		
Humus forestier	61.5	35,000
Sol (0-30 cm)	58 (10-190)	144,000
Sol (0-100 cm)	98 (18-986)	241,000
Flux	Par unité de surface (tonne de C/ha/an)	Totaux pour la Belgique (ktonne de C/an)
Végétation totale PNE	4.8	14,600
Accroissement de la biomasse forestière (PNE)	5.0	2,800
Coupe forestière	2.1	1,200
Sol résultant de la gestion	?	500-800

■ des données extraites des inventaires régionaux wallons et flamands des forêts. Les données relatives au carbone dans le sol sont basées sur 13.000 descriptions de profils de sol réalisées entre 1950 et 1970.

■ Ont également été analysées les données des projets CASTEC (Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems) et METAGE (Modelling Ecosystem Trace Emissions). Les résultats correspondent aux constatations faites dans la plupart des forêts européennes. Il faut préciser qu'en Belgique, la quantité de carbone (circulant ou non) pour une superficie donnée est supérieure à la moyenne européenne, une conséquence des conditions de température et de précipitations favorables dans notre pays.

■ Etant donné que dans notre pays, la quantité totale de carbone du sol (276.000 ktonnes C) dépasse largement celle de la biomasse des forêts (53.800 ktonnes C), il est clair que des changements dans le sol peuvent avoir de sérieuses conséquences sur le bilan national en matière de gaz à effet de serre. C'est pourquoi des recherches complémentaires sont nécessaires afin de

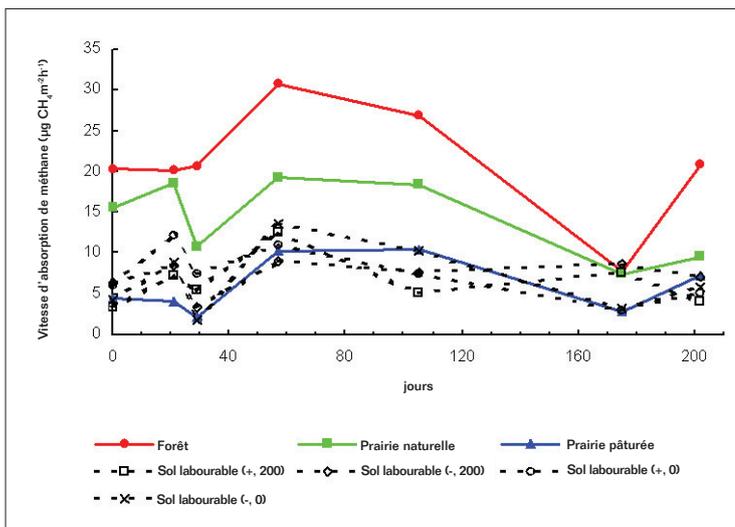
■ quantifier les variations éventuelles de ce réservoir dues à des modifications dans l'utilisation et la gestion des terres ainsi qu'à des changements climatiques.

### 4.2.2 Autres gaz affectant le climat et l'ozone

Diverses réactions biochimiques et géochimiques se produisant dans les écosystèmes terrestres contribuent à ce que des gaz tels que le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et d'autres oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) se forment ou soient extraits de l'atmosphère. Certains de ces gaz sont à effet de serre (cf. Chapitre 2), d'autres influencent la concentration d'ozone dans l'atmosphère (cf. Chapitre 1). C'est la raison pour laquelle il est important d'étudier attentivement les échanges de ces gaz entre les systèmes terrestres et l'atmosphère. Ainsi, les sols aérobies peuvent absorber jusqu'à 29.000 ktonnes  $\text{CH}_4$  par an, ce qui les place en tête des éléments évacuant le méthane vers le puits de carbone terrestre. Les sols agricoles, par contre, représentent la principale source de  $\text{NO}_2$  pour l'atmosphère, avec 60% des émissions globales de  $\text{NO}_2$ .

■ Les études – celles de l'UGent-ISOFYS  
■ notamment – font apparaître que la

- fonction d'absorption et de production de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{N}_2\text{O}$  par un sol aérobie dépend fortement du climat et du type de gestion réservé au sol (cf. figure ci-dessous). Mais en règle générale, on peut affirmer que la conversion d'un sol naturel en sol agricole diminue la capacité d'absorption du  $\text{CH}_4$  et augmente la production de  $\text{N}_2\text{O}$ .



Effet de l'utilisation du sol sur la capacité d'absorption du méthane ( $\text{CH}_4$ ) par les écosystèmes terrestres. Le signe '+' signifie apport d'engrais supplémentaire de 175 kg de nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) par ha et '200' un apport d'engrais de 200 kg d'azote (N) par ha sous forme de lisier. (P. Boeckx, UGent-ISOFYS).

- Des facteurs d'émission (FE) ont été définis pour le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et l'oxyde d'azote NO; ils sont applicables à l'agriculture belge. Les résultats de ces études indiquent (i) qu'il règne une grande incertitude à propos des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  et (ii) que les FE de  $\text{N}_2\text{O}$  des systèmes agricoles intensifs sont supérieurs aux FE de  $\text{N}_2\text{O}$  repris en 1996 dans les directives du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour l'inventaire des émissions des gaz à effet de serre.

### 4.2.3 Fluctuations annuelles

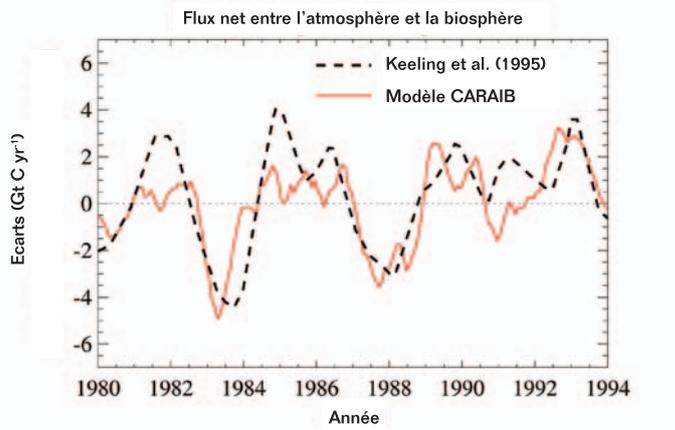
La séquestration du carbone dans un environnement naturel présente des fluctuations annuelles, tant au niveau planétaire que local. Ces variations dans l'absorption de carbone sont imputables aux conditions météorologiques. Certains de ces contextes météorologiques, toutefois, produisent également leurs effets à l'échelle planétaire, comme par exemple El Niño (cf. Chapitre 2). Il est extrêmement important de comprendre ces variations, puisque la participation d'un écosystème à la séquestration du carbone doit être déterminée sur une longue période (au moins 10 ans). En outre, ces variations annuelles, de par leur intervalle de temps limité, offrent une occasion unique de comparer les prévisions des modèles à la réaction réelle des écosystèmes.

- Il existe deux manières de calculer les variations du flux net de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'atmosphère vers la biosphère: en mesurant directement la quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère en divers points ou en s'appuyant sur des modèles biosphériques. Des mesurages de ce type ont été effectués par l'ULg-LPAP et exploités dans le cadre d'une étude comparative avec le modèle CARAIB. Cette comparaison, présentée dans la figure suivante, effectuée sur la période entre 1980 et 1993, nous apprend que l'absorption de  $\text{CO}_2$  par les écosystèmes terrestres se réduit pendant les périodes El Niño.

### 4.2.4 Émissions de carbone et assimilation par les forêts

La principale source anthropique de carbone atmosphérique est l'utilisation de combustibles fossiles. Mais la production de ciment contribue aussi, et de façon non négligeable, aux émissions actuelles de  $\text{CO}_2$ . Malgré une prise de conscience

## Le global change dans les systèmes biologiques



Flux net des échanges de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) entre l'atmosphère et la biosphère de 1980 à 1993, calculé d'après le modèle CARAIB (Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems), élaboré par ULg-LPAP, et reconstitué par Keeling et al. (1995) à partir de mesures des concentrations atmosphériques en  $\text{CO}_2$  et de la composition isotopique. Les valeurs mentionnées sont les écarts par rapport à la valeur moyenne de la période 1980-1993. (L. François, ULg-LPAP).

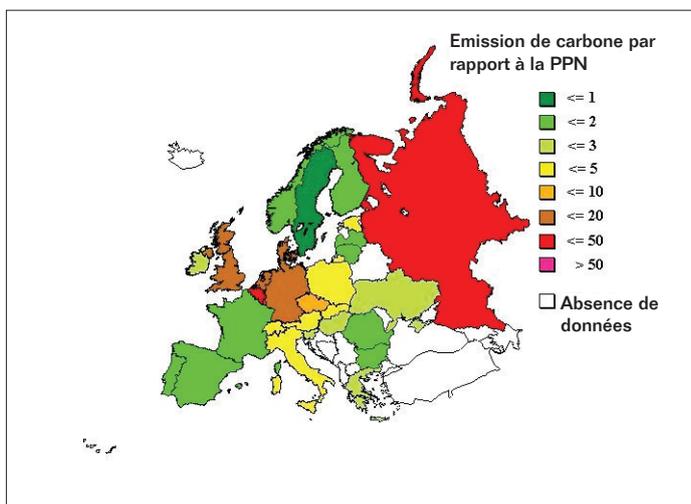
toujours plus aiguës des problèmes provoqués par l'effet de serre, ces émissions de  $\text{CO}_2$  continuent à augmenter. C'est ainsi que dans le cadre du "Special Report on Radiative Forcing" du GIEC (IPCC, 1995b), des émissions moyennes de 6.300 millions de tonnes (Mt) de C par an ont été calculées pour les années 1990-2000, contre 5.500 Mt de C par an pour les années 1980-1990.

Les systèmes naturels et les forêts peuvent jouer un rôle important dans la compensation de tous les excédents de  $\text{CO}_2$  émis. En effet, les forêts représentent un canal d'évacuation important du carbone de l'atmosphère: elles peuvent fixer pendant plusieurs siècles de grandes quantités de carbone sous forme de biomasse forestière et de litière dans et sur le sol.

Les forêts de divers types que l'on rencontre en Belgique possèdent également cette propriété de fixer le carbone. Elles aussi peuvent être mises à contribution comme fixatrices de carbone pour contrer l'augmentation des gaz à effet de serre. L'assimilation de  $\text{CO}_2$  dans le

cadre du cycle de séquestration d'une forêt de type déterminé peut être intensifiée et accélérée moyennant une régulation correcte des mesures de gestion, un reboisement compensateur et le maintien des types de forêts existants. Une modélisation informatique des vitesses de séquestration initiales et pronostiquées est indispensable pour permettre d'évaluer au préalable les mesures à prendre.

- Le modèle C-Fix élaboré par VITO-TAP
- permet de déterminer les propriétés d'une
- forêt ou d'un écosystème en matière de
- fixation du carbone. D'après ce modèle,
- la végétation européenne actuelle est
- capable de fixer 111.000 Mt par an, soit
- 7 à 12% seulement de la quantité totale
- des émissions anthropiques de carbone
- en Europe. À l'heure actuelle, aucun pays
- européen ne présente un équilibre entre
- les émissions de carbone et la capacité de
- fixation du carbone par les forêts. Voire,
- le rapport entre les émissions et les
- absorptions est totalement déséquilibré
- au Benelux: les émissions de  $\text{CO}_2$  sont
- 50 fois supérieures à leur assimilation (cf.
- figure ci-dessous).



Rapport entre la production primaire nette (PPN, en unités de carbone) et l'ensemble des émissions anthropiques de carbone par pays pour l'Europe en 1997. (VITO-TAP).

#### 4.2.5 Utilisation des sols et mesures de gestion

La séquestration de carbone dans la végétation et les sols est l'une des solutions possibles pour réduire la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Il est donc absolument capital que les interventions favorisant le processus de séquestration soient répertoriées. En effet, des mesures de gestion appropriées et une utilisation responsable des sols ont une influence sur la vitesse de séquestration. C'est pourquoi, parallèlement à la réduction des émissions, elles constituent une méthode possible pour atteindre les normes imposées par le protocole de Kyoto en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> (article 3.3). C'est ainsi que la conversion d'une forêt en terrain agricole entraîne généralement une diminution de la quantité de carbone organique dans le sol, qui résulte de l'action moins intensive de la litière, de la différence entre la vitesse de décomposition des feuilles et celle des résidus de la récolte et des effets du travail de la terre (une plus grande aération et une protection physique moins importante de la matière organique dans le sol). Recourir à des cultures bioénergétiques, limiter l'épandage d'engrais aux terres agricoles, régénérer les forêts... telles sont quelques-unes des mesures de gestion qui accroissent la quantité de carbone dans le sol.

■ **Deux études belges permettent de démontrer que la séquestration de carbone dans le sol est influencée par les changements d'utilisation et de gestion des sols par lesquels le potentiel d'absorption de carbone par le sol augmente. Entre 1775 et 1973, la séquestration de carbone sous forme de carbone organique du sol (Soil Organic Carbon, SOC) a connu une profonde mutation dans les Ardennes. Des profils de sol (la base de données géologiques) et une série de cartes**

■ **topographiques établies au fil du temps ont permis de reconstituer les modifications dans l'utilisation du sol. En 200 ans, la quantité de SOC s'est accrue de 10,2 tonne de C par ha. Toutefois, cette augmentation du SOC est plutôt limitée si on la compare à l'assimilation annuelle totale de carbone par les écosystèmes belges (5 ktonnes par ha). Malheureusement, les mesures de gestion existantes et programmées en Belgique ne peuvent être appliquées qu'à un territoire très exigu. Ces limites spatiales sont précisément la cause du très faible potentiel d'assimilation: entre 180 et 320 ktonnes de C par an, ce qui représente seulement 0,5 à 0,8% des émissions belges de gaz à effet de serre au cours de l'année 1990.**

#### 4.2.6 Acidification des sols et dépôts d'azote

Dans diverses régions de Belgique, l'enrichissement de l'environnement en nutriments (notamment en azote), conséquence des activités humaines, constitue un grave problème. Cette 'fertilisation' provoque des bouleversements dans les processus écologiques tels que les cycles biochimiques. Dans les environnements non pollués, en effet, la présence limitée de l'azote, nutriment important, régule la compétition entre les espèces végétales. La libération d'azote dans un environnement naturel a donc un lourd impact sur la hiérarchie de dominance des végétaux.

Cet apport de nutriments peut résulter du dépôt de composés azotés et soufrés issus de l'atmosphère. Les composés gazeux tels que le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et les oxydes d'azotes (NO<sub>x</sub>) peuvent être transportés sur de très longues distances, tandis que d'autres gaz tels que le NH<sub>3</sub> ont plutôt une diffusion locale. De plus, lorsque ces composés s'infiltrent dans le sol, ils déclenchent des processus acidifiants comme la nitrification. Les produits finaux et

## Le global change dans les systèmes biologiques

intermédiaires de ces processus peuvent être lessivés et atterrir dans la nappe phréatique.

Pour freiner tous ces effets, la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) a établi des "charges critiques", qui peuvent être définies comme "le dépôt maximal d'un composant donné provoquant des effets nocifs durables sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes".

■ **Des charges critiques ont également été fixées pour les bois de feuillus et de conifères belges. Dans le cadre du projet BELFOR (Belgian Forest Ecosystems), les dépôts d'azote ont été mesurés dans cinq écosystèmes boisés expérimentaux de Flandre et de Wallonie. Il a été démontré que les charges critiques à long terme sont dépassées dans les bois de feuillus et de conifères flamands. Cette étude ne visait pas uniquement le contrôle des dépôts atmosphériques. Elle a également prouvé que les charges critiques devaient être déterminées à un niveau très local et devaient être différentes pour les bois de feuillus et les bois de conifères. En Belgique septentrionale, les importants dépôts d'azote peuvent également faire diminuer le nombre de micro-organismes dans le sol, favoriser une domination croissante de la végétation nitrophile dans les écosystèmes et, probablement, entraîner une pollution des nappes phréatiques.**

### 4.2.7 Les forêts belges au 21<sup>ème</sup> siècle

Selon les prévisions des scientifiques, la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> devrait s'accroître jusqu'à atteindre entre 550 et 1.000 ppmv (le nombre de molécules de CO<sub>2</sub> dans un compartiment de 1 million de molécules d'air) soit le double de la concentration actuelle, qui est d'environ 370 ppmv. Ce phénomène

devrait entraîner une hausse de 1,4 à 5,8°C de la température globale. En Belgique, la température augmentera de 2 à 4°C. Cette hausse s'accompagnera d'une redistribution des précipitations, réparties différemment suivant les saisons et les endroits. Dans notre région, les scientifiques prévoient une tendance à plus de précipitations en hiver et aucun changement, voire moins de précipitations en été.

Les écosystèmes tels que les forêts seront fortement influencés par ces changements dans la concentration de dioxyde de carbone, la température et les précipitations. L'ampleur de cet impact est difficile à prévoir et ne peut être estimé qu'à l'aide de modèles de croissance tenant compte de l'équilibre entre l'énergie, l'eau, le carbone et les nutriments dans ces écosystèmes, ainsi que des influences extérieures qu'ils subissent.

■ **Dans le cadre du projet BELFOR, des chercheurs de l'ULg-LPAP ont élaboré le modèle ASPECTS (Atmosphere-Soil-Plant Exchange of Carbon in Temperate Sylvae). Ce modèle a été testé pour diverses zones forestières de Belgique. Des chercheurs de l'UA-PLECO et de la FUSAGx-ECOPHYS, entre autres, ont collaboré à ce projet à partir de leurs stations de mesurage expérimentales de Brasschaat et de Vielsalm. Selon leurs analyses et les prévisions d'ASPECTS, l'assimilation nette de carbone par les forêts belges devrait augmenter au 21<sup>ème</sup> siècle. Cette augmentation est la conséquence d'une photosynthèse accélérée (due à la concentration accrue de dioxyde de carbone dans l'air) et d'un prolongement de la saison de croissance. Cependant, cette augmentation dépend de l'âge de la forêt: la séquestration maximale se produit dans les forêts âgées de 20 à 40 ans. Les mesures de gestion et les**

- conditions météorologiques annuelles
- jouent également un rôle en la matière.

### 4.3 Effets sur la structure, le fonctionnement et la distribution des écosystèmes

---

#### 4.3.1 Productivité des prairies belges

Les concentrations croissantes du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère et leurs effets sur la température mondiale influencent sensiblement le processus de photosynthèse et la vitesse de respiration de la végétation. Une grande partie de la végétation belge se présente sous forme de prairies, et celles-ci subiront également des changements induits par ce *global change*. En raison de leur importance sur le plan économique et de leur position dominante, les prairies ont été choisies comme systèmes modèles par divers groupes de chercheurs.

- Les expériences de l'UA-PLECO et de la UGent-PP prouvent qu'une longue exposition des prairies à un taux de CO<sub>2</sub> plus important a une influence sur les diverses espèces d'herbacées.
- Divers processus des écosystèmes se modifient: la vitesse de photosynthèse augmente, mais la végétation consomme moins d'eau. Ce dernier phénomène est dû au fait que les stomates des feuilles se ferment davantage en raison de la concentration plus élevée en CO<sub>2</sub>. Un apport en carbone plus important entraîne également un épaississement des feuilles et de la couverture foliaire. La température exerce principalement ses effets sur les processus biogéochimiques qui influencent l'assimilation des nutriments et la croissance. Les effets de la température sont difficiles à analyser, car la température idéale varie d'une espèce

- végétale à l'autre. Ainsi, une augmentation de la température au printemps peut avoir une action bénéfique, alors qu'en été, la même augmentation provoque un stress hydrique. Sous l'effet d'une température plus élevée, la productivité peut donc fortement varier, tant dans le sens positif que négatif.

- L'influence des hausses de température sur la productivité des prairies est donc sensible aussi dans l'agriculture belge. Les effets sont positifs au printemps (production plus importante et plus rapide), mais sont par contre annulés par les effets négatifs du plein été. Et cela représente un problème, car à l'heure actuelle déjà, les prairies ne produisent pas suffisamment de nourriture pour le bétail en été. Cet effet s'accroîtra encore à l'avenir, au fur et à mesure de l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub>. Les concentrations plus élevées en CO<sub>2</sub> augmentent la production des prairies, mais la biomasse produite est de moins bonne qualité en raison d'une teneur moins élevée en protéines.

#### 4.3.2 Mesures de gestion

Peu de mesures offrent une parade à l'augmentation de la température. Selon certains chercheurs, il pourrait être bon de limiter l'apport de nutriments. En effet, cela diminuerait la vitesse de photosynthèse et, dès lors, le degré d'ouverture des stomates. Cela ferait baisser la vitesse de transpiration et limiterait donc aussi le dessèchement, ce qui rendrait la végétation moins sensible à la température. Mais cette mesure ne pourra pas prévenir la baisse de production due à l'augmentation de la température, étant donné qu'une restriction de l'apport en nutriments entraîne déjà, en soi, une baisse de la productivité. Le passage à des espèces végétales s'épanouissant mieux

sous des climats plus chauds serait une mesure radicale, mais efficace, qui offrirait peut-être un résultat.

### 4.3.3 Distribution mondiale de la végétation

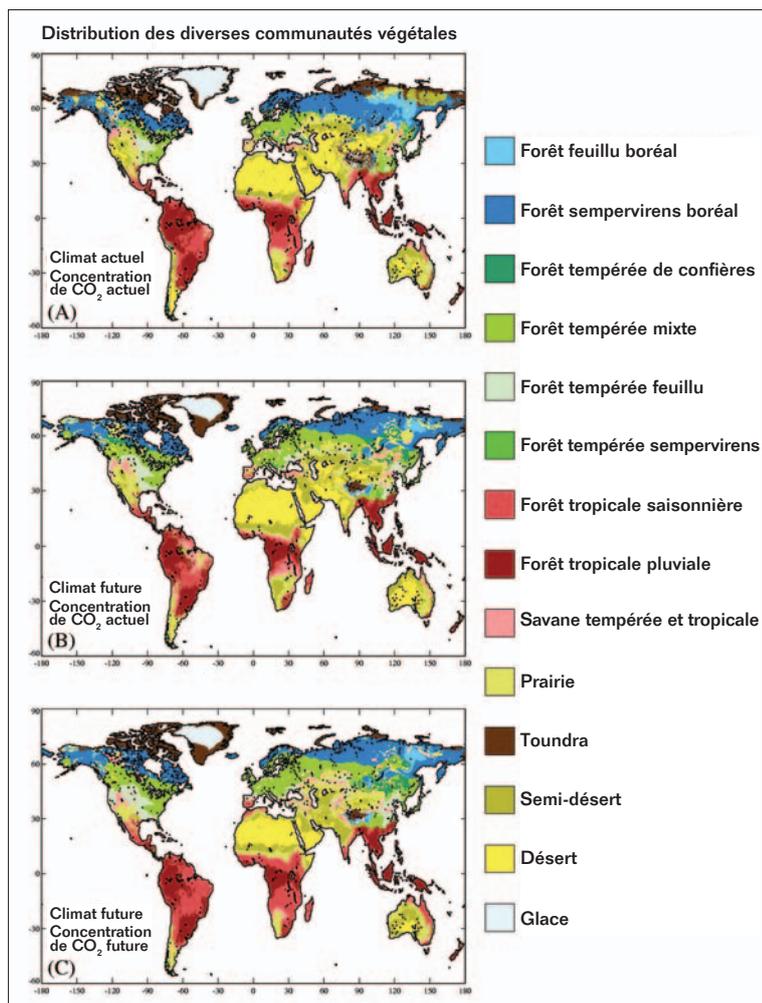
L'accroissement de la température et de la concentration en  $\text{CO}_2$  influencera non seulement le fonctionnement, mais aussi la répartition de la végétation à l'échelle mondiale. Des modèles prédisent qu'il se produira des transferts importants dans la répartition des différents types fonctionnels de communautés végétales (biomes) sur terre.

- Une réduction de la toundra, d'une part,
- et une extension des déserts, d'autre part,
- telles sont quelques-unes des prévisions établies par le modèle CARAIB (Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems) conçu par l'ULg-LPAP (cf. figure ci-dessous).
- Ce modèle fait la distinction entre les changements induits par le  $\text{CO}_2$  et ceux qui résultent de la température. Cependant, ces prévisions divergent selon que l'on incorpore un seul effet ou les deux dans les calculs.
- Malgré tout, on peut s'attendre à ce que les espèces dont le champ de tolérance est limité disparaissent sous l'effet du changement rapide des conditions climatologiques. En l'absence d'espèces de substitution, le stockage de carbone diminuera et l'effet de serre augmentera en raison des émissions de  $\text{CO}_2$ . Bref, un cercle vicieux.

## 4.4 Effets du global change sur l'équilibre hydrologique

### 4.4.1 Effets sur les bassins hydrologiques belges

Tant du point de vue qualitatif que quantitatif, l'eau douce est un bien précieux. Cela est très clairement souligné dans la législation européenne (directive 2000/60/CE, établissant



Distribution géographique des diverses communautés végétales calculée à l'aide du modèle CARAIB (Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems), élaboré par l'ULg-LPAP. Ce modèle montre l'impact respectif des modifications climatiques futures (température et précipitations) et des modifications de la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique sur la végétation: (A) simulation standard avec les conditions climatologiques et les concentrations de  $\text{CO}_2$  actuelles, (B) simulation avec les conditions climatologiques futures et les concentrations de  $\text{CO}_2$  actuelles et (C) simulation avec les conditions climatologiques futures et les concentrations de  $\text{CO}_2$  futures. Par 'actuelles', on entend la période 1990-1999, et par 'futures' 2090-2099. (L. François, ULg-LPAP).

un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau) et internationale (ACTION 21, Chapitre 18 sur la protection des ressources en eau douce et de leur qualité). Les scénarios du *global change* pronostiquent une augmentation de la température et des modifications du régime des précipitations. Ces

changements modifient le cycle hydrologique par le biais de la quantité d'eau entrant dans un écosystème, qui influence à son tour la relation entre le sol et la végétation. Quelles sont les conséquences pour la Belgique?

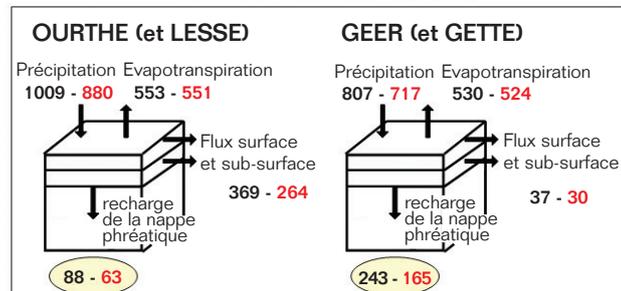
Les chercheurs de la FUSAGx-UHAGx ont effectué des simulations au moyen du modèle hydrologique EPIC-GRID du bassin des rivières belges. Ce faisant, ils ont opéré une distinction entre deux éléments importants: les flux latéraux (flux de surface) et la recharge des nappes souterraines. L'un ou l'autre de ces éléments prend le dessus en fonction du degré de perméabilité du sol. Si le sol est peu perméable, les flux de surface seront prédominants, comme dans les bassins de la Lesse et de l'Ourthe. Dans le cas des sols plus perméables, le rôle des flux vers la nappe phréatique sera plus affirmé, comme par exemple dans le bassin de la Gette et du Geer. Il ressort des prévisions que la vitesse du courant va sensiblement diminuer pour tous les lits de rivière, que les courants soient dominés par des flux s'écoulant en direction des nappes phréatiques ou par des flux de surface (cf. schéma suivant).

#### 4.4.2 Modifications du régime des nappes phréatiques

Les changements climatiques influencent le cycle hydrologique, avec des conséquences notamment pour l'humidité des sols, la recharge de la nappe phréatique, la qualité de l'eau et les flux vers les nappes phréatiques. Sur la base des résultats de trois modèles de circulation générale (General Circulation Models, GCMs), l'Institut Royale Météorologique (IRM) a élaboré trois scénarios de changements climatiques pour la Belgique. Dans chacun des trois scénarios, la température augmente.

#### Le modèle EPIC-GRID: redistribution de flux hydriques (mm) sans (noir) ou avec *Global Change* (rouge)

Scénario ECHAM4-horizon 2040-2069



- Basins avec de l'eau phréatique significatif (GEER et GETTE): impacts important sur la recharge de la nappe phréatique
- Pour tout les rivières: modification significatif des flux faible à cause d'une diminution importante des flux de l'eau de souterraine et de flux sub-surfaces

*Redistribution des flux hydriques dans les bassins hydrologiques et influence des changements climatiques (simulations EPIC-GRID, scénario ECHAM4, horizon 2040-2069). (C. Sohier et S. Dautrebande, FUSAGx-UHAGx).*

Deux des trois scénarios indiquent que sous l'action du *global change*, le volume annuel des précipitations devrait diminuer en Belgique. Le troisième prévoit peu de changements. Tous les scénarios ont établi que le volume des précipitations devrait baisser durant les mois d'été. La FUSAGx-UHAGx a appliqué ces trois scénarios au modèle hydrologique EPIC-GRID, qui permet de calculer l'impact de changements climatiques potentiels sur le cycle hydrologique. Deux des trois scénarios montrent une nette diminution des flux latéraux et de la recharge de la nappe phréatique sur une base annuelle. Les simulations sur base mensuelle laissent penser qu'il y aura une augmentation de ces flux en hiver, ce qui est lié aux précipitations. En fonction du scénario appliqué, le déficit de l'alimentation de la nappe phréatique varie entre 1 et 34% et aura des répercussions importantes pour l'approvisionnement en eau, surtout pendant les mois d'été, avec des effets négatifs sur les récoltes.

#### 4.4.3 Changements dans l'agriculture

L'augmentation de la température, la diminution des ressources en eau disponibles et l'augmentation de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  entraînent des modifications dans l'évapotranspiration de la végétation et dans la production agricole.

Les simulations à l'aide du modèle EPIC-GRID révèlent que sous l'effet des hausses de température, l'évapotranspiration (quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes) va augmenter au printemps en raison du développement plus précoce des végétaux, mais qu'elle va diminuer en été en raison du stress hydrique et de la maturation plus précoce des récoltes. L'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  induira un accroissement de la production agricole qui dépendra du type de récoltes et des ressources disponibles en eaux souterraines. Quand les précipitations diminuent en été, les plantations délicates doivent être irriguées. Combiné à une diminution de l'humidité des sols, le manque d'eau influence la productivité des prairies avec pour corollaire moins de fourrage. L'accessibilité des terres est influencée par l'augmentation de l'humidité du sol au printemps.

#### 4.4.4 Changements dans les zones marécageuses

En raison de la présence quasi permanente d'eau au-dessus du niveau du sol dans les zones marécageuses, l'hydrologie y joue un rôle capital. Dans un sol complètement saturé, les processus biogéochimiques sont dominés par la présence d'eau. Mais cette chimie du sol est plus dynamique que l'on ne le supposait à l'origine. Ainsi, le niveau d'eau baisse pendant les mois d'été secs, ce qui maintient au sec une partie de la surface du sol et l'expose à l'air. Les processus chimiques qui se déroulent alors provoquent une acidification du sol. Le *global change* renforce ce phénomène.

■ Les chercheurs de l'UA-ECOBÉ ont mené un projet de recherche international dans les provinces belges du Brabant (Torfbroek) et du Luxembourg (Marais de Vance), ainsi qu'en Grande-Bretagne (Buxton Heath), qui a permis de mieux clarifier les changements survenant dans le sol des marais. Les expériences ont indiqué que lorsque la quantité d'eau dans le sol diminue, le pH chute et les concentrations d'ions de sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) augmentent. Etant donné que la quantité de fer (Fe), d'aluminium (Al) et de chlore (Cl) reste pratiquement constante, l'augmentation des ions de  $\text{SO}_4^{2-}$ , de  $\text{Mg}^{2+}$  et de  $\text{Ca}^{2+}$  ne peut être imputée à un pur effet de concentration du à l'évaporation des molécules d'eau. Ces concentrations plus fortes résultent plutôt du pH plus élevé qui accentue notamment la solubilité des cations. À terme, ce processus entraîne un appauvrissement en nutriments (cf. Encadré 13).

### 4.5 Origines des modifications affectant les écosystèmes

#### 4.5.1 Conditions initiales, origines des changements et rétroactions

Les modifications des écosystèmes terrestres sont provoquées par une combinaison complexe de facteurs socio-économiques et biophysiques. Au cours des dernières décennies, les changements dans l'utilisation et l'occupation des sols ont représenté la principale menace pour les habitats et les espèces qu'ils hébergent, ainsi que pour les sols, les cours d'eau et la vulnérabilité des écosystèmes et des groupes de population. Ces facteurs mettent non seulement à l'épreuve les écosystèmes terrestres, mais instaurent aussi un milieu dans lequel se produisent diverses réactions anthropogènes.

### Encadré 13: pH et solubilité

Les nutriments du sol sont fixés à 98% dans l'humus (acides aminés de matières organiques partiellement décomposées) et l'argile. Ces nutriments ne peuvent pas être directement assimilés par les plantes; ils ne sont donc pas disponibles. Toutefois, une très faible proportion (0,2%) de ces nutriments est dissoute dans l'eau du sol par des processus de décomposition et de désagrégation, ce qui les libère bel et bien.

Ces nutriments solubilisés et disponibles sont en grande partie adsorbés à des colloïdes du sol: de petites particules à charge négative (entre 0,1 et 10  $\mu\text{m}$ ) comme les particules d'argile et d'humus. Dans les particules d'argile, le cation (ion ayant une charge positive) de base silicium ( $\text{Si}^{4+}$ ) est souvent remplacé par les atomes (aluminium)  $\text{Al}^{3+}$  ou (calcium)  $\text{Ca}^{2+}$ , de moindre valeur. C'est la raison pour laquelle ces particules porteront

une ou plusieurs charges négatives. L'humus se compose d'acides aminés qui, en cas de degré d'acidité (pH) neutre, se présentent sous la forme d'un 'ion dipolaire' (dans la molécule, il y a une charge positive et une charge négative, ce qui rend la particule neutre dans sa globalité). Ces charges négatives permettent tant aux particules d'argile qu'à celles d'humus de se combiner avec des cations et d'éviter ainsi d'être lessivées.

Lorsque le sol s'acidifie (de manière naturelle ou influencé par l'homme), ces niches à charge négative sont occupées par les ions d'hydrogène ( $\text{H}^+$ ) qui, dans ce cas, sont présents en grandes concentrations. Ces derniers chassent les autres cations présents, qui sont évacués dans les eaux souterraines. Ce processus entraîne un appauvrissement du sol par la disparition progressive des nutriments des cationiques.

Dans cet enchaînement de modifications des écosystèmes, on distingue toujours trois groupes de facteurs, et les interactions entre ces groupes doivent être connues pour détecter les changements. Le premier groupe comprend les conditions initiales (caractéristiques de l'environnement et historique), le deuxième regroupe toutes les causes (directes et sous-jacentes) et le troisième englobe tous les mécanismes de rétroaction. La figure à la page suivante présente un exemple récapitulatif de relevé et d'analyse des facteurs influençant la modification des écosystèmes.

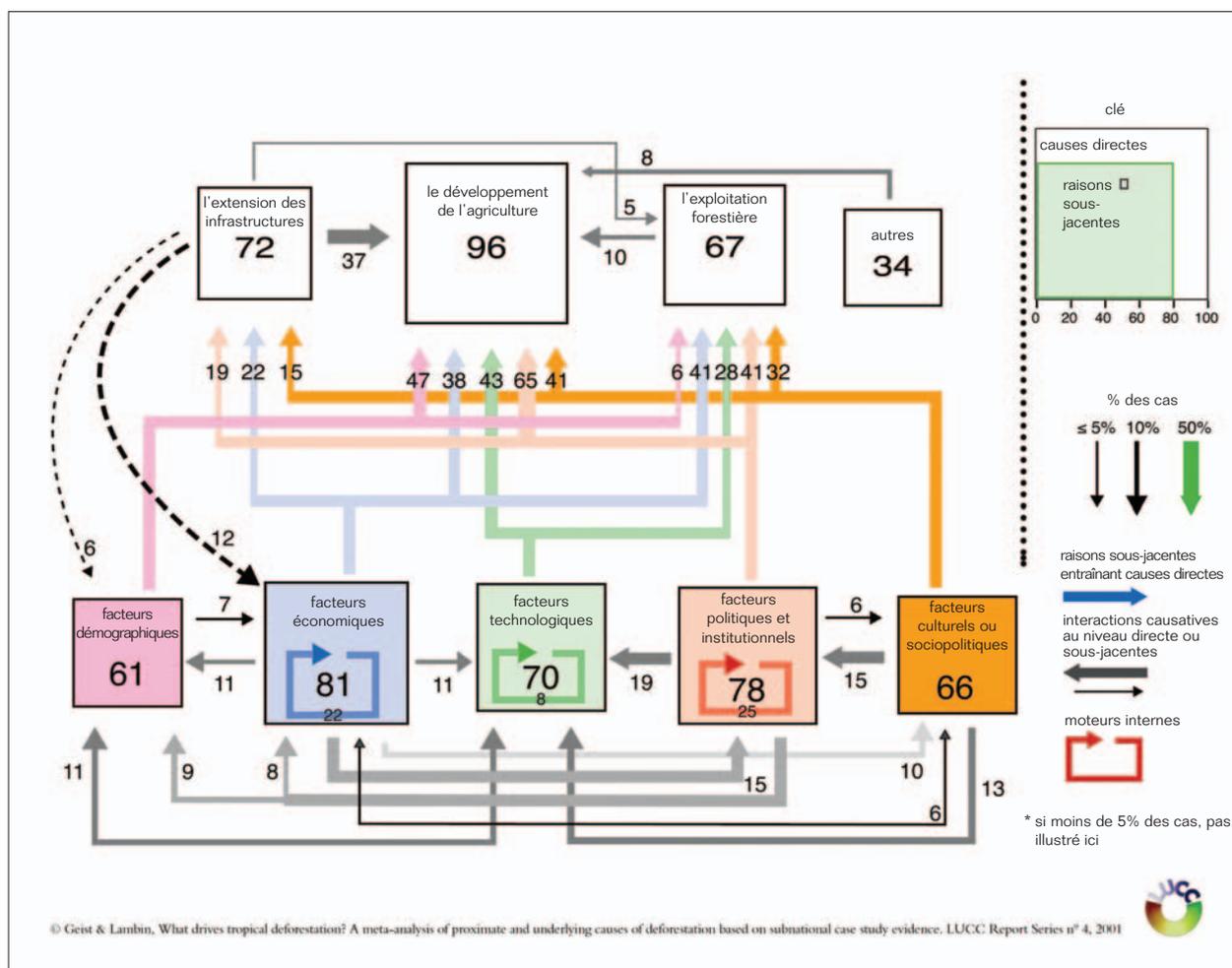
#### 4.5.2 Le facteur clé

Il ressort des études qu'en général, les changements dans l'utilisation des sols ne peuvent être déterminés par un facteur unique pouvant être isolé comme cause au sein des écosystèmes. Nous sommes plutôt en présence d'une combinaison de facteurs variables dans le

temps et dans l'espace, fortement dépendants des conditions anthropogènes. Certaines réactions synergétiques inverses peuvent entraîner une neutralisation de leur effet et, dans ce cas, il n'y a absolument aucun changement. Cependant, il se peut aussi que l'interaction de divers facteurs agisse comme un processus auto-catalytique qui, une fois lancé, se poursuit inexorablement. En outre, les changements au sein d'un écosystème iront dans le sens d'une dégradation ou d'une régénération en fonction des mécanismes de rétroaction qui se produisent. Prédire un résultat n'est donc possible que si un maximum de facteurs sont connus et pris en considération.

■ Au cours d'une analyse de 300 sites situés  
■ tant dans des écosystèmes tropicaux  
■ que dans des écosystèmes tempérés,  
■ les chercheurs de l' UCL-GEOG ont  
■ étudié le pourcentage des systèmes où

## Le global change dans les systèmes biologiques



Exemple d'analyse systématique et généralisatrice des schémas et facteurs entraînant le déboisement des forêts pluviales tropicales. L'impact d'une variable clé donnée (tel qu'un accroissement de la population et une modification des cultures) ne peut être déterminé avec certitude. Généralement, c'est une combinaison de facteurs causals directs et de raisons sous-jacentes (notamment sociales) qui permet le mieux d'expliquer le recul des forêts tropicales. Une combinaison récurrente de causes économiques, politiques et institutionnelles vient renforcer le faisceau des facteurs directs - tels que le développement de l'agriculture, l'extension des infrastructures, l'exploitation forestière - qui entraînent le déboisement. Quoique certains chercheurs affirment que les interactions au sein de ce faisceau de facteurs sont d'une complexité insurmontable, il doit malgré tout être possible de dégager et d'expliquer des schémas régionaux indiscutables. (H. Geist et E. Lambin, UCL-GEOG).

- les changements survenus pouvaient être expliqués par un unique facteur, appelé "facteur clé". Celui-ci n'a pu être déterminé que dans 10% des cas. De même, la part des 'facteurs causals purs' était réduite (5 à 8%). Dans la majorité des cas (70 à 90%), l'élément prédominant était une combinaison des différentes interactions.

### 4.5.3 Causes socio-économiques

La transformation des écosystèmes n'est pas seulement induite par des causes biophysiques, mais aussi par des causes socio-économiques. La distinction souvent opérée entre les causes biophysiques et les causes socio-économiques est plutôt artificielle. La transformation des écosystèmes se produit toujours au sein d'un système à la fois anthropogène et naturel.

## 4.6 Conclusions et perspectives

Complexe, l'impact du *global change* se traduit de diverses manières. Aujourd'hui, un certain nombre de changements planétaires simultanés influencent une série de processus interconnectés dans une série d'écosystèmes différents. Certains de ces processus provoquent le *global change*, mais s'inscrivent également parmi les conséquences de celui-ci. Ainsi, l'érosion de la biodiversité est une conséquence de ces changements planétaires, mais à son tour influence le fonctionnement des écosystèmes et l'utilisation des sols.

Les conséquences sont parfois des causes, et inversement. Qui plus est, elles sont souvent reliées à leurs facteurs causals par un effet de rétroaction, par exemple dans la respiration du sol. Etant donné que la matière organique du sol contient deux fois plus de carbone que l'atmosphère et que 10% du carbone du sol est libéré dans l'atmosphère chaque année, de légers changements dans le stockage du carbone par les sols peuvent avoir d'importantes conséquences pour la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En effet, la température influence positivement la respiration du sol: plus il fait chaud, plus le degré de respiration est élevé. C'est cette respiration qui permet aux molécules de carbone (C) du sol de se lier à de l'oxygène (O<sub>2</sub>), et de parvenir ainsi dans l'atmosphère sous la forme de molécules de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cela renforce l'effet de serre, qui fera encore augmenter la température et pourrait ainsi nous enfermer dans un cercle vicieux.

Les changements climatiques multiplieront également la fréquence des événements météorologiques extrêmes. Etant donné que ces événements favorisent la disparition des espèces végétales qui sont déjà les plus sensibles aux extrêmes du climat actuel, ils pourraient induire la destruction des

écosystèmes. La recherche future doit donc être axée prioritairement sur la consolidation des écosystèmes. De nouveaux instruments de gestion ont été développés sur la base de la dynamique des populations pour une meilleure gestion des écosystèmes, afin d'empêcher la disparition de certaines espèces.

Les modélisations et les observations atmosphériques du CO<sub>2</sub> émis et absorbé nous apprennent qu'environ un tiers du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère chaque année à la suite de l'utilisation de combustibles fossiles et du déboisement est réassimilé par la biosphère terrestre. Cette assimilation se produit principalement dans les forêts des degrés de latitude moyens de l'hémisphère Nord. En d'autres termes, la gestion et l'exploitation de ces écosystèmes ont un impact important sur les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est donc à ce niveau que se situent les possibilités d'endiguer le *global change* et ses conséquences.

Les espèces invasives constituent une menace supplémentaire pour la biodiversité dans les écosystèmes. Les activités humaines ont supprimé bien des barrières naturelles et les espèces moins aptes à se disperser parviennent, elles aussi, à s'installer dans un nouvel habitat favorable. Les espèces invasives provoquent des pertes économiques énormes (réduction des récoltes, coût de la lutte antiparasitaire), mais leur impact sur ce qui nous reste de nature (pas grand-chose) dans notre environnement fortement influencé par les activités humaines est tout aussi important.

Qu'il s'agisse de la réduction de la biodiversité ou de la concentration accrue de gaz à effet de serre, la cause est toujours une combinaison de facteurs anthropogènes et naturels. De plus, ces facteurs sont généralement interdépendants et il existe de nombreux mécanismes de rétroaction.

*Le global change dans les systèmes biologiques*

## Annexe 1 - Instituts belges de recherche

Institution	Contact	Site Web
<b>Etablissements Scientifiques Fédéraux</b>		
<b>IASB</b>	<b>Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique</b>	De Mazière M., Muller J.-F.
<b>IRM</b>	<b>Institut Royal Météorologique</b>	De Backer H., Tricot C.
<b>IRSNB</b>	<b>Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique</b>	
Invertébrés	Invertébrés	Grootaert P., Willenz Ph.
UGMM	L'Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord et de l'estuaire de l'Escaut	Pichot G.
<b>MRAC GEO</b>	<b>Musée Royal d'Afrique Centrale</b> Géologie et Minéralogie	André L.
<b>Universités</b>		
<b>FPMS FLUIDMACH</b>	<b>Faculté Polytechnique de Mons</b> Groupe Mécanique	Passelecq Ch., Hanton J.
<b>FUNDP URBO</b>	<b>Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix</b> Unité de Recherches en Biologie des Organismes	Descy J.-P.
<b>FUSAGx</b>	<b>Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux</b>	
ECOPHYS	Unité de Biologie végétale - Ecophysiology des arbres forestiers	Laitat E.
UHAGx	Unité de Hydrologie et Hydraulique agricole	Dautrebande S., Sohier C.
<b>KULeuven H&amp;EG PAC LFNL LSWM</b>	<b>Katholieke Universiteit Leuven</b> Laboratorium voor Hydrogeologie en ingenieursgeologie Afdeling voor Fysische en Analytische Chemie Laboratory fo Forest, Nature and Landscape Research Laboratory for Soil en Water Management	Dassargues A. Peeters J., Vinckier C. Van Orshoven J. Feyen J.
<b>UA DECO ECOBE EFB MiTAC Phar PLECO</b>	<b>Universiteit Antwerpen</b> Laboratory of Animal Ecology Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer Ecofysiologie en Biochemie Centrum voor Micro- en Sporenanalyse Laboratorium voor Biomoleculaire Massaspectrometrie Laboratorium voor Plantecologie	Mathysen E. Meire P., Verheyen R. Blust R. Van Grieken R. Claeys M. Ceulemans R., Nijs I.
<b>UCL ASTR</b>	<b>Université catholique de Louvain</b> Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître	Berger A., Deleersnijder E., Fichefet Th., Schayes G., van Ypersele J.-P.
ECOL	Unité d'Ecologie et de Biogéographie	Le Boulangé E., Baguette M.
EFOR	Unité des Eaux et des Forêts	André P.
GEOG	Unité de Géographie	Geist H., Lambin E., Van Wesemael B.
GEOL	Unité de Géologie	Seret G.
<b>UGent INW</b>	<b>Universiteit Gent</b> Troposferisch Aërosolonderzoek en Nucleaire Micro-analyse	Maenhaut W.
ISOFYS	Vakgroep voor Toegepaste Analytische en fysische Chemie	Boeckx P., Van Cleemput O.
MARBIOL	Instituut voor Dierkunde Mariene Biologie	Vincx M.
OC	Organische Chemie	Van Langenhove H.
PAE	Protistologie en Aquatische Ecologie	Vyverman W., Cocquyt Ch.
PLANTECO	Laboratorium voor Plantecologie	Lemeur R., Vandewalle I.
PP	Vakgroep Plantaardige Productie	Reheul D., Behaeghe T.
RCMG	Renard Centre of Marine Geology	De Batist M.
SOILMAN	Department of Soil Management and Soil Care	Hofman G.
<b>ULB BIOMAR ESA GLACIOL GMMA OCEAN</b>	<b>Université Libre de Bruxelles</b> Centre Interuniversitaire de Biologie Marine Ecologie des Systèmes Aquatiques Glaciologie Polaire Groupe de Microbiologie des Milieux Aquatiques Laboratoire d'Océanographie Chimique et Géochimie des Eaux	Dubois Ph. Lancelot C. Lorrain R., Souchez R. Billen G. Chou L., Wollast R.
SPECAT	Unité de Spectroscopie de l'Atmosphère	Colin R., Carleer M.

## Annexe 1 - Instituts belges de recherche (suite)

Institution	Contact	Site Web
<b>Universités</b>		
<b>ULg</b>	<b>Université de Liège</b>	
BOT	Institut de Botanique	<a href="http://www.ulg.ac.be">http://www.ulg.ac.be</a>
CEME	Centre d'Etude et de Modélisation de l'Environnement	<a href="http://www.ulg.ac.be/facsc">http://www.ulg.ac.be/facsc</a>
CIP	Centre d'Ingénierie des Protéines	
ECOHYD	Unité d'Ecohydrodynamique	<a href="http://www.ulg.ac.be/cingprot">http://www.ulg.ac.be/cingprot</a>
GIRPAS	Groupe Infrarouge de Physique Atmosphérique et Solaire	<a href="http://modb.oce.ulg.ac.be/ECOHYD./welcome.htm">http://modb.oce.ulg.ac.be/ECOHYD./welcome.htm</a>
LGIIH	Laboratory of Engineering Geology, Hydrogeology and Geophysical Prospecting	<a href="http://sunset.astro.ulg.ac.be/girpas/girpasf.html#CONT">http://sunset.astro.ulg.ac.be/girpas/girpasf.html#CONT</a>
LPAP	Laboratoire de Physique Atmosphérique et Planétaire	<a href="http://www.astro.ulg.ac.be/GRech/lpap_f.html">http://www.astro.ulg.ac.be/GRech/lpap_f.html</a>
OCEANBIO	Laboratoire d'Océanologie	<a href="http://www.ulg.ac.be/oceanbio">http://www.ulg.ac.be/oceanbio</a>
OCEANCHEM	Chemical Oceanography Unit	<a href="http://www.ulg.ac.be/oceanbio/co2">http://www.ulg.ac.be/oceanbio/co2</a>
URAP	Unité de Recherche Argiles et Paléoclimats	<a href="http://www.ulg.ac.be/urap">http://www.ulg.ac.be/urap</a>
<b>UMH</b>	<b>Université de Mons-Hainaut</b>	<a href="http://www.umh.ac.be">http://www.umh.ac.be</a>
FS	Service d'Informatique Générale	<a href="http://sinfo.umh.ac.be/equip.es.htm">http://sinfo.umh.ac.be/equip.es.htm</a>
<b>VUB</b>	<b>Vrije Universiteit Brussel</b>	<a href="http://www.vub.ac.be">http://www.vub.ac.be</a>
ANCH	Laboratorium voor Analytische Scheikunde	<a href="http://we.vub.ac.be/dsch">http://we.vub.ac.be/dsch</a>
DG	Department of Geography	<a href="http://www.vub.ac.be/DGGF">http://www.vub.ac.be/DGGF</a>
ECOL	Laboratorium voor Ecologie en Systematiek	<a href="http://we.vub.ac.be/~ecol">http://we.vub.ac.be/~ecol</a>
<b>Instituts régionaux</b>		
CELINE / IRCEL	Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu	<a href="http://www.irceline.be">http://www.irceline.be</a>
<b>CLO</b>	<b>Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek</b>	
DFE	Departement voor Fytotechnie en Ecofysiologie	<a href="http://www.clo.fgov.be">http://www.clo.fgov.be</a>
		<a href="http://www.ibw.vlaanderen.be">http://www.ibw.vlaanderen.be</a>
<b>IBW</b>	<b>Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer</b>	Van Slycken J.
<b>VITO</b>	<b>Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek</b>	
TAP	Teledetectie en aardobservatieprocessen	<a href="http://www.vito.be">http://www.vito.be</a>
		<a href="http://www.vito.be/milieu/teledetectie.htm">http://www.vito.be/milieu/teledetectie.htm</a>

**Note:** Les institutions listées sont celles mentionnées dans ce rapport ci.

## Annexe 2 - Acronymes et abréviations

Nom	Description	Site web
<b>6EAP</b>	Sixième programme d'action environnemental - UE (Sixth Environment Action Programme - EU)	<a href="http://europa.eu.int/comm/environment/newprg/">http://europa.eu.int/comm/environment/newprg/</a>
<b>ACTION 21</b>	Plan d'action mondial axé sur le développement durable pour le XXI <sup>e</sup> siècle, à être mis en œuvre par les gouvernements, les institutions du développement, les organismes des Nations Unies et les groupes de secteurs indépendants, dans tous les domaines où l'activité humaine (économique) affecte l'environnement	<a href="http://www.un.org/french/ga/special/sids/agenda21/">http://www.un.org/french/ga/special/sids/agenda21/</a>
<b>AD</b>	Anno Dominus	
<b>AOS</b>	Aérosol Organique Secondaire	
<b>ASE</b>	Agence Spatiale Européenne	<a href="http://www.esa.int/">http://www.esa.int/</a>
<b>ASPECTS</b>	Atmosphere-Soil-Plant Exchange of Carbon in Temperate Sylvae	
<b>ATMOS</b>	Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy	<a href="http://atmos.jpl.nasa.gov/atmos">http://atmos.jpl.nasa.gov/atmos</a>
<b>BASCOE</b>	modèle d'assimilation belge permettant de fournir une information uniforme en temps et en espace sur la composition chimique de l'atmosphère (Belgian Assimilation System of Chemical Observations from ENVISAT)	<a href="http://www.bascoe.oma.be/index.html">http://www.bascoe.oma.be/index.html</a>
<b>BELEUROS</b>	European Operational Smog Model adapted to Belgium	<a href="http://www.beleuros.be/">http://www.beleuros.be/</a>
<b>BELFOR</b>	Belgian Forest ecosystems	<a href="http://www.vito.be/belfor/">http://www.vito.be/belfor/</a>
<b>BELSPO</b>	Politique scientifique fédérale (Belgian Federal Science Policy Office)	<a href="http://www.belspo.be">http://www.belspo.be</a>
<b>BIOGEST</b>	Biogas Transfer in Estuaries	<a href="http://www.ulg.ac.be/oceanbio/biogest/">http://www.ulg.ac.be/oceanbio/biogest/</a>
<b>CAFE</b>	Clean Air For Europe	<a href="http://europa.eu.int/comm/environment/air/cale/">http://europa.eu.int/comm/environment/air/cale/</a>
<b>CALMARS</b>	Calcareous Marine Skeletons	<a href="http://www.vub.ac.be/calmar/">http://www.vub.ac.be/calmar/</a>
<b>CARAIB</b>	Carbon Assimilation In the Biosphere	<a href="http://gaim.unh.edu/Structure/Intercomparison/EMDI/models/caraib.html">http://gaim.unh.edu/Structure/Intercomparison/EMDI/models/caraib.html</a>
<b>CASTEC</b>	Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems	<a href="http://allserv.rug.ac.be/~ovcleemp/">http://allserv.rug.ac.be/~ovcleemp/</a>
<b>CBD</b>	Convention sur la Biodiversité (Convention on Biological Diversity)	<a href="http://www.biodiv.org/">http://www.biodiv.org/</a>
<b>CCR</b>	Centre Commun de Recherche - CE (Joint Research Centre - EC)	<a href="http://www.jrc.it/">http://www.jrc.it/</a>
<b>CDB</b>	Convention sur la Biodiversité (Convention on Biological Diversity)	<a href="http://www.biodiv.org/">http://www.biodiv.org/</a>
<b>CdP</b>	Conférence des Parties	<a href="http://unfccc.int/cop3/">http://unfccc.int/cop3/</a>
<b>CE</b>	Commission Européenne	<a href="http://europa.eu.int/comm/index_fr.htm">http://europa.eu.int/comm/index_fr.htm</a>
<b>CFC</b>	Chlorofluorocarbure	
<b>C-Fix</b>	A Satellite Based Carbon Budgeting Tool	
<b>CLIMOD</b>	Climate Modelling	<a href="http://www.climate.be/popwork/introclim.html">http://www.climate.be/popwork/introclim.html</a>
<b>COV</b>	Composés Organiques Volatils	
<b>COVNM</b>	Composés Organiques Volatils Non méthaniques	
<b>DIVERSITAS</b>	programme international de recherche pour promouvoir la science de la biodiversité	<a href="http://www.diversitas-international.org/">http://www.diversitas-international.org/</a>
<b>DMS</b>	Dimethyl Sulphide	
<b>EASOE</b>	European Arctic Stratospheric Ozone Experiment	<a href="http://badc.nerc.ac.uk/data/easoe/">http://badc.nerc.ac.uk/data/easoe/</a>
<b>EC</b>	Commission Européenne (European Commission)	<a href="http://europa.eu.int/comm/index_fr.htm">http://europa.eu.int/comm/index_fr.htm</a>
<b>ECHAM4</b>	version actuelle du modèle climatique développé sur base d'un modèle atmosphérique du ECMWF et d'un paquet de paramétrisation développé à Hamburg	<a href="http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/echam4_info.html">http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/echam4_info.html</a>
<b>ECMWF</b>	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (European Centre for Medium range Weather Forecasts)	<a href="http://www.ecmwf.int/">http://www.ecmwf.int/</a>
<b>EFISCEN</b>	European Forest Information Scenario model	<a href="http://agrifor.ac.uk/hb/4c3701607bfdc93fcc662fc89bf3bdb2.html">http://agrifor.ac.uk/hb/4c3701607bfdc93fcc662fc89bf3bdb2.html</a>
<b>ENSO</b>	El Nino oscillation australe (El Niño Southern Oscillation)	
<b>ENVISAT</b>	Environmental Satellite	<a href="http://envisat.esa.int/">http://envisat.esa.int/</a>
<b>EPIC-GRID</b>	modèle hydrologique du bassin des rivières belges	<a href="http://styx.esrin.esa.it/cliff/Partners/UnivGemb.html">http://styx.esrin.esa.it/cliff/Partners/UnivGemb.html</a>
<b>ESF</b>	La Fondation Européenne de la Science (European Science Foundation)	<a href="http://www.esf.org/index.php?language=1">http://www.esf.org/index.php?language=1</a>
<b>ESSP</b>	Earth System Science Partnership	<a href="http://www.ess-p.org/">http://www.ess-p.org/</a>
<b>EURECA</b>	European Retrievable Carrier	<a href="http://www.esa.int">http://www.esa.int</a>
<b>EUREKA</b>	réseau pan-européen pour la promotion du R&D market-oriented et industrielle	<a href="http://www.eureka.be">http://www.eureka.be</a>
<b>EUROCORES</b>	ESF Collaborative Research Programmes	<a href="http://www.esf.org/esf_activity_home.php?language=0&amp;domain=0&amp;activity=7">http://www.esf.org/esf_activity_home.php?language=0&amp;domain=0&amp;activity=7</a>
<b>EUROS</b>	European Operational Smog model	
<b>EUROTRAC</b>	The EUREKA project on the transport and chemical transformation of trace constituents in the troposphere over Europe	<a href="http://www.gsf.de/eurotrac/">http://www.gsf.de/eurotrac/</a>
<b>FE</b>	Facteur d'Emission	
<b>FP6</b>	Sixième Programme Cadre - UE (Sixth Framework Programme - EU)	<a href="http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm">http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm</a>
<b>GCM</b>	Modèle de circulation générale (General Circulation Model)	
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat	<a href="http://www.ipcc.ch">http://www.ipcc.ch</a>
<b>GIEC-SRES</b>	Scénarios d'émissions. Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC.	<a href="http://www.ipcc.ch/pub/sres-f.pdf">http://www.ipcc.ch/pub/sres-f.pdf</a>
<b>GIEC-SYR</b>	Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse	<a href="http://www.ipcc.ch/">http://www.ipcc.ch/</a>
<b>GRIP</b>	Greenland Ice Core Project	<a href="http://nsidc.org/data/gisp_grip/index.html">http://nsidc.org/data/gisp_grip/index.html</a>
<b>GWP</b>	Global Warming Potential	
<b>HadCM</b>	Hadley Centre Coupled Model	<a href="http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/modeltypes.html">http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/modeltypes.html</a>
<b>HN</b>	Hémisphère Nord	
<b>IGBP</b>	International Geosphere-Biosphere Programme	<a href="http://www.igbp.kva.se">http://www.igbp.kva.se</a>

Nom	Description	Site web
<b>IGFA</b>	International Group of Funding Agencies for Global Change Research	<a href="http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/outreach/funding/world/IGFA.HTML">http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/outreach/funding/world/IGFA.HTML</a>
<b>IHDP</b>	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change	<a href="http://www.ihdp.uni-bonn.de/">http://www.ihdp.uni-bonn.de/</a>
<b>IMAGES</b>	Intermediate Model for the Annual and Global Evolution of Species	<a href="http://www.ucar.edu/communications/acronyms/1.html">http://www.ucar.edu/communications/acronyms/1.html</a>
<b>IPCC</b>	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change)	<a href="http://www.ipcc.ch">http://www.ipcc.ch</a>
<b>IPCC-SAR</b>	IPCC Second Assessment Report	<a href="http://www.ipcc.ch/">http://www.ipcc.ch/</a>
<b>IPCC-TAR</b>	IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001	<a href="http://www.ipcc.ch/">http://www.ipcc.ch/</a>
<b>LAQUAN</b>	Late Quaternary climate history of coastal Antarctic environments: a multi-proxy approach	<a href="http://www.laquan.ugent.be">http://www.laquan.ugent.be</a>
<b>LOCH</b>	an off-line three-dimensional (3-D) reaction-transport model of the marine carbon cycle	
<b>LS fit</b>	least squares fit	
<b>METAGE</b>	Modelling Ecosystem Trace Gas Emissions	<a href="http://www.geo.ucl.ac.be/metage/">http://www.geo.ucl.ac.be/metage/</a>
<b>MILMO</b>	Modelling the evolution of climate and sea level over the Third Millennium	<a href="http://www.climate.be/research/MILMO/">http://www.climate.be/research/MILMO/</a>
<b>MIRO&amp;CO</b>	3-Dimensional coupled physical-biological model	<a href="http://www.igbp.kva.se/obe/OBE_PS10.pdf">http://www.igbp.kva.se/obe/OBE_PS10.pdf</a>
<b>msnm</b>	mètres sous le niveau de la mer	
<b>NAO</b>	Oscillation Nord-Atlantique (North Atlantic Oscillation)	
<b>NDSC</b>	Network for the Detection of Stratospheric Change	<a href="http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/">http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/</a>
<b>NEC</b>	National Emissions Ceilings	<a href="http://europa.eu.int/comm/environment/air/ceilings.htm">http://europa.eu.int/comm/environment/air/ceilings.htm</a>
<b>NSP</b>	Nuages Stratosphériques Polaires	
<b>NU</b>	Nations Unies	
<b>OMEX</b>	Ocean Margin Exchange	<a href="http://www.pol.ac.uk/bodc/omex/omex.html">http://www.pol.ac.uk/bodc/omex/omex.html</a>
<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale	<a href="http://www.wmo.ch/index-fr.html">http://www.wmo.ch/index-fr.html</a>
<b>ONG</b>	Organisation Non-Gouvernementale	
<b>ORA</b>	Occultation Radiometer	
<b>PADD</b>	Plan d'appui scientifique à une politique de développement durable	<a href="http://www.belspo.be/belspo/home/port_en.stm">http://www.belspo.be/belspo/home/port_en.stm</a>
<b>PC6</b>	Sixième Programme Cadre (UE)	<a href="http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm">http://fp6.cordis.lu/fp6/home.cfm</a>
<b>PDSI</b>	Palmer Drought Severity Index	
<b>PIGB</b>	Programme International Géosphère Biosphère	
<b>PM</b>	Particulate Matter	
<b>PMRC</b>	Programme Mondial de Recherches sur le Climat	
<b>PNE</b>	Productivité Nette des Écosystèmes	
<b>PNUE</b>	Programme des Nations Unies sur l'Environnement	<a href="http://www.unep.org/">http://www.unep.org/</a>
<b>ppbv</b>	parties par milliard (10 <sup>9</sup> ) en volume (parts per billion by volume)	
<b>ppm</b>	parties par million (10 <sup>6</sup> )	
<b>ppmv</b>	parties par million (10 <sup>6</sup> ) en volume (parts per million by volume)	
<b>PPN</b>	Productivité Primaire Nette	
<b>R&amp;D</b>	Recherche et Développement	
<b>RIVM</b>	l'Institut National de Santé Publique et de l'Environnement -Pays-Bas (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu - the Netherlands)	<a href="http://www.rivm.nl/">http://www.rivm.nl/</a>
<b>SESAME</b>	Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment	
<b>SISCO</b>	Silica Retention in the Scheldt continuum and its Impact on Coastal Eutrophication	<a href="http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/ocean/SISCO/frame.html">http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/ocean/SISCO/frame.html</a>
<b>SOC</b>	Carbone Organique du Sol (Soil Organic Carbon)	
<b>SSIJ</b>	Station Scientifique Internationale du Jungfraujoeh	<a href="http://www.ifjungo.ch/">http://www.ifjungo.ch/</a>
<b>TADPA</b>	Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière	<a href="http://www.unece.org/env/lrtap/">http://www.unece.org/env/lrtap/</a>
<b>THESEO</b>	Third European Stratospheric Experiment on Ozone	<a href="http://www.nilu.no/projects/theseo2000/">http://www.nilu.no/projects/theseo2000/</a>
<b>UE</b>	Union Européenne	<a href="http://europa.eu.int/">http://europa.eu.int/</a>
<b>UN</b>	Nations Unies (United Nations)	<a href="http://www.un.org/">http://www.un.org/</a>
<b>UNECE</b>	Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (United Nations Economic Commission for Europe)	<a href="http://www.unece.org/env/lrtap/">http://www.unece.org/env/lrtap/</a>
<b>UNFCCC</b>	Convention Climat (United Nations Framework Convention on Climate Change)	<a href="http://www.unfccc.de/">http://www.unfccc.de/</a>
<b>UV</b>	Ultraviolet	
<b>UV-A</b>	Ultraviolet correspondant aux longueurs d'onde allant de 315-400 nm	
<b>UV-B</b>	Ultraviolet correspondant aux longueurs d'onde allant de 280-315 nm	
<b>UV-C</b>	Ultraviolet correspondant aux longueurs d'onde moins que 280 nm	
<b>UVI</b>	Ultra-Violet Index	
<b>VINTERSOL</b>	Validation of International Satellites and Study of Ozone Loss	
<b>WAIS</b>	Calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest (West Antarctic Ice Sheet)	
<b>WCRP</b>	Programme Mondial de Recherches sur le Climat (World Climate Research Programme)	<a href="http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html">http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html</a>
<b>WMO</b>	Organisation Météorologique Mondiale (World Meteorological Organization)	<a href="http://www.wmo.ch/">http://www.wmo.ch/</a>

## Annexe 3 - Abréviations des substances chimiques et formules chimiques

Abréviations			
Nom	Description	Nom	Description
AOS	Aérosol Organique Secondaire	COVNM	Composés Organiques Volatils Non-méthaniques
CFC	Chlorofluorocarbone	DMS	Diméthylsulfide
CFC-11	CFCI <sub>3</sub> , trichlorofluorométhane	HCFC	Hydrochlorofluorocarbone
CFC-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , dichlorodifluorométhane	HFC	Hydrofluorocarbone
COV	Composés Organiques Volatils	SOC	Carbone Organique du Sol (Soil Organic Carbon)

Formulae	Description	Formulae	Description
Al, Al <sup>3+</sup>	aluminium, ion aluminium	HF	acide fluorhydrique
As	arsenicum	HNO <sub>3</sub>	acide nitrique
Br	brome	HOBr	acide hypobromeux
BrO	monoxyde de brome	HOCl	acide hypochloreux
BrONO <sub>2</sub>	nitrate de brome	HO <sub>x</sub>	oxyde d'hydrogène
C	carbone	Hg, Hg <sup>2+</sup>	mercure élémentaire, ion mercure
Corg	carbone organique	Mg, Mg <sup>2+</sup>	magnésium, ion magnésium
<sup>12</sup> C	carbone radioisotope 12	Mn, Mn <sup>2+</sup>	manganèse, ion manganèse
<sup>13</sup> C	carbone radioisotope 13	N	azote atomique
<sup>14</sup> C	carbone radioisotope 14	Norg	azote organique
δ <sup>13</sup> C	abondance de l'isotope 13 du carbone	N <sub>2</sub>	azote moléculaire
CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	dichlorodifluorométhane (CFC-12)	N <sub>2</sub> O	protoxyde d'azote (gaz hilarant)
CFCI <sub>3</sub>	trichlorofluorométhane (CFC-11)	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	tétraoxyde d'azote
CHClF <sub>2</sub>	chlorodifluorométhane (HCFC-22)	NH <sub>3</sub>	ammoniac
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	méthylchloroforme	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ion ammonium
CCl <sub>4</sub>	tétrachlorure de carbone	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	nitrate d'ammonium
CH <sub>4</sub>	méthane	NO	monoxyde d'azote (oxyde nitrique)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	acétylène	NO <sub>2</sub>	dioxyde d'azote (nitrite)
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	éthane	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nitrate
CH <sub>2</sub> O (HCHO)	formaldéhyde	NO <sub>x</sub>	oxydes d'azote
CO	oxyde de carbone	Ni	nickel
CO <sub>2</sub>	dioxyde de carbone (gaz carbonique)	O	oxygène atomique
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	carbonate	<sup>18</sup> O	abondance de isotope 18 de l'oxygène
COF <sub>2</sub>	fluorure de carbonyle	O <sub>2</sub>	oxygène moléculaire
COS	oxysulfure de carbone	O <sub>3</sub>	ozone
Ca, Ca <sup>2+</sup>	calcium, ion calcium	OCIO	dioxyde de chlore
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium	OH <sup>·</sup>	(radical) hydroxyle
Cd	cadmium	P	phosphore
Cl, Cl <sup>-</sup>	chlore atomique, ion chlore	Porg	phosphore organique
ClO	monoxyde de chlore	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	ion phosphate
ClO <sub>x</sub>	oxyde de chlore	Pb	plomb
ClONO <sub>2</sub>	nitrate de chlore	<sup>210</sup> Pb	plomb radioisotope 210
Cl <sub>2</sub>	chlore	ROOH	hydroperoxyde
Cl <sub>y</sub>	chlore inorganique	RO <sub>2</sub>	radical peroxyde
Fe	fer	S	soufre
H, H <sup>+</sup>	hydrogène, ion hydrogène	SF <sub>6</sub>	hexafluorure de soufre
H <sub>2</sub> O	eau	SO <sub>2</sub>	dioxyde de soufre
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	peroxyde d'hydrogène	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ion sulfate
H <sub>2</sub> S	sulfure hydrogène	Si, Si <sup>4+</sup>	silice, ion silice
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	acide sulfurique	SiO <sub>2</sub>	dioxyde de silicium
HCl	acide chlorhydrique (chlorure d'hydrogène)	Th	thorium
HCN	acide cyanhydrique	<sup>234</sup> Th	thorium radioisotope 234
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ion bicarbonate	Zn	zinc
HDO	eau semi-lourde		

<b>Système Internationale d'Unités (SI)</b>			
<b>Grandeur</b>	<b>Unité</b>	<b>Symbole</b>	
quantité de matière	mole	mol	
longueur	mètre	m	
masse	kilogramme	kg	
temps	seconde	s	
<b>Prefixes des multiples et des sous-multiples du SI</b>			
<b>Facteur</b>	<b>Prefixe</b>	<b>Symbole</b>	
10 <sup>-1</sup>	déci	d	
10 <sup>-2</sup>	centi	c	
10 <sup>-3</sup>	milli	m	
10 <sup>-6</sup>	micro	μ	
10 <sup>-9</sup>	nano	n	
10 <sup>-12</sup>	pico	p	
10 <sup>-15</sup>	femto	t	
<b>Facteur</b>	<b>Prefixe</b>	<b>Symbole</b>	
10	déca	da	
10 <sup>2</sup>	hecto	h	
10 <sup>3</sup>	kilo	k	
10 <sup>6</sup>	méga	M	
10 <sup>9</sup>	giga	G	
10 <sup>12</sup>	téra	T	
10 <sup>15</sup>	peta	P	
<b>Unités dérivées du SI et autres</b>			
<b>Grandeur</b>	<b>Unité</b>	<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
densité de colonne	Dobson Unit	DU	2,687x10 <sup>16</sup> molécules d'ozone par cm <sup>2</sup>
indicateur de l'acidité	potentiel hydrogène	pH	
longueur	micron	μm	
masse	gramme	g	
masse	tonne	t	
pression	bar	b	
puissance, flux énergétique	watt	W	m <sup>2</sup> .kg.s <sup>-3</sup>
quantité	parties par million (10 <sup>6</sup> )	ppm	
superficie	mètre carré	m <sup>2</sup>	
superficie	hectare	ha	10.000 m <sup>2</sup>
température	degré Celcius	°C	
temps	année	yr	
volume	mètre cube	m <sup>3</sup>	
volume	litre	l	
volume	parties par milliard (10 <sup>9</sup> ) en volume	ppbv	
volume	parties par million (10 <sup>6</sup> ) en volume	ppmv	
<b>Symboles spéciaux</b>			
<b>Grandeur</b>	<b>Unité</b>	<b>Symbole</b>	
longueur	diamètre	∅	

### Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC):

**1995.** IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995 (IPCC-SAR).

**1995.** Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Bruce, J.P., Lee, H., Callander, B.A. and Haites, E.F. (ed.). Cambridge University Press, UK. ISBN 0521559626, 9780521559621.

**1996.** Lignes Directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - version révisée 1996. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callender, B.A. (ed.). IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/french.htm>).

**2000.** Emissions Scenarios (IPCC-SRES). Nakicenovic, N. and Swart, R. (ed.). Cambridge University Press. Cambridge, UK. ISBN 0 521 80493 0.

**2000.** Scénarios d'émissions (GIEC-SRES). Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC. Résumé à l'intention des décideurs. (<http://www.ipcc.ch/pub/sres-f.pdf>)

**2001.** IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (IPCC-TAR):

Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0521 01495 6.

Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0 521 01500 6.

Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse (GIEC-SYR). Contribution des Groupes de travail I, II, et III au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Watson, R.T. et al (ed.). (<http://www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/>).

**Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen, M. and van der Plicht, J., 1995.** Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, pp. 666-670.

**Pussinen, A., Schelhaas, M.J., Verkaik, E., Nabuurs, G.J., 2000.** Manual of the EFISCEN Model. European Forest Institute, Joensuu, Finland. (internal report).

**Putaud, J.-P., Baltensperger, U., Brüggemann, E., Facchini, M.-C., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., Harrison, R.M., Jones, A.M., Laj, P., Maenhaut, W., Mihalopoulos, N., Müller, K., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Spindler, G., ten Brink, H., Tunved, P., Van Dingenen, R., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A., Wählin, P., Raes, F. 2002.** A European aerosol phenomenology. Physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, Joint Research Centre, European Commission, Report nr. EUR 20411 EN (2002).

La recherche belge sur le global change 1990 – 2002: Synthèse du rapport d'évaluation et d'intégration

Editeurs principaux:

G. den Ouden – gerard.den.ouden@telenet.be – tel: +32-2-7676803

M. Vanderstraeten – Politique scientifique fédérale– vdst@belspo.be – tel: +32-2-2383610

Journaliste scientifique:

P. Raeymaekers, LyRaGen

**n° de dépôt D/2004/1191/50**

Mise en page : Mainpress

Traduction : Missing Link

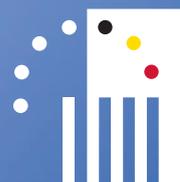
Support et révision : E. Bourgeois (Politique scientifique fédérale), R. Ceulemans (UA-PLECO), D. Cox (Politique scientifique fédérale), M. De Mazière (BIRA), N. Henry (Politique scientifique fédérale), Ph. Marbaix (UCL-ASTR), R. Mattheeussen (UA-PLECO), F. Monteny (Politique scientifique fédérale), I. Nijs (UA-PLECO), M. Stellandre (Politique scientifique fédérale), M. Van Cauwenberghe (Politique scientifique fédérale), J.-Cl. Vandenheede (Politique scientifique fédérale), J.-P. Vanderborcht (ULB-OCEAN), A. Van Der Werf (Politique scientifique fédérale), J.-P. van Ypersele (UCL-ASTR), R. Wollast (ULB-OCEAN), R. Zander (ULg-GIRPAS).

Imprimé par Van In, Lier

Une édition de la Politique scientifique fédérale, 2004

La maximisation du potentiel scientifique et culturel belge au profit des décideurs politiques, des scientifiques, des industriels et des citoyens: 'une politique pour et par la science' constitue la mission de la Politique scientifique fédérale. Tout extrait de la présente publication peut être reproduit pour autant que le but de la reproduction est de nature non commerciale et s'inscrit dans le cadre de la mission susvisée de la Politique scientifique fédérale. L'Etat belge ne peut être tenu pour responsable de tout dommage éventuel qui résulterait de l'usage d'informations qui figurent dans cette publication.

POLITIQUE SCIENTIFIQUE FEDERALE



Wetenschapsstraat 8 rue de la Science  
Brussel 1000 Bruxelles  
[www.belspo.be](http://www.belspo.be)