



LE REMÈDE NATUREL ?

LE RÔLE DES ÉCOSYSTÈMES DANS L'ATTÉNUATION
DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

UNE ÉVALUATION RAPIDE DU PNUE





Votre planète a besoin de **VOUS!**

**UNis contre
le changement climatique**  **PNUE**

JOURNÉE MONDIALE DE L'ENVIRONNEMENT, 5 Juin 2009

Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., van der Heijden, G., Jenkins, M., Manning, P. 2009. *Le remède naturel ? Le rôle des écosystèmes dans l'atténuation des changements climatiques*. Une évaluation rapide du PNUE. Programme des Nations Unies pour l'environnement, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni.

ISBN : 978-92-807-3050-0

Job number : DEW/1210/CA

Version française : Banson

Imprimé par The Lavenham Press (Royaume-Uni)

Avertissement

Le contenu de ce rapport ne reflète pas nécessairement l'opinion ou la politique du PNUE, des organisations participantes ou des rédacteurs. Les désignations employées ou les présentations faites ne sous-entendent aucunement l'expression d'une quelconque opinion de la part du PNUE ou des organisations participantes sur le statut légal d'un pays, d'un territoire, d'une ville ou d'une région, de son autorité, de la délimitation de ses frontières ou limites, de la désignation de son nom ou de ses allégeances.

LE REMÈDE NATUREL ?

LE RÔLE DES ÉCOSYSTÈMES DANS L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



UNE ÉVALUATION RAPIDE DU PNUE

Kate Trumper
Monika Bertzky
Barney Dickson
Geertje van der Heijden
Martin Jenkins
Pete Manning

PRÉFACE

« Actuellement, au lieu de maintenir et d'améliorer les capacités de la nature à piéger et à stocker le carbone, les écosystèmes du monde s'appauvrissent à une vitesse alarmante. »



LE PIÉGEAGE ET STOCKAGE DU CARBONE – LA MÉTHODE NATURELLE

Le défi urgent et considérable que représentent les changements climatiques a, entre autres, incité les gouvernements à accorder un intérêt croissant au piégeage et stockage du carbone produit par les centrales électriques. Des dizaines de milliards de dollars sont aujourd'hui investis dans la mise au point d'une technologie visant à extraire les gaz à effet de serre des cheminées d'usine et à les enfouir en profondeur sous terre.

Dans ce rapport d'évaluation rapide commandé par le PNUMA, nous présentons le piégeage et stockage du carbone sous l'angle du concept d'économie verte, en soulignant les possibilités offertes par les systèmes naturels – systèmes qui vont des forêts aux prairies et qui assurent cette fonction d'une manière éprouvée depuis des millénaires.

Actuellement, au lieu de maintenir et d'améliorer les capacités de la nature à piéger et à stocker le carbone, les écosystèmes du monde s'appauvrissent à une vitesse alarmante.

Quelque 20 pour cent des émissions de gaz à effet de serre proviennent de l'abattage et du brûlage des forêts, les vastes réserves de carbone contenues dans les tourbières et la toundra sont menacées par l'assèchement et le dégel, et de nombreuses terres agricoles ont été dégradées ou se dégradent.

La préservation et la restitution des stocks de carbone dans ces trois systèmes – à savoir les forêts, les tourbières et les terres agricoles – pourraient, au cours des prochaines décennies, réduire de bien plus de 50 gigatonnes les émissions de carbone, qui s'échapperaient autrement dans l'atmosphère. D'autres systèmes, comme les prairies et les zones côtières (telles que les mangroves), sont également capables de jouer un rôle.

Les avantages que présentent de tels investissements sont multiples, allant de l'amélioration du niveau de vie et des moyens de subsistance, ainsi que de la création d'emplois dans des secteurs comme la conservation, la gestion, la surveillance et la réhabilitation des ressources

naturelles, à la stabilisation de sols précieux, en passant par l'inversement de la tendance concernant le taux de perte de biodiversité et par l'amélioration des approvisionnements en eau.

2009 verra l'engagement de négociations décisives portant sur la manière de lutter contre les changements climatiques au niveau mondial lorsque les gouvernements se rassembleront à Copenhague, au Danemark, en décembre prochain pour assister à la très importante réunion de la Convention des Nations Unies sur les changements climatiques.

L'investissement de 3 milliards de dollars dans des plans de relance visant à faciliter le redressement de l'économie mondiale offre l'occasion de sceller un accord significatif sur le changement climatique et peut-être une chance unique d'accélérer la transition vers une économie verte à faible émission de carbone – une économie qui pourra permettre de répondre à de multiples enjeux : des crises alimentaires et pétrolières aux changements climatiques et à la rareté naissante des ressources naturelles.

Il y a tout lieu d'être optimiste que les gouvernements réunis à Copenhague passeront un accord aux termes duquel ils commenceront à payer les pays en développement pour qu'ils réduisent les émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts (REDD).

Ce rapport, préparé pour la Journée mondiale de l'environnement qui s'est déroulée le 5 juin, met en lumière un potentiel bien plus important sur un ensemble plus vaste de systèmes naturels – non seulement ce rapport met en lumière la possibilité de lutter contre les changements climatiques et d'accroître la résistance des économies vulnérables à ces changements, mais il démontre également la possibilité d'accélérer le développement durable et d'atteindre les Objectifs du Millénaire pour le développement en matière de pauvreté.

Achim Steiner
Sous-secrétaire général de l'ONU et directeur exécutif du PNUMA

SOMMAIRE

4 PRÉFACE
6 NOTE DE SYNTHÈSE

9 INTRODUCTION

19 LA GESTION DU CARBONE DANS LES
ÉCOSYSTÈMES NATURELS

35 LA GESTION DU CARBONE DANS LES
ÉCOSYSTÈMES DOMINÉS PAR L'HOMME

42 LES INCIDENCES DES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES FUTURS SUR LE CARBONE
STOCKÉ DANS LES ÉCOSYSTÈMES

45 POSSIBILITÉS ET ENJEUX

54 CONCLUSIONS

56 GLOSSAIRE
58 COLLABORATEURS
59 RÉFÉRENCES

Le PNUE promeut des pratiques respectueuses de l'environnement au sein de ses propres activités et à l'échelle mondiale. Le présent ouvrage est imprimé sur du papier certifié FSC. Les encres sont végétales et les enduits à base d'eau. Notre politique relative à la distribution de ce document vise à réduire l'empreinte carbone du PNUE.

NOTE DE SYNTHÈSE

Il nous faudra réduire de manière très considérable nos émissions de gaz à effet de serre si nous voulons éviter les pires conséquences des changements climatiques mondiaux. Le présent rapport décrit la contribution vitale que la gestion des écosystèmes peut et doit apporter à ces efforts.

Pour maintenir la hausse moyenne des températures à moins de 2°C, les émissions mondiales doivent être réduites de 85 % par rapport aux niveaux de 2000 d'ici 2050 et atteindre leur point culminant en 2015 au plus tard, selon le GIEC.

Non seulement le rythme des rejets de gaz à effet de serre ne ralentit pas, mais il s'accélère. Selon les estimations les plus récentes, les activités humaines sont actuellement responsables d'émissions mondiales annuelles de carbone s'élevant à environ 10 Gt, dont 1,5 Gt environ proviennent des changements d'affectation des terres et le reste de l'utilisation de combustibles fossiles et de la production de ciment (Canadell *et al.* 2007). Cela a conduit à un taux d'augmentation moyen annuel des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère approchant les 2 ppm pour la période 1995–2005, contre environ 1,25 ppm pour la période 1960–1995 (IPCC 2007b).

Des efforts importants devront être déployés pour inverser cette tendance, tâche qui ne sera possible que si nous nous attaquons aux pertes de carbone provenant d'écosystèmes tels que les forêts et les tourbières. Une gestion écosystémique des stocks de carbone peut non seulement permettre de réduire les émissions de carbone, mais peut également permettre de réduire activement la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. La restitution d'une partie des quantités importantes de carbone perdues par les sols, en particulier dans les terres agricoles et les zones arides, offre les meilleures possibilités en la matière. Rendre l'agriculture neutre en carbone d'ici 2030 est un objectif ambitieux, mais réalisable. Actuellement, ce remède naturel est la seule option possible pour éliminer le carbone atmosphérique dans son ensemble; les technologies de piégeage et de stockage du carbone ne sont valables que pour des sources de carbone ponctuelles concentrées, telles que les centrales électriques.

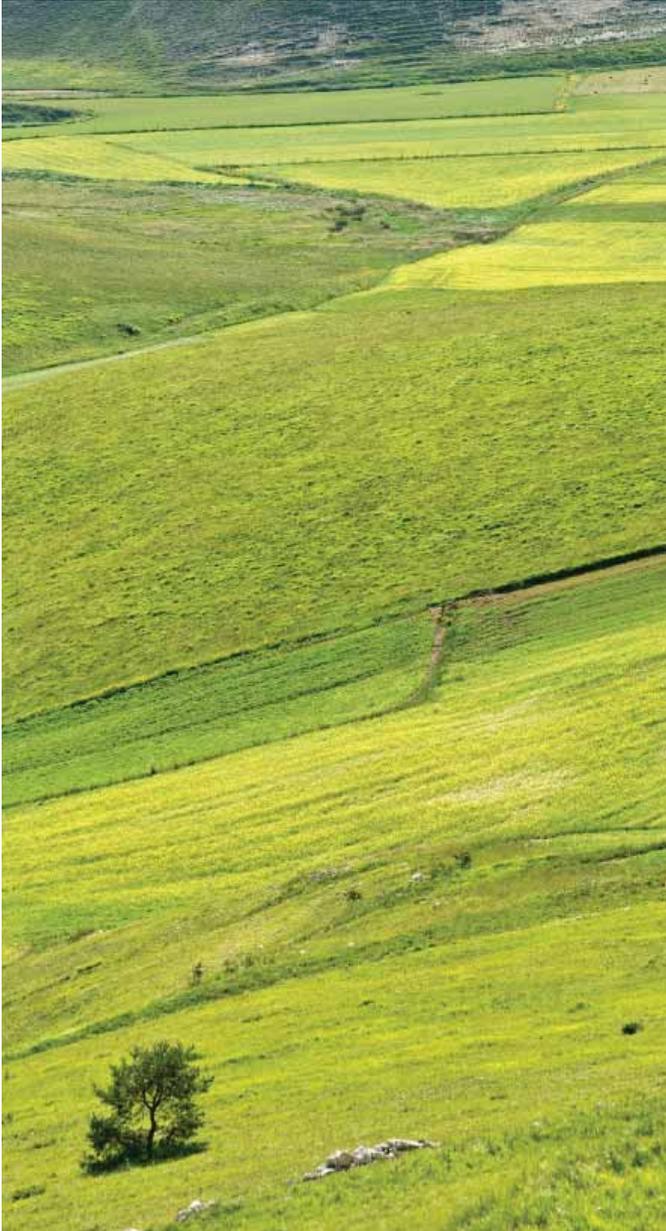
De plus, une gestion écosystémique du carbone peut être une méthode économiquement rationnelle. Sans les subventions per-

verses qui favorisent des utilisations différentes des terres, le coût d'opportunité de la réduction du déboisement et du rétablissement des tourbières peut être faible. Globalement, les coûts sont modestes par rapport aux options d'énergie propre.

Dans de nombreux cas, les possibilités de réaliser d'autres objectifs sociétaux, parallèlement au stockage du carbone, sont énormes – notamment au niveau de l'amélioration de la fertilité des terres agricoles, de la création de nouveaux emplois et de nouvelles sources de revenus, et de la contribution à la conservation de la biodiversité. Une meilleure compréhension des avantages et des coûts de la gestion écosystémique des stocks de carbone est nécessaire pour éclairer la prise de décisions concernant l'utilisation des terres.

Il existe des risques et des incertitudes qui doivent être pris en compte. Certaines réserves de carbone stockées dans les écosystèmes peuvent être perdues sous l'effet des changements climatiques et sous l'effet du changement d'affectation des terres. Toutes les réserves, à l'exception peut-être des tourbières, finiront de plus par être saturées. Des incertitudes subsistent concernant les quantités de carbone piégées par différents systèmes de gestion et l'on constate une variabilité importante d'une zone à l'autre. Par conséquent, un important travail reste à faire afin de déterminer la meilleure manière de gérer et de surveiller les réserves de carbone. Bien que les forêts, l'agriculture et les tourbières aient été mises en avant comme priorités urgentes, le rôle des autres écosystèmes est également important et doit être pris en compte.

La mise en œuvre de politiques généralisées de gestion écosystémique des stocks de carbone présente de grandes difficultés, parce qu'elle soulève d'importantes questions d'ordre institutionnel et réglementaire et suscite des dilemmes socio-économiques et politiques complexes. Pour être efficace, toute stratégie devra notamment concilier les moyens de subsistance ruraux et les politiques de gestion du carbone qui pourraient menacer ces moyens



de subsistance. Il est souvent difficile de veiller à ce que les bénéfices obtenus par une bonne gestion du carbone parviennent aux communautés concernées. Il est crucial de ne pas perdre de vue les intérêts des populations rurales pauvres et des autochtones dans l'empressement à garantir des gains de carbone.

Les principaux messages à retenir du présent rapport sont les suivants :

- Il est essentiel de gérer le carbone stocké dans les systèmes biologiques de façon à préserver les réserves existantes de carbone, à réduire les émissions et à maximiser le potentiel des zones naturelles et agricoles quant à la réduction de la concentration de carbone dans l'atmosphère.
- Les systèmes prioritaires sont les forêts tropicales, les tourbières et l'agriculture. La réduction de 50 % des taux de déboisement d'ici 2050, et leur maintien à ce niveau jusqu'en 2100, permettraient d'éviter l'émission directe de volumes de carbone pouvant atteindre jusqu'à 50 Gt au cours du siècle actuel, soit l'équivalent de 12 % des réductions nécessaires pour que les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère restent en dessous de 450 ppm.
- La dégradation des tourbières est responsable d'émissions de carbone pouvant atteindre 0,8 Gt par an, dont une grande partie pourrait être évitée si ces premières étaient restaurées. Le secteur agricole pourrait devenir essentiellement neutre en carbone d'ici 2030 si l'adoption des meilleures pratiques de gestion était généralisée (équivalant à 2 Gt de carbone par an).
- Il est impératif que les politiques d'atténuation des changements climatiques s'appuient sur les meilleurs travaux scientifiques disponibles concernant le carbone stocké dans les écosystèmes, et que la prise de décisions soit guidée par les coûts et avantages globaux de la gestion du carbone.
- L'élaboration de politiques permettant de réaliser ces objectifs constitue un défi : il faudra veiller à ce que les populations locales et autochtones ne soient pas désavantagées, et à évaluer les possibilités d'obtenir des co-bénéfices en faveur de la biodiversité et des services écosystémiques. Les zones arides, notamment, offrent des possibilités de combiner la gestion du carbone et la restauration des terres.
- L'adoption, au titre de la CCNUCC, d'un cadre d'action global portant sur la gestion du carbone des écosystèmes constituerait un pas en avant très significatif.



INTRODUCTION

LA NÉCESSITÉ DE GÉRER LE CARBONE DES ÉCOSYSTÈMES

Le climat terrestre dépend de manière cruciale de la composition de l'atmosphère, et notamment de la concentration de gaz à effet de serre qui augmentent la quantité de chaleur solaire retenue par la Terre. Parmi ces gaz, les deux plus importants sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Intervenant dans le cycle du carbone, ces deux gaz sont naturellement présents dans l'atmosphère, mais leur concentration a considérablement augmenté en conséquence des activités humaines, tout particulièrement depuis l'industrialisation. L'atmosphère contient aujourd'hui plus de dioxyde de carbone que jamais durant les 650 000 dernières années. En 2006, la concentration globale moyenne de CO₂ dans l'atmosphère s'élevait à 381 parties par millions (ppm), contre 280 ppm au début de la révolution industrielle, vers 1750. La rapidité avec laquelle la concentration augmente n'a jamais été aussi élevée depuis la mise en place d'un suivi continu en 1959 (Canadell *et al.* 2007).

Note sur les unités et les quantités

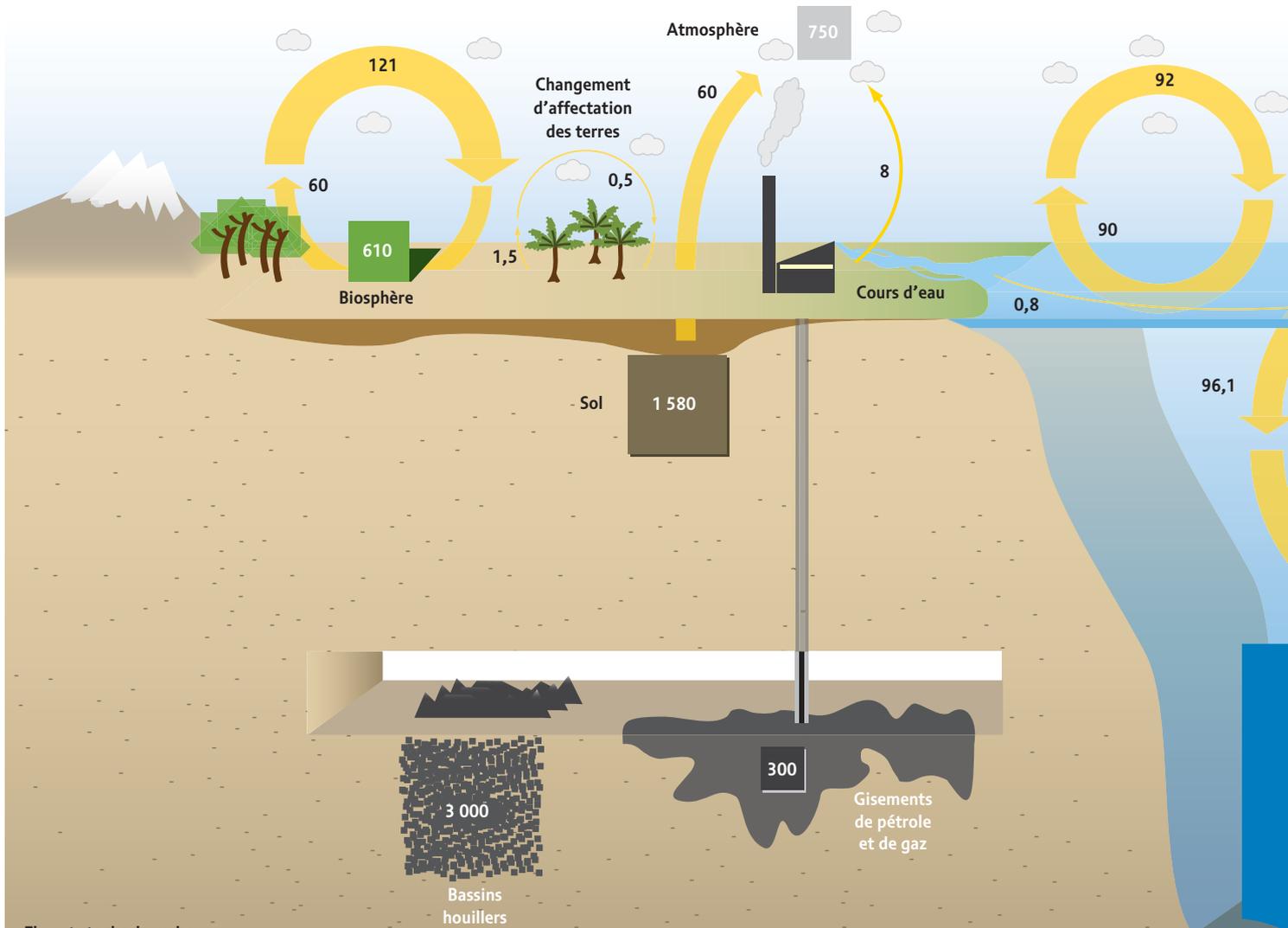
1 gigatonne de carbone (Gt C) = 109 tonnes of carbone (t C). Carbone (C) ou dioxyde de carbone (CO₂) ? C'est lorsque le carbone est présent dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique qu'il a un effet sur le changement climatique. Toutefois, comme c'est le carbone qui suit un cycle dans l'atmosphère, dans les organismes vivants, dans les océans et dans les sols, les quantités indiquées tout au long de ce rapport s'appliquent au carbone. Une tonne de carbone équivaut à 3,67 tonnes de dioxyde de carbone. Le cycle global du carbone (voir page suivante) montre les différents états par lequel passe le carbone et comment il est stocké dans les écosystèmes terrestres et marins, ainsi que dans l'atmosphère.

L'équivalent-CO₂ (CO₂e) est une mesure du potentiel de réchauffement global qui permet de comparer les différents gaz à effet de serre avec une référence commune : celle du dioxyde de carbone. Par exemple, le méthane est un gaz à effet de serre environ 25 fois plus puissant que le dioxyde de carbone, et par conséquent une tonne de méthane correspond à 25 tonnes de CO₂e.

Selon le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), pour limiter la hausse globale de la température entre 2 et 2,4°C, et par conséquent pour éviter les pires conséquences des changements climatiques, il faudrait que les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère se stabilisent entre 445 et 490 ppm d'équivalent-CO₂ (voir l'encadré) ou moins (IPCC 2007b). Comme l'atmosphère contient actuellement environ 430 ppm de CO₂e, les augmentations futures devront être limitées entre 15 et 60 ppm (Cowie *et al.* 2007 ; Eliasch 2008).

LE CARBONE DANS LES ORGANISMES VIVANTS

Les systèmes vivants jouent un rôle capital dans le cycle du carbone. Les organismes photosynthétiques – pour la plupart des plantes terrestres et divers types d'algues et de bactéries marines – utilisent soit le dioxyde de carbone de l'atmosphère, soit celui qui se trouve dissous dans l'eau de mer, comme élément de base pour la production de composés carbonés organiques complexes qui sont essentiels à la vie. La vaste majorité des organismes, y compris les organismes photosynthétiques, produisent du dioxyde de carbone durant la respiration (décomposition des composés carbonés organiques pour libérer de l'énergie qui est utilisée par les cellules vivantes). La



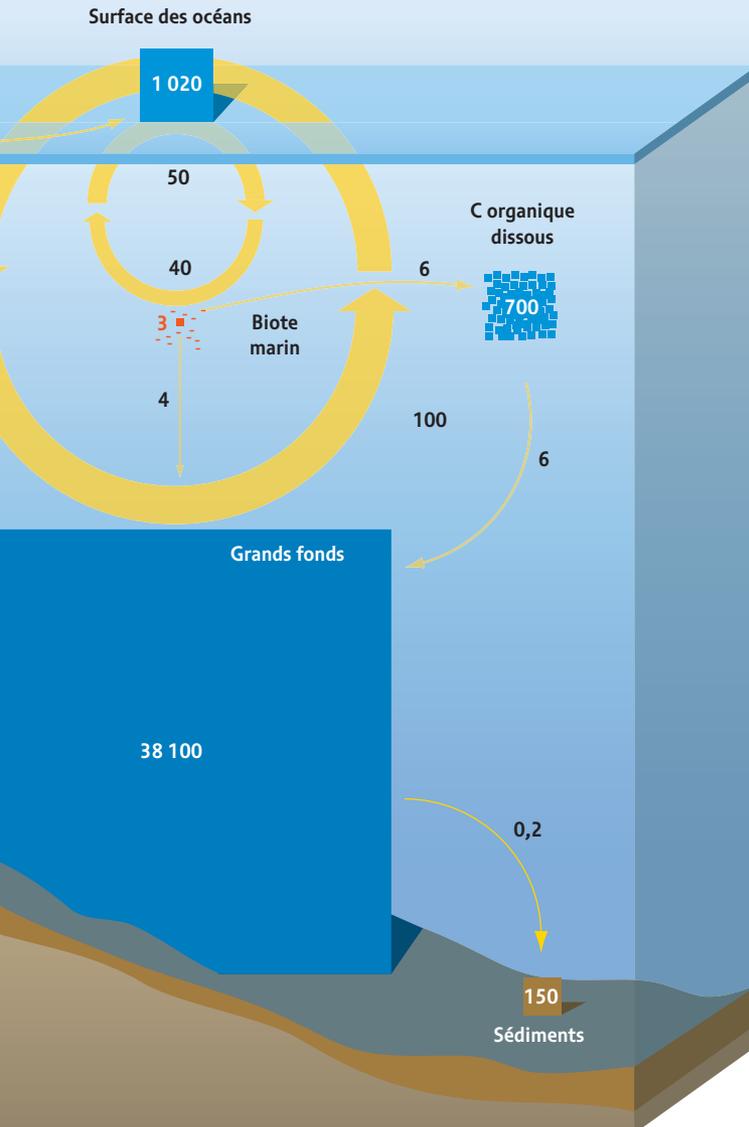
Flux et stocks de carbone

1 020 Stockage : gigatonnes de C

8 Flux : gigatonnes de C par an

Source : IPCC 2001.

Cycle du carbone



combustion des composés carbonés dégage également du dioxyde de carbone. Du méthane est libéré au cours de la respiration par certains types de microbes qui vivent dans des environnements à faible teneur en oxygène, tels que les marais stagnants et les intestins des ruminants, dont les bovins, les moutons et les chèvres. Le méthane présent dans l'atmosphère s'oxyde à la longue pour former du dioxyde de carbone et de l'eau.

Dans la biosphère, une quantité importante de carbone est de fait « stockée » dans les organismes vivants (traditionnellement désignés par le terme « biomasse ») et dans leurs restes morts, non décomposés ou partiellement décomposés, se trouvant dans le sol, dans les fonds marins ou dans les roches sédimentaires (les combustibles fossiles ne sont autres, en fait, que les restes d'organismes morts depuis longtemps).

Lorsque la quantité de carbone atmosphérique fixée au cours de la photosynthèse est équivalente à la quantité libérée dans l'atmosphère par les organismes qui respirent et à la combustion du carbone organique, la partie vivante ou biotique du cycle du carbone est alors en équilibre et les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère devraient rester relativement constantes (bien que d'autres parties du cycle du carbone, notamment l'activité volcanique, de même que la dissolution et la précipitation du carbone inorganique dans l'eau, influent sur leur concentration).

Souvent, cependant, le système peut ne pas être en équilibre, tout au moins localement. Une zone peut être un puits de carbone si le carbone s'y accumule plus vite qu'il n'y est libéré. Inversement, une zone est une source de carbone si le rythme de production de carbone atmosphérique à partir de celle-ci est supérieur au rythme auquel il est fixé à cet endroit. Dans les systèmes terrestres, la question de savoir si une zone est un puits ou une source dépend très largement de l'équilibre entre le taux de photosynthèse et le taux combiné de respiration et de combustion.

La quantité de carbone stockée, la forme sous laquelle il est stocké et le taux de renouvellement – c'est-à-dire le rythme auquel le carbone est fixé organiquement ou libéré sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane – varient considérablement d'un lieu à l'autre. Ces éléments dépendent de diverses conditions, dont le climat (principalement la température et, sur terre, les précipitations) et les disponibilités en éléments nutritifs sont les plus importantes. Les changements climatiques auront eux-mêmes des incidences sur la distribution naturelle des biomes et des écosystèmes et sur le cycle du carbone, tant au niveau mondial que local.

RÉPERCUSSIONS DES ACTIVITÉS HUMAINES SUR LE CYCLE DU CARBONE

Les activités humaines influent sur le cycle du carbone de différentes manières. Le brûlage de vastes quantités de combustibles fossiles peut libérer dans l'atmosphère du carbone organique qui était stocké depuis longtemps. La fabrication de ciment produit du carbone atmosphérique résultant de la combustion de carbonate de calcium. Par ailleurs, un grand nombre de changements d'affectation des terres a tendance à faire augmenter la quantité de carbone atmosphérique; la conversion d'écosystèmes naturels en zones destinées aux activités humaines (agriculture, pâturages, terrains à bâtir, etc.) entraîne généralement la transformation d'une zone stockant des quantités relativement élevées de carbone (souvent des forêts ou des terres boisées) en une zone en stockant des quantités inférieures. L'excédent de carbone est souvent libéré dans l'atmosphère par brûlage. Du point de vue de la régulation du climat, l'augmentation de la production animale, et notamment de l'élevage de ruminants, exerce un effet particulièrement marqué puisqu'elle augmente la production de méthane, gaz à effet de serre extrêmement puissant.

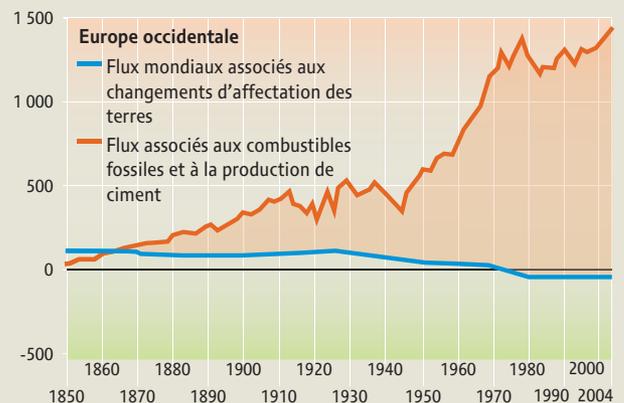
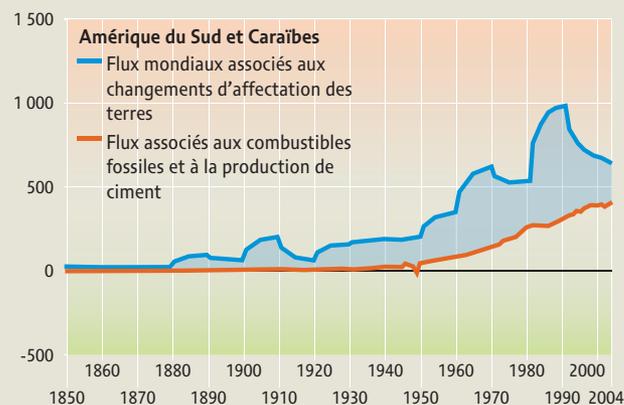
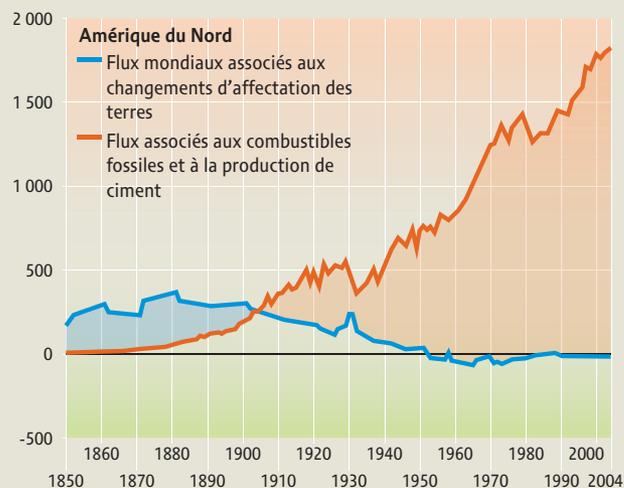
Historiquement, il est estimé que depuis 1850, près de 500 Gt de carbone auraient été libérées au total dans l'atmosphère en conséquence des activités humaines, les trois quarts environ en conséquence de l'utilisation de combustibles fossiles et la plus grande partie du reste à cause de changements d'affectation des terres, 5 % environ étant imputés à la production de ciment. Sur ce total, on estime qu'environ 150 Gt ont été absorbées par les océans, entre 120 et 130 Gt par les systèmes terrestres et que le reste est demeuré dans l'atmosphère (Houghton 2007).

Les estimations les plus récentes indiquent que les activités humaines sont actuellement responsables d'émissions annuelles mondiales de carbone atteignant environ 10 Gt, dont 1,5 Gt résultant de changements d'affectation des terres et le reste provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et de la fabrication de ciment (Canadell *et al.* 2007). Cela a conduit à un taux d'augmentation moyen annuel des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère très légèrement inférieur à 2 ppm pour la période 1995-2005, contre environ 1,25 ppm pour la période 1960-1995 (IPCC 2007b).

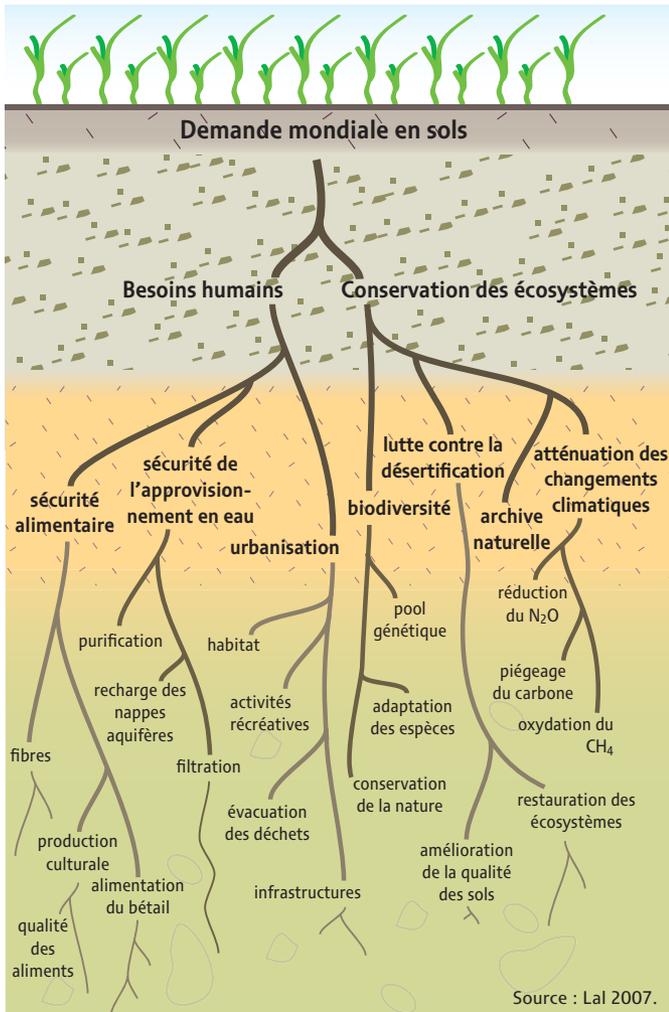
STABILISATION OU RÉDUCTION DE LA QUANTITÉ DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUE

Il existe essentiellement deux façons de stabiliser ou de réduire la quantité de carbone atmosphérique : en réduisant le taux d'émission, ou bien en augmentant le taux d'absorption. Pour réussir,

Historique des émissions de CO₂ par région
Millions de tonnes



Source : Carbon Dioxide Information Analysis Center 2009.



toute stratégie devra presque certainement faire appel à ces deux méthodes, et exigera la participation de tous les secteurs (Cowie *et al.* 2007; Eliasch 2008).

Il est possible de réduire les émissions en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles, la fabrication de ciment ou les changements adverses d'affectation des terres (ceux qui conduisent à un rejet de carbone), ou en combinant ces mesures.

Le dioxyde de carbone peut être éliminé de l'atmosphère mécaniquement ou par des moyens biologiques. L'élimination mécanique, désignée sous le nom de piégeage et stockage du (dioxyde de)

carbone (PSC), nécessite le captage des émissions de CO₂ produites par les combustibles fossiles aux sources concentrées, telles que les centrales électriques et les cimenteries, et leur stockage dans des formations géologiques, telles que des champs pétrolifères épuisés (IPCC 2005). Les mécanismes biologiques exploitent la capacité, décrite ci-dessus, des organismes photosynthétiques à piéger le CO₂ et à le stocker sous forme de biomasse ou de matière organique dans des sédiments de divers types.

Ainsi, la gestion biologique du carbone comme moyen de lutter contre les changements climatiques comprend essentiellement deux composantes : la réduction des émissions provenant des systèmes biologiques et l'augmentation des capacités de ces derniers à stocker le carbone. Cela peut se réaliser de trois manières différentes : les réserves existantes pourraient être protégées et le taux de perte actuel, qui est élevé, réduit ; les réserves épuisées depuis très longtemps pourraient être reconstituées en restaurant les écosystèmes et les sols ; et, potentiellement, de nouvelles réserves pourraient être créées en favorisant un plus grand stockage de carbone dans les zones qui en renferment peu actuellement, par exemple par le biais du reboisement. Dans le présent rapport, nous examinons les rôles que les écosystèmes naturels et ceux qui sont dominés par l'Homme peuvent jouer dans la réduction des émissions de carbone ainsi que dans la réduction de la concentration de carbone dans l'atmosphère, ce dernier aspect étant désigné par le terme « piégeage biologique ».

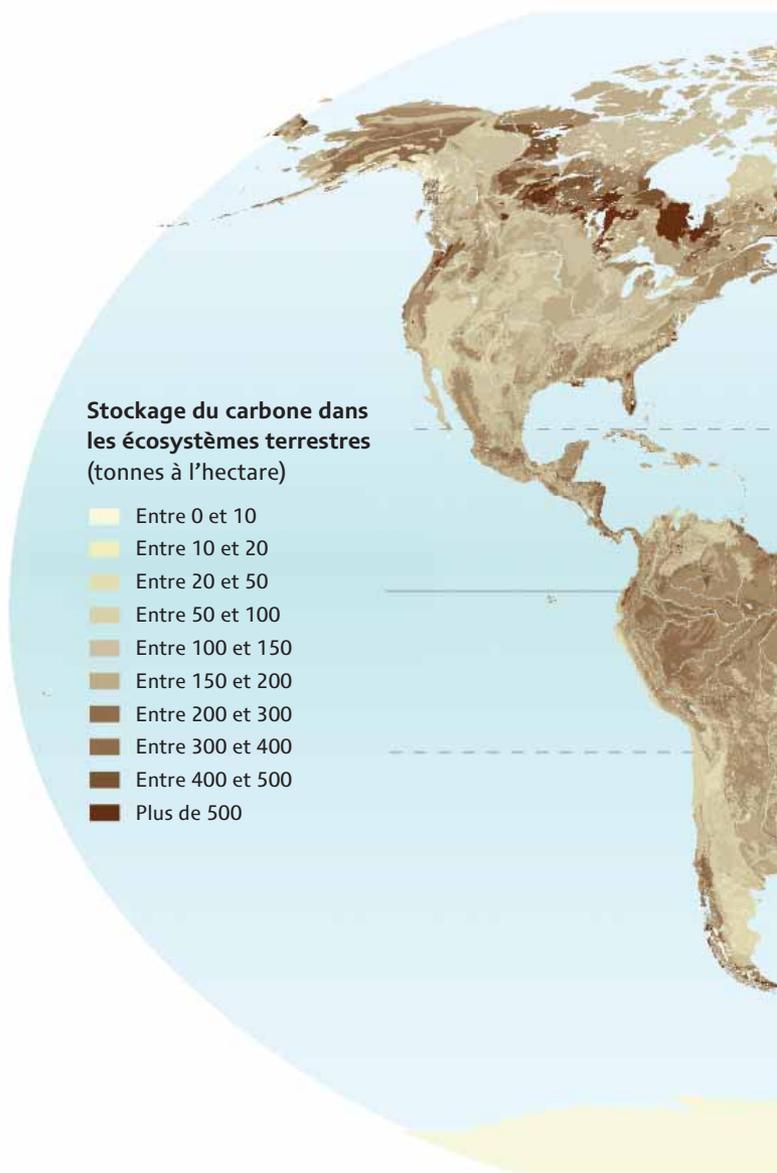
Si elle est bien conçue, une approche biologique de la gestion du carbone peut offrir d'autres avantages. Les écosystèmes naturels, notamment les forêts, sont souvent riches à la fois en biodiversité et en carbone ; le fait de protéger l'un peut permettre de veiller sur l'autre (UNEP-WCMC 2008; Miles & Kapos 2008). Les écosystèmes peuvent également offrir toute une gamme d'autres services tels que la stabilisation des sols, l'amélioration du climat local et le recyclage des déchets. Une bonne gestion de ces écosystèmes et des systèmes agricoles peut porter ses fruits en termes de disponibilités en eau et en éléments nutritifs et du renversement de la dégradation des terres, cela ayant des conséquences positives sur les moyens de subsistance et cela permettant également de réduire la pauvreté (Lal 2007; Smith *et al.* 2007a).

Cela ne sous-entend pas néanmoins que la gestion du carbone des écosystèmes est simple. Elle présente de sérieuses difficultés au niveau technique, social et économique, de même que certains risques de conséquences involontaires. Le présent rapport examine l'état des connaissances en ce qui concerne les possibilités qu'elle offre et les enjeux qu'elle représente.

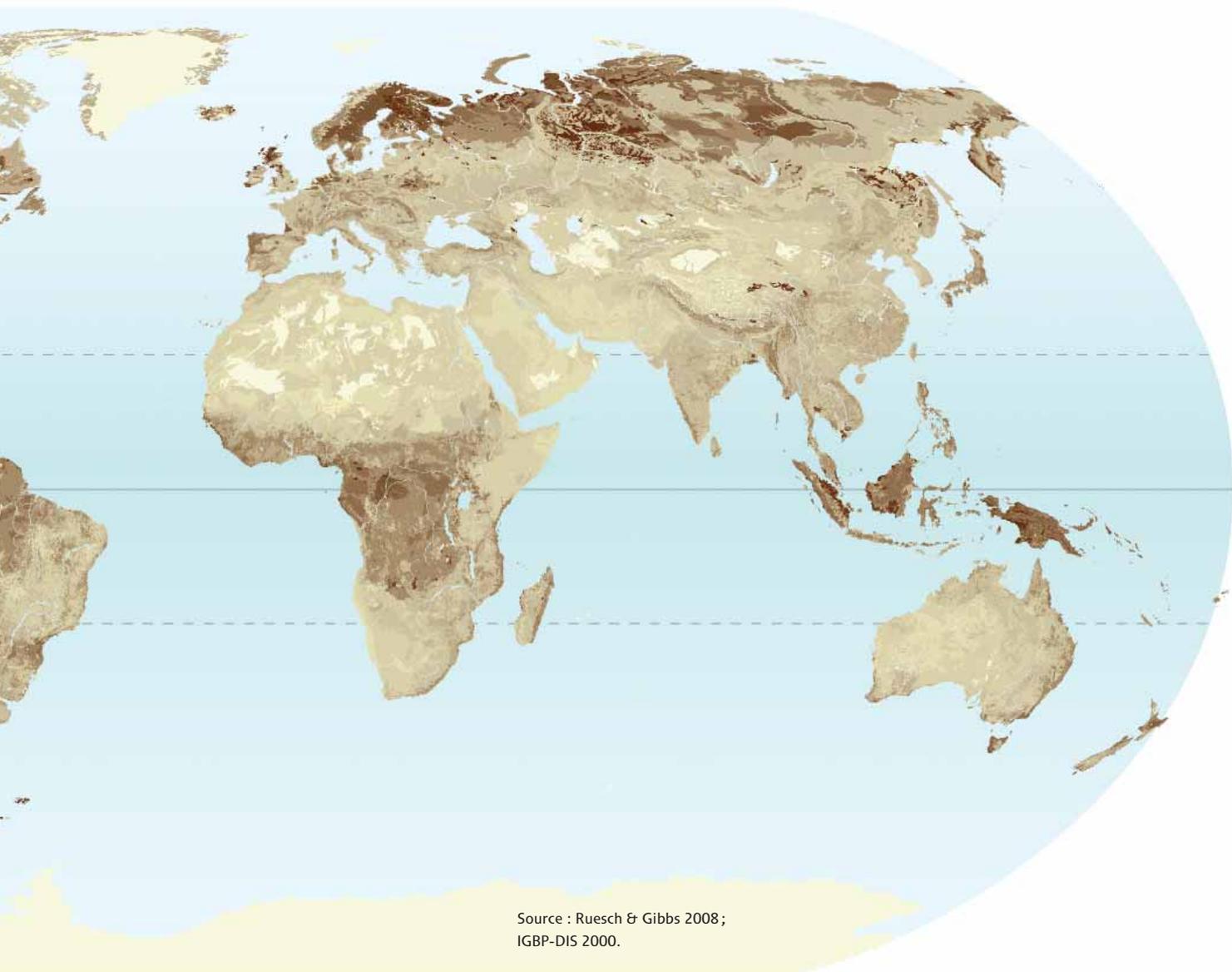
STOCKS ACTUELS DE CARBONE DANS LA BIOMASSE ET LES SOLS



Les écosystèmes terrestres stockent près de trois fois les quantités de carbone qui se trouvent dans l'atmosphère. Les forêts tropicales et boréales constituent les plus grosses réserves. La maintenance des réservoirs de carbone existants figure parmi les priorités les plus pressantes dans la lutte pour l'atténuation des changements climatiques.



Les écosystèmes terrestres stockent environ 2 100 Gt C dans les organismes vivants, dans les litières et dans la matière organique du sol, ce qui équivaut à près du triple de la quantité actuellement présente dans l'atmosphère. Différents types d'écosystèmes stockent différentes quantités de carbone en fonction de la com-

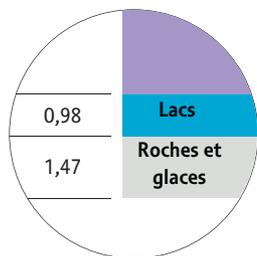


Source : Ruesch & Gibbs 2008 ;
IGBP-DIS 2000.

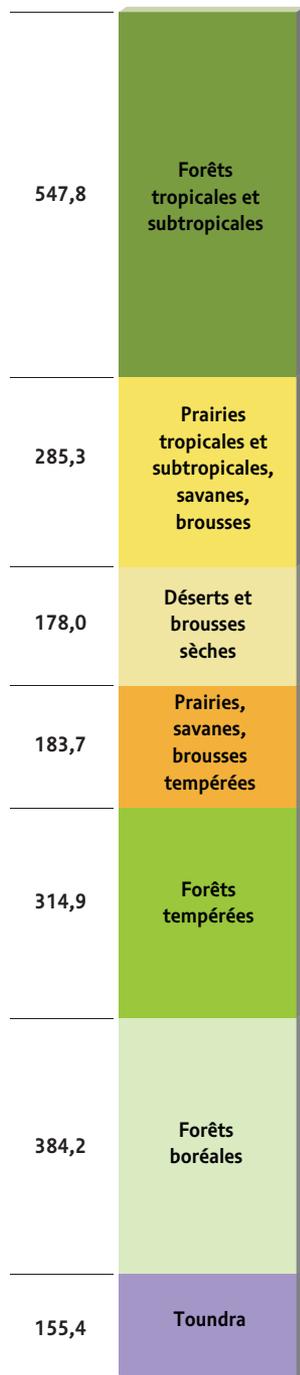
position des espèces qu'ils renferment, des types de sols, du climat et d'autres caractéristiques. Cette carte, qui est la meilleure disponible actuellement, montre la répartition terrestre du carbone. Elle combine un ensemble mondialement cohérent de données sur le stockage du carbone dans la biomasse vivante (Ruesch & Gibbs

2008) et un ensemble de données sur le stockage du carbone dans les sols jusqu'à 1 m de profondeur (IGBP-DIS 2000; il est à noter que ceci risque de sous-estimer les quantités de carbone stockées dans les sols tourbeux). Elle indique que les plus grandes quantités de carbone sont stockées dans les tropiques, principalement sous forme

Carbone stocké par biome (Gigatonnes de C)



Source : UNEP-WCMC 2009.



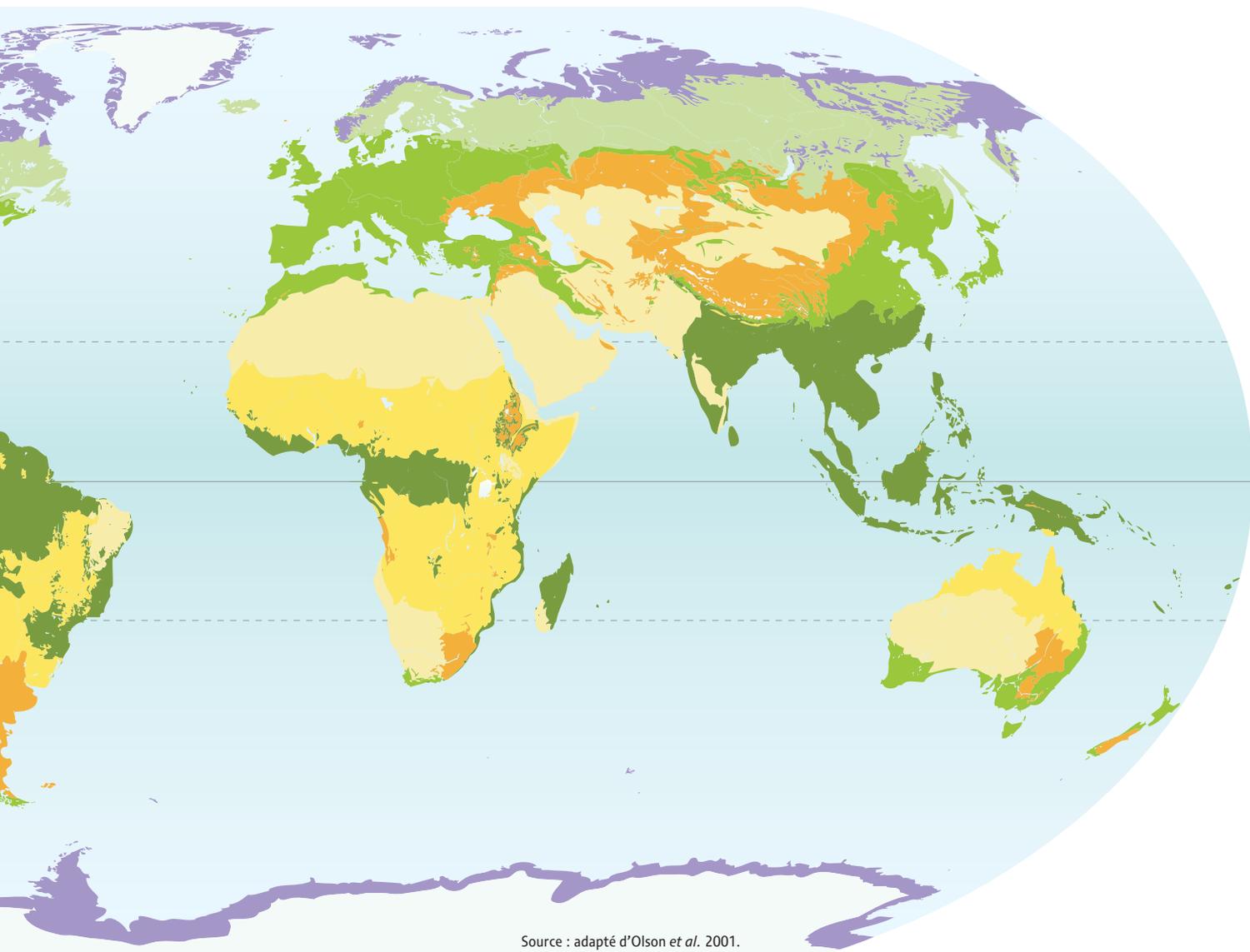
de biomasse, ainsi que dans les écosystèmes situés à des latitudes élevées où les réserves se trouvent en grand partie stockées dans des couches de sol gelées en permanence (pergélisol) et dans la tourbe.

Ayant divisé le monde en sept biomes, nous estimons que les forêts tropicales et subtropicales stockent la plus grande quantité



de carbone, à savoir près de 550 Gt. Les forêts boréales arrivent en deuxième position avec des réserves de carbone d'environ 384 Gt. Bien que les déserts et les brousses sèches ne présentent qu'une biomasse très peu importante au-dessus du sol, ils constituent des réservoirs substantiels de carbone dans les sols et couvrent de très grandes superficies, ce qui fait que leur contribution globale

au stockage du carbone est notable. Inversement, la toundra est un biome qui couvre une très petite superficie mais où la densité de stockage du carbone est la plus élevée.

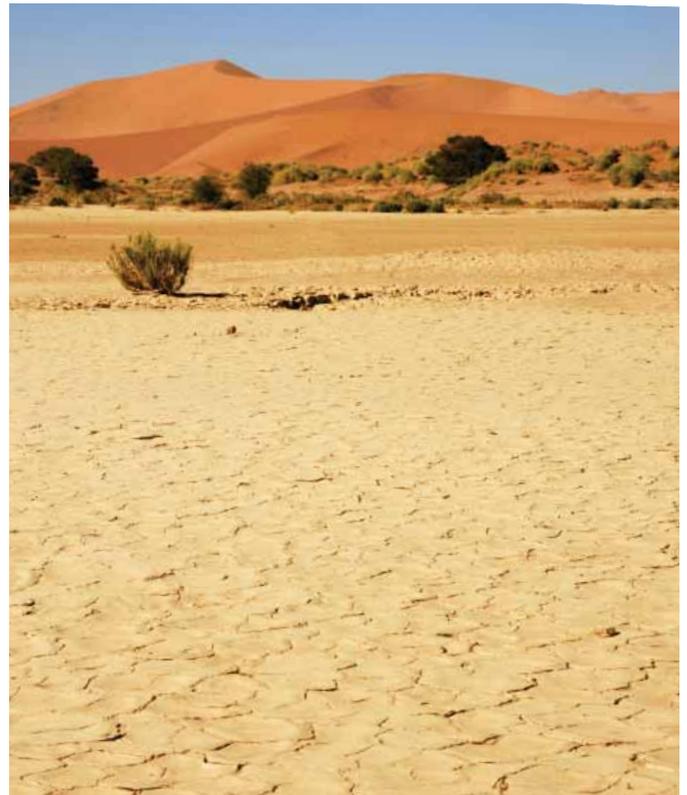


Source : adapté d'Olson *et al.* 2001.



LA GESTION DU CARBONE DANS LES ÉCOSYSTÈMES NATURELS

Les écosystèmes peuvent se regrouper en biomes, qui correspondent à des différences géographiques naturelles au niveau des sols et du climat, et par conséquent à des types de végétation différents (Woodward *et al.* 2004). Ces biomes peuvent varier considérablement quant à leur capacité à assimiler et à stocker le carbone (De Deyn *et al.* 2008). Le bilan carbone des écosystèmes est régulé non seulement par l'équilibre entre les gains en carbone issus de la pousse et les pertes par respiration, mais aussi par plusieurs autres facteurs, y compris les incendies, les herbivores, l'érosion et la lixiviation. Cette section considère les réserves de carbone et la capacité de stockage dans chaque biome, ainsi que dans les tourbières, les zones côtières et les océans, et examine les incidences des activités humaines sur ces biomes et leur rôle dans le cycle du carbone.



LA TOUNDRA

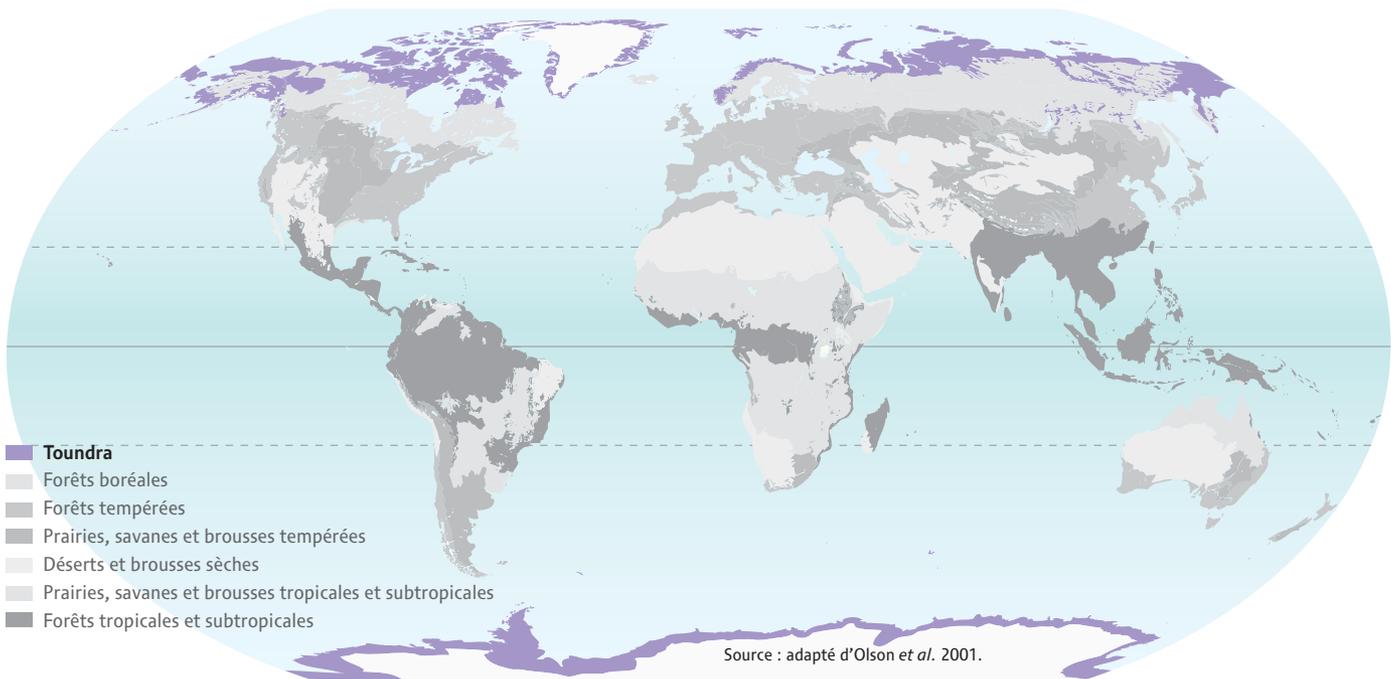
Les écosystèmes de toundra sont denses en carbone. Leur potentiel de stockage de quantités supplémentaires de carbone est limité, mais les pertes pourraient être énormes si le pergélisol venait à fondre. La prévention des changements climatiques est actuellement le seul moyen sûr de minimiser ces pertes.

Les écosystèmes de toundra se trouvent en Arctique et dans les régions montagneuses, plus particulièrement dans le Nord du Canada, en Scandinavie et en Russie, au Groenland et en Islande. Les températures y sont basses ou très basses la plupart de l'année, avec de longues périodes d'enneigement et une courte période de végétation. La couche de sol active, près de la surface, est généralement engorgée d'eau l'été et gelée l'hiver. La diversité de plantes et d'animaux est faible. L'environnement sélectionne des plantes résistantes, à croissance lente, ayant une biomasse faible au-dessus du sol. Les taux de décomposition sont peu élevés et de grandes quantités de matières végétales mortes s'accumulent dans le sol (environ 218 t C à l'hectare, Amundson 2001). Du fait de la lenteur du processus de décomposition, le recyclage des matières nutritives est également lent, ce qui limite encore la pousse des végétaux et explique que la biomasse des plantes de la toundra se trouve principalement en dessous de la surface du sol (De Deyn *et al.* 2008). La biomasse végétale totale est estimée stocker en moyenne 40 t C à l'hectare (Shaver *et al.* 1992).

En dessous de la couche de sol active se trouve une couche gelée en permanence, appelée pergélisol. Bien que cela soit difficile à estimer, on pense que le stockage mondial de carbone dans le pergélisol se situe autour de 1 600 Gt, soit le double de la réserve atmosphérique (Schuur *et al.* 2008).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Actuellement, les écosystèmes de toundra sont très peu utilisés par les humains et les possibilités d'y piéger des quantités supplémentaires de carbone sont limitées. Toutefois, même un réchauffement relativement faible de la planète risque d'avoir des incidences considérables sur ces systèmes. Schuur *et al.* (2008) estiment qu'un dégel du pergélisol résultant de changements climatiques, et la décomposition du carbone stocké dans les sols qui s'ensuivrait, pourrait libérer 40 Gt CO₂ dans l'atmosphère au cours des quatre décennies à venir et 100 Gt CO₂ d'ici la fin du siècle, ce qui suffirait pour provoquer une augmentation de 47 ppm de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.



LES FORÊTS BORÉALES

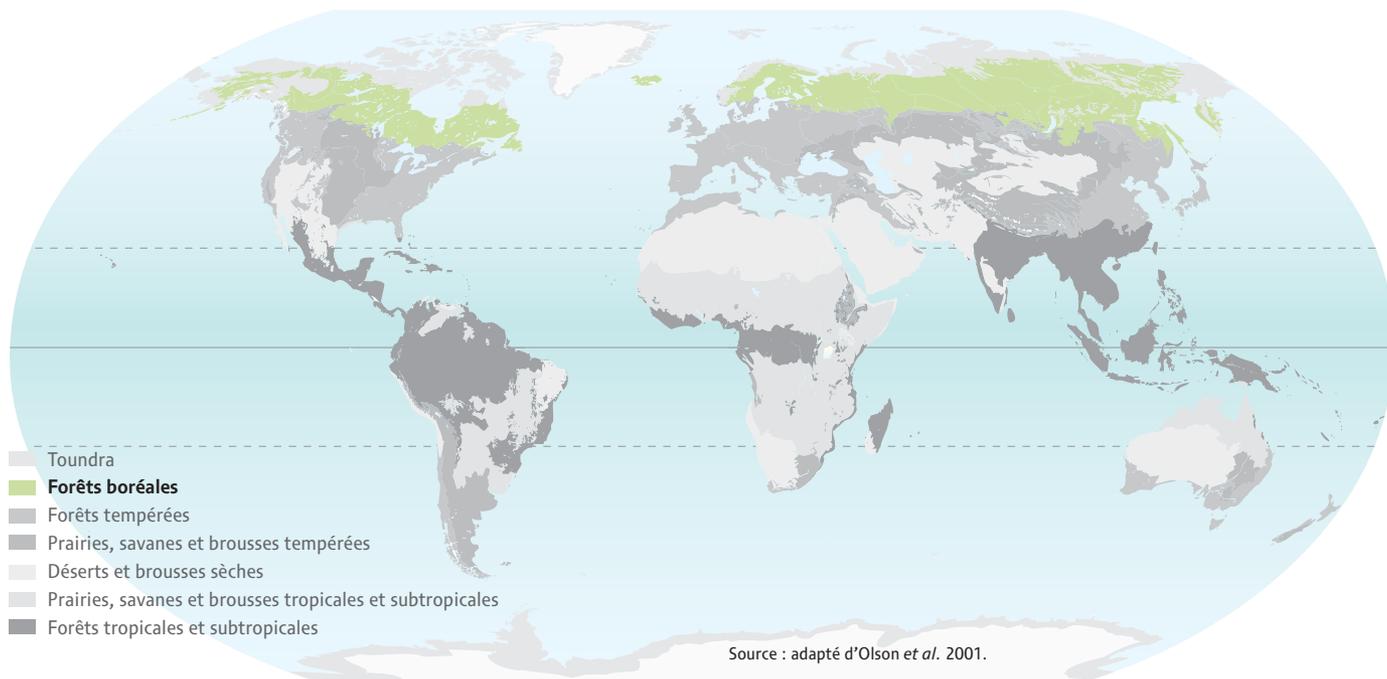
Les biomes des forêts boréales renferment les deuxièmes réserves de carbone les plus importantes, la plus grande partie de celles-ci étant stockée dans les sols et les litières. Le drainage des tourbières des forêts boréales, le recours à des pratiques sylvicoles inappropriées et une mauvaise gestion des incendies sont autant de facteurs qui peuvent causer des pertes importantes au niveau du carbone stocké dans cet écosystème.

Les forêts boréales occupent de vastes étendues dans l'hémisphère nord et se trouvent principalement au Canada, en Russie, en Alaska et en Scandinavie. La biodiversité dans ces forêts est généralement faible. La biomasse végétale est beaucoup plus importante que dans la toundra, celle-ci stockant environ 60 à 100 tonnes de carbone à l'hectare, dont environ 80 % dans la biomasse qui se trouve au-dessus du sol (Mahli *et al.* 1999 ; Luyssaert *et al.* 2007). En raison des basses températures, la décomposition dans les forêts boréales est lente. Cela conduit, comme dans la toundra, à d'importantes accumulations de carbone dans les sols (entre 116 et 343 tC à l'hectare, Mahli *et al.* 1999 ; Amundson 2001). Les incendies, qui sont courants dans les forêts boréales, constituent l'un des principaux facteurs du bilan carbone dans ces régions, du carbone s'échappant du système lorsque la fréquence des incendies est élevée (Bond-Lamberty *et al.* 2007). La question de savoir si les forêts boréales anciennes très matures sont actuellement une source ou un puits de carbone est source de débats, bien que des études récentes semblent

indiquer que ces vieux peuplements pourraient en fait être des puits de carbone (Luyssaert *et al.* 2008). En général, en raison des faibles taux de décomposition dans les forêts boréales et des vastes tourbières sur lesquelles elles poussent, elles sont considérées comme d'importants puits de carbone.

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Les pressions accrues exercées sur ces forêts par les activités humaines, telles que l'abattage et l'exploitation minière, et le drainage des tourbières sur lesquelles elles poussent, provoquent des rejets de carbone dans l'atmosphère et réduisent considérablement leur capacité de stockage de ce gaz. La protection des forêts boréales contre l'abattage et la mise en œuvre de meilleures pratiques sylvicoles pourraient par conséquent permettre de réduire les émissions de carbone, d'en préserver les stocks et d'en maintenir l'absorption par ces forêts.



LES FORÊTS TEMPÉRÉES

Les forêts tempérées sont des puits de carbone actifs et le déboisement a pratiquement cessé dans les zones tempérées. Lorsque la demande en terres et/ou en eau en donne la possibilité, le reboisement permet de piéger du carbone et peut offrir d'autres avantages, dont l'accroissement de la biodiversité et la possibilité d'activités récréatives.

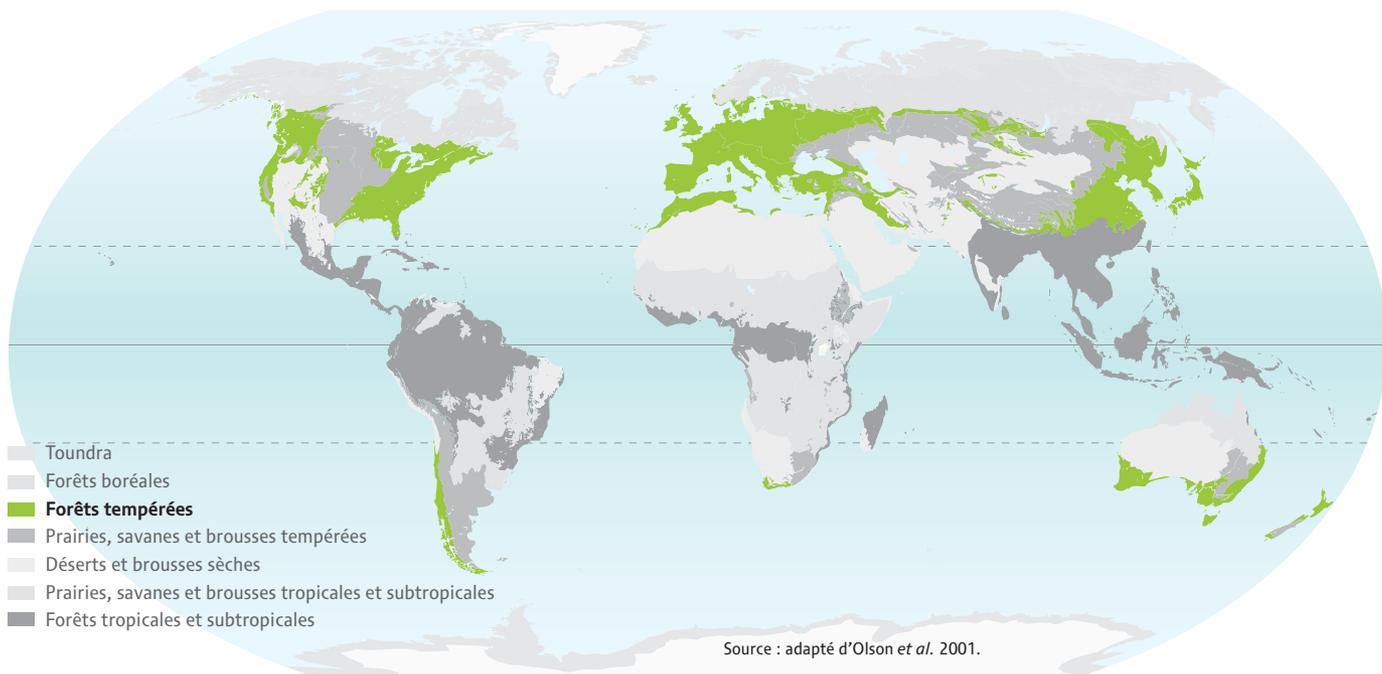
Les forêts tempérées se situent dans les régions qui connaissent quatre saisons distinctes, un hiver bien défini et des précipitations régulières. Elles occupent de vastes étendues en Asie, en Europe et en Amérique du Nord et se trouvent pour la plupart dans les pays développés. Il existe de nombreux types de forêts tempérées : certaines sont constituées essentiellement de feuillus et d'autres d'espèces conifères. Elles présentent généralement une biodiversité animale et végétale relativement élevée. Comme les sols qu'elles produisent sont souvent très fertiles, une grande partie des superficies jadis occupées par les forêts tempérées ont été converties en terres agricoles et en pâturages et sont aujourd'hui utilisées pour la production alimentaire.

Dans les forêts tempérées, la croissance des plantes, la décomposition et le cycle du carbone sont rapides ; il s'y accumule moins de carbone dans les sols que dans les forêts boréales ou la toundra. La réserve globale de carbone dans ces forêts a été estimée entre 150 et 320 tonnes à l'hectare, dont la biomasse végétale, qui est principale-

ment constituée d'organes ligneux s'élevant au-dessus du sol et de systèmes racinaires profonds, représente environ 60 % et les réserves de carbone dans les sols le restant (Amundson 2001).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Les forêts tempérées, notamment en Europe et en Amérique du Nord, sont en expansion depuis plusieurs décennies. Dans de nombreuses régions, les pratiques actuelles de gestion, telles que rotations relativement longues et gestion appropriée des incendies, ont conduit à une augmentation de la capacité à stocker le carbone. En conséquence, les forêts tempérées sont actuellement considérées comme étant, dans l'ensemble, des puits de carbone. Selon certaines estimations, les forêts d'Europe absorbent entre 7 et 12 % des émissions de carbone du continent (Goodale *et al.* 2002 ; Janssens *et al.* 2003). La poursuite du reboisement et l'amélioration de la gestion pourraient permettre de piéger davantage de carbone à court terme (Jandl *et al.* 2007).



LES PRAIRIES TEMPÉRÉES

Les superficies occupées à l'origine par les prairies tempérées ont été en grande partie défrichées pour faire place à l'agriculture. Là où la végétation naturelle subsiste, des pertes supplémentaires de carbone pourraient être évitées en minimisant les perturbations qui résultent de l'activité humaine.

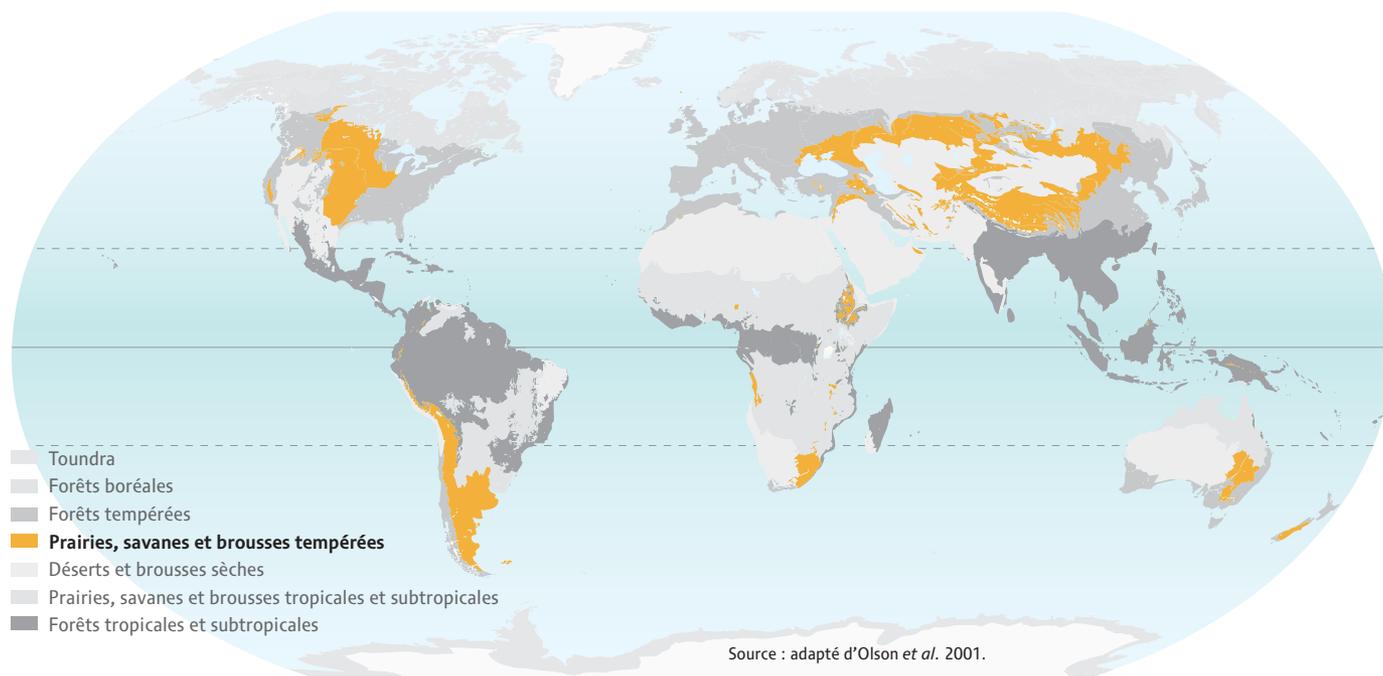
On trouve des prairies dans une grande partie du monde, les prairies représentant le premier stade de succession des régions boisées. Elles constituent également la végétation naturelle dans les zones climatiques où les précipitations sont plus élevées que dans les déserts mais insuffisantes pour que poussent des arbres (Woodward *et al.* 2004). De vastes étendues de prairies tempérées naturelles se trouvent en Amérique du Sud, aux États-Unis et en Asie centrale. La croissance des plantes dans ces prairies est limitée par les disponibilités en eau et en éléments nutritifs, et la majeure partie de la biomasse végétale se situe en dessous du sol, où les plantes produisent des racines qui se décomposent lentement. Les animaux qui y paissent jouent généralement un rôle important dans la préservation des prairies : ceci est dû au fait qu'ils accélèrent le cycle du carbone en consommant d'importantes quantités de biomasse (feuilles), en respirant, et en restituant une partie de cette biomasse dans le sol sous forme de fumier. Le fumier représente une forme de carbone organique qui se décompose plus facilement que la litière de feuilles et de

racines de graminées. Dans de nombreuses régions, ce rôle est aujourd'hui assuré par le bétail.

Globalement, les niveaux de biomasse végétale dans les prairies tempérées sont faibles par rapport à ceux des écosystèmes de forêt ou de brousse (à savoir 0,68 et 7,3 t C à l'hectare, respectivement, dans la steppe tempérée chinoise, Fan *et al.* 2008). Toutefois, leurs réserves de carbone organique dans les sols sont généralement supérieures à celles des forêts tempérées (133 t C à l'hectare, Amundson 2001).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Bien que les prairies tempérées n'offrent qu'une productivité intermédiaire, certaines d'entre elles se prêtent bien à la culture et peuvent produire d'excellentes terres agricoles. Dans une grande partie de leur aire de distribution naturelle, p. ex. en Amérique, les prairies ont été défrichées pour faire place à une agriculture intensive.



LES DÉSERTS ET LES BROUSSES SÈCHES

Les vastes superficies occupées par les zones sèches confèrent au piégeage du carbone dans ces régions une importance mondiale, malgré que la densité en carbone au sein de ces régions soit relativement faible. Comme dans de nombreuses zones sèches les sols ont été dégradés, ils sont actuellement loin d'être saturés en carbone et leur potentiel de piégeage du carbone peut être élevé.

Les déserts et les brousses sèches occupent des régions connaissant des précipitations très faibles ou fortement saisonnières et se rencontrent dans beaucoup de pays, y compris dans de nombreuses régions d'Afrique, au sud des États-Unis et au Mexique, dans certaines régions d'Asie et sur de grandes étendues en Australie. La végétation à croissance lente, qui est constituée principalement d'arbustes ligneux et de plantes basses, est extrêmement bien adaptée pour minimiser les pertes d'eau. Tout comme la diversité végétale, la diversité animale y est généralement faible.

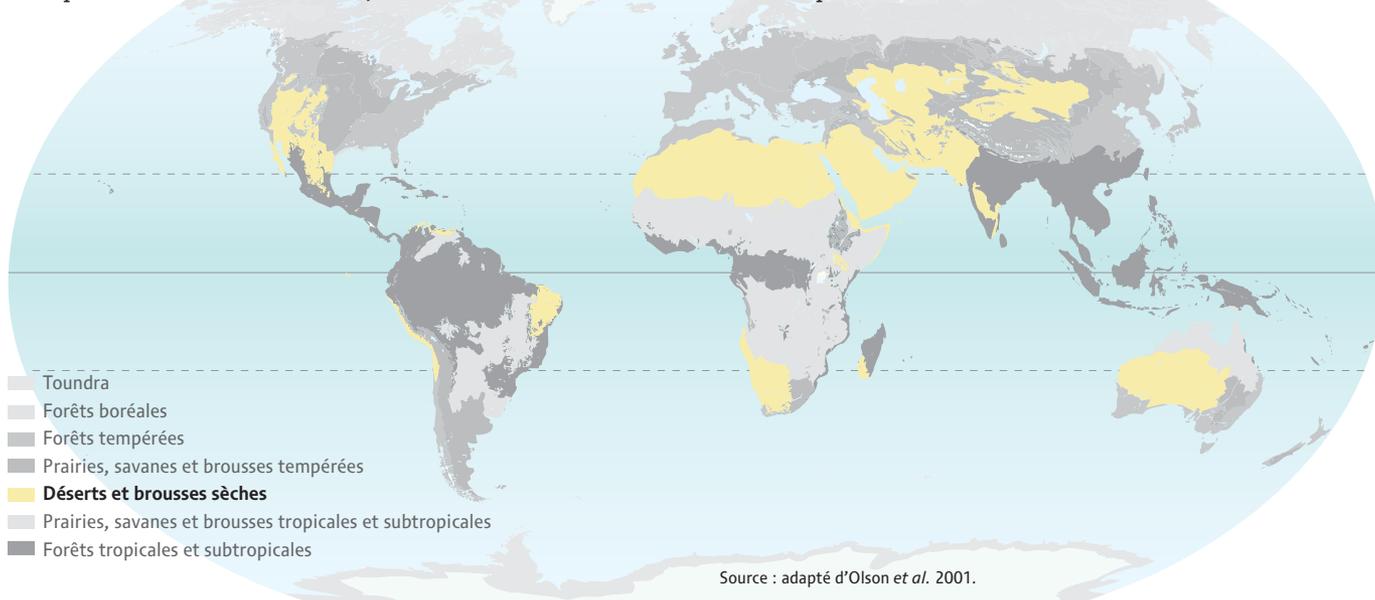
Le manque d'humidité détermine la manière dont ces écosystèmes transforment le carbone. La croissance des plantes a tendance à être extrêmement sporadique, celles-ci consacrant leur énergie à se protéger contre les pertes d'eau et contre les herbivores en rendant leurs tissus robustes et résistants à la décomposition. Le manque d'eau ralentit également le rythme de décomposition, entraînant l'accumulation de matières végétales mortes riches en carbone dans les sols. Selon les estimations d'Amundson (2001), la teneur en carbone des sols désertiques se situe entre 14 et 100 tonnes à l'hectare, alors qu'elle est estimée atteindre 270 tonnes à l'hectare dans les

brousses sèches (Grace 2004). Les quantités de carbone stockées dans la végétation sont considérablement inférieures, celles-ci se situant généralement autour de 2 à 30 tonnes à l'hectare au total.

Il ressort de certaines études récentes que l'absorption du carbone par les déserts est beaucoup plus importante que ce que l'on pensait jusqu'ici et qu'elle représente une part significative du puits terrestre de carbone (Wohlfahrt *et al.* 2008). Toutefois, de considérables incertitudes subsistent et d'autres travaux de recherche seront nécessaires afin de vérifier ces résultats, en quantifiant par exemple les réserves de carbone au-dessus et en dessous du sol au fil du temps (Schlesinger *et al.* 2009).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Comme ces écosystèmes sont généralement pauvres en éléments nutritifs, ils ont tendance à fournir des terres agricoles pauvres et la production alimentaire dans ces régions n'atteint généralement qu'un niveau de subsistance. La dégradation des sols, qui résulte d'une utilisation inappropriée des terres, conduit à des pertes de carbone à partir des sols.



LES SAVANES ET LES PRAIRIES TROPICALES

Les savanes, qui couvrent de vastes superficies en Afrique et en Amérique du Sud, peuvent stocker d'importantes quantités de carbone, notamment dans leurs sols. Des activités telles que la culture et le pâturage intensif, ainsi que la fréquence ou l'intensité accrue des incendies, peuvent réduire les réserves de carbone stockées dans ces systèmes.

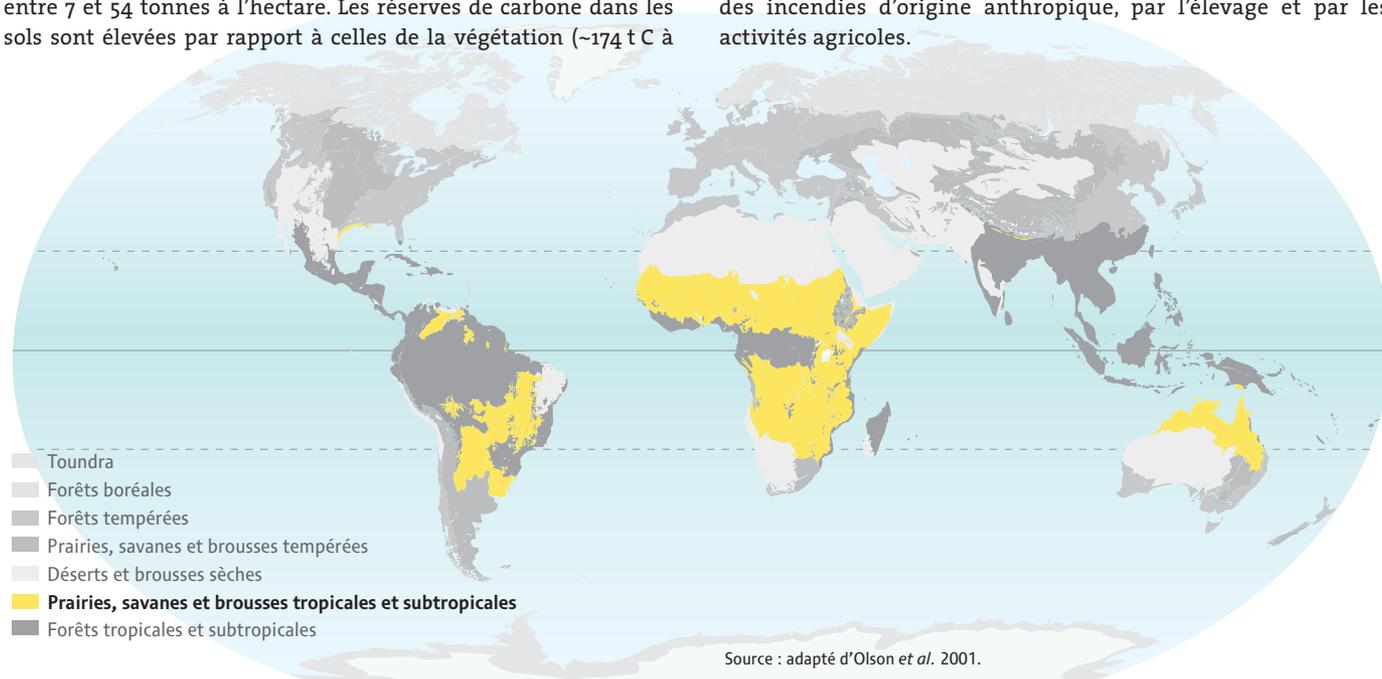
Les savanes, qui constituent un élément important de la végétation de la planète, occupent de vastes superficies en Afrique subsaharienne et en Amérique du Sud. Ce biome se caractérise par la codominance d'arbres et de graminées, mais va de prairies, où les arbres sont pratiquement absents, à des écosystèmes se rapprochant des forêts, où les arbres sont dominants. La plupart des zones de savane sont des écosystèmes naturels ; toutefois, elles peuvent aussi résulter de la dégradation des forêts tropicales suite au brûlage, au pâturage et au déboisement. En Afrique, les zones de savane abritent une faune charismatique de grands mammifères et offrent d'importantes possibilités d'écotourisme.

La quantité de carbone stockée au-dessus du sol dépend de l'étendue de la couverture arboricole ; elle va de moins de 2 tonnes de carbone à l'hectare pour les prairies tropicales à plus de 30 tonnes à l'hectare pour les savanes boisées. Les réserves de carbone dans les racines sont en général légèrement plus élevées, celles-ci étant estimées entre 7 et 54 tonnes à l'hectare. Les réserves de carbone dans les sols sont élevées par rapport à celles de la végétation (~174 t C à

l'hectare, Grace *et al.* 2006). Les savanes et les prairies tropicales subissent naturellement de fréquents incendies, lesquels jouent un rôle important dans le fonctionnement de ces écosystèmes. Les incendies dans les savanes peuvent libérer d'énormes quantités de carbone dans l'atmosphère (estimées mondialement entre 0,5 et 4,2 Gt C par an). Cependant, le carbone perdu est en majeure partie récupéré durant la période suivante de repousse, à moins que la surface ne soit convertie en pâturage pour le bétail (Grace *et al.* 2006), et l'on considère actuellement que ces écosystèmes jouent globalement le rôle de puits de carbone, piégeant, selon les estimations, 0,5 Gt C par an (Scurlock & Hall 1998).

IMPACT DES ACTIVITÉS HUMAINES ET RÉPERCUSSIONS SUR LA GESTION DU CARBONE

Les pressions exercées par les activités humaines sur ces écosystèmes augmentent encore et il est estimé que plus d'un pour cent des savanes mondiales est détruit chaque année par des incendies d'origine anthropique, par l'élevage et par les activités agricoles.



LES FORÊTS TROPICALES

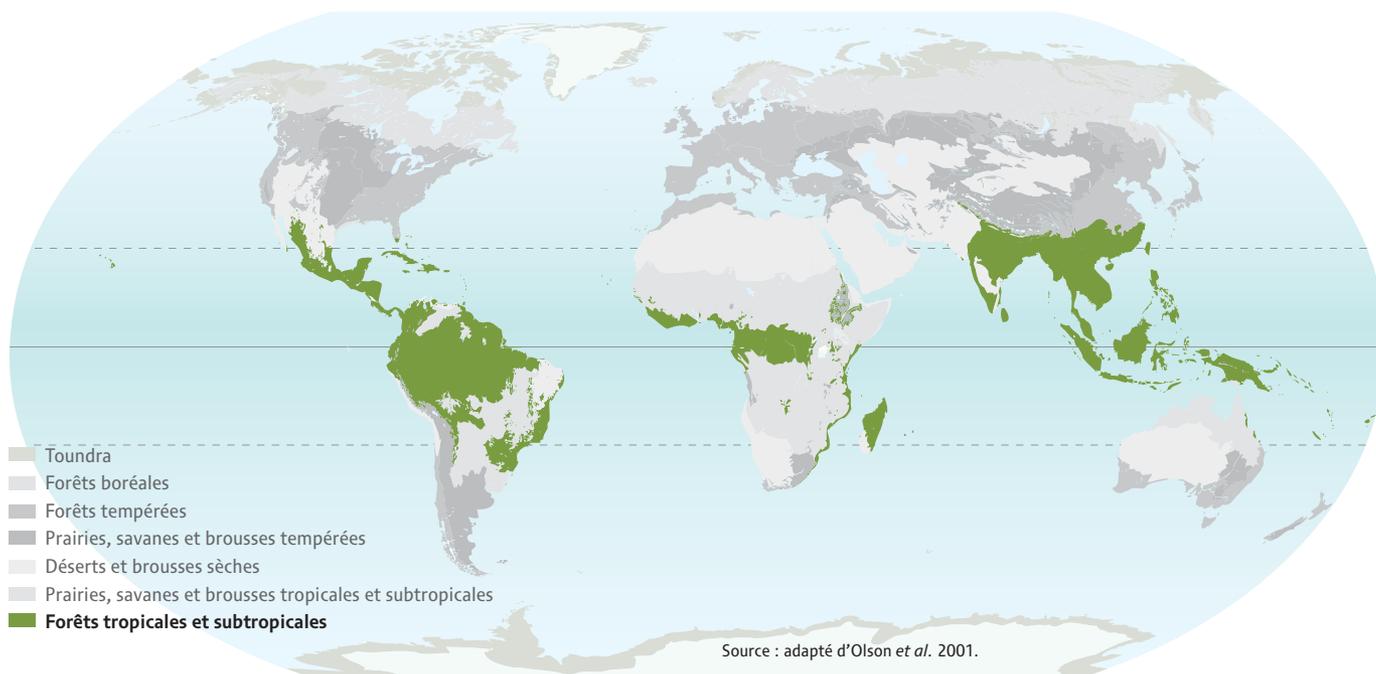
Les forêts tropicales, qui renferment les réserves terrestres de carbone les plus importantes, sont des puits de carbone actifs. La réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts est un élément essentiel de la lutte contre les changements climatiques dangereux. De plus, la lutte contre l'abattage illégal et mal géré constituera un élément important de la réduction des émissions imputables aux pratiques sylvicoles.

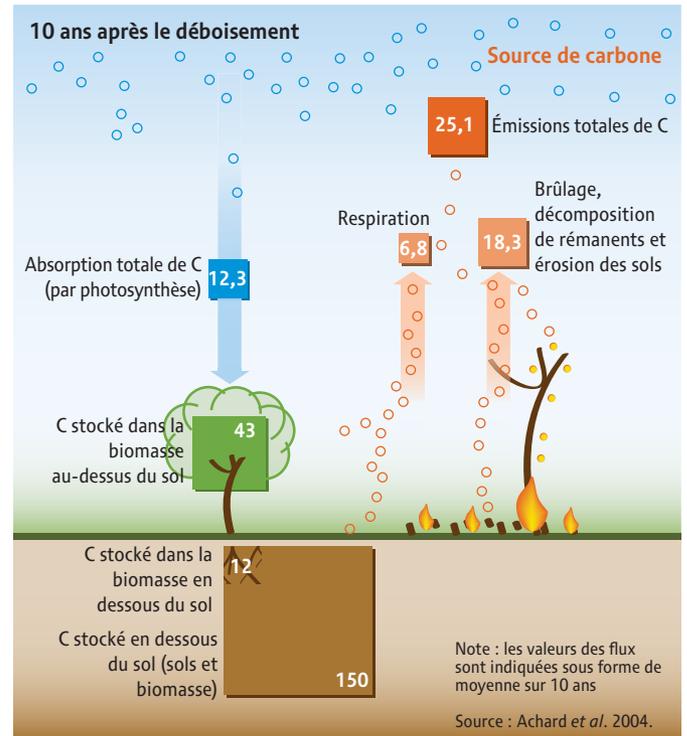
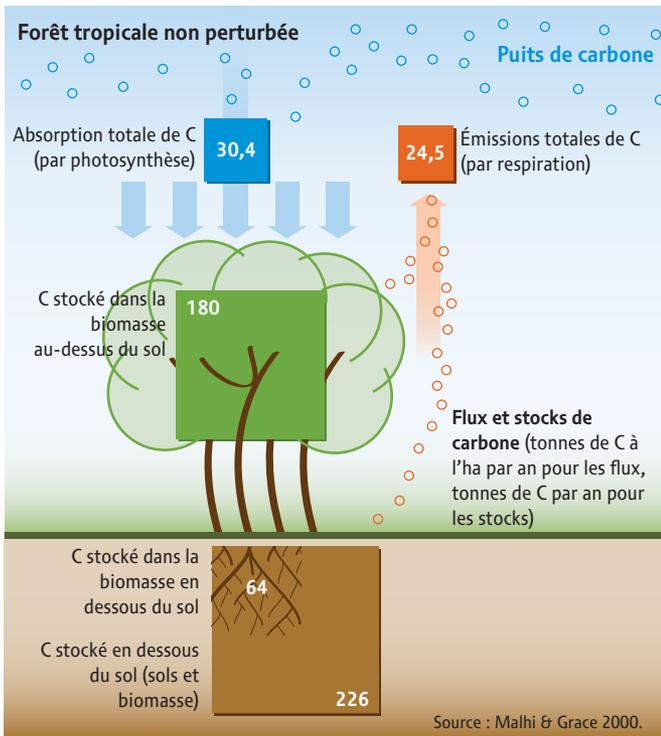
Les forêts tropicales occupent de vastes étendues au centre et au nord de l'Amérique centrale, en Afrique occidentale, en Asie du Sud-Est et au nord-est de l'Australie. La plupart des forêts tropicales sont humides et se trouvent dans des régions où les précipitations annuelles dépassent normalement les 2 000 mm par an et se répartissent de manière relativement égale. Ces forêts, qui présentent des niveaux de diversité extrêmement élevés de plantes, de mammifères, d'insectes et d'oiseaux, accueillent la plus grande biodiversité de tous les biomes de la Terre.

Le climat chaud et pluvieux des forêts tropicales humides permet une croissance rapide des plantes et la majeure partie du carbone est stockée dans la végétation, les stocks de carbone dans la biomasse étant estimés entre 170 et 250 tC à l'hectare (Malhi *et al.* 2006;

Chave *et al.* 2008; Lewis *et al.* 2009). Les réserves de carbone dans les forêts tropicales humides peuvent varier considérablement en fonction de l'abondance des espèces ligneuses denses de grosse taille qui stockent le plus de carbone (Baker *et al.* 2004). En moyenne, on estime que les forêts tropicales stockent environ 160 tonnes de carbone à l'hectare dans la végétation au-dessus du sol et environ 40 tonnes à l'hectare dans les racines. Les réserves de carbone dans les sols sont estimées par Amundson (2001) entre 90 et 200 tonnes à l'hectare, et sont par conséquent légèrement inférieures aux stocks de la biomasse.

On considère globalement que les forêts tropicales sont actuellement des puits de carbone, des études récentes indiquant une absorption annuelle mondiale d'environ 1,3 Gt de carbone. Sur





ce total, il est estimé que les forêts d'Amérique centrale et du Sud absorbent environ 0,6 Gt C, les forêts africaines un peu plus de 0,4 Gt et les forêts asiatiques environ 0,25 Gt (Lewis *et al.* 2009). Pour placer ce chiffre dans son contexte, l'absorption de carbone par les forêts tropicales équivaut à environ 15% des émissions mondiales totales de carbone d'origine anthropique. Les forêts tropicales contribuent, par conséquent, de manière significative à l'atténuation des changements climatiques.

L'UTILISATION ET LA CONVERSION DES FORÊTS TROPICALES PAR LES ÊTRES HUMAINS

Les forêts tropicales sont converties à des fins agricoles et industrielles (production d'aliments et de biocarburant) à un rythme accéléré. Les causes du déboisement des forêts tropicales, qui sont complexes, vont de problèmes sous-jacents de pressions internationales et de mauvaise gouvernance aux besoins locaux en ressources (Geist & Lambin 2001). Les taux mondiaux de déboisement en forêt tropicale sont estimés actuellement entre 6,5 et 14,8 millions d'hectares par an, ces activités de déboisement libérant à elles seules dans l'atmosphère entre 0,8 et 2,2 Gt de carbone par an (Houghton

2005a). Non seulement le déboisement réduit le volume de carbone stocké par la végétation, mais il peut aussi réduire considérablement les réserves de carbone dans les sols.

Outre le déboisement, les forêts tropicales sont par ailleurs exploitées pour l'extraction de bois et d'autres produits forestiers. Ces activités conduisent à leur dégradation et sont estimées rejeter dans l'atmosphère des émissions supplémentaires de carbone atteignant environ 0,5 Gt par an au niveau mondial (Achard *et al.* 2004).

Lors de l'abattage des forêts tropicales humides, on ne récolte généralement qu'un à 20 arbres à l'hectare. Les techniques d'abattage traditionnelles endommagent ou détruisent une partie importante de la végétation restante au cours de la récolte, ce qui conduit à des pertes substantielles de carbone. Les techniques d'abattage à incidences réduites permettent de diminuer les pertes de carbone occasionnées par les activités de foresterie, avec une diminution d'environ 30% par rapport aux techniques traditionnelles (Pinard & Cropper 2000).

LES TOURBIÈRES

Les sols des tourbières stockent de grandes quantités de carbone, mais on court le risque grave d'en perdre une grande partie par la conversion des écosystèmes de tourbières au profit de l'agriculture, des plantations et de la production de bioénergie dans le monde entier. La conservation et la restauration des tourbières tropicales doivent être considérées comme des priorités mondiales.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un véritable biome, les tourbières constituent un cas spécial dans la gestion du cycle global du carbone. Les tourbières sont associées à tout un éventail de milieux engorgés d'eau dans lesquels la décomposition des matières végétales mortes et du carbone présent dans les sols est extrêmement lente, ce qui conduit à la fossilisation d'éléments de litière et à des sols d'une teneur en carbone organique supérieure à 30 %. Bien que certains sols tourbeux puissent se trouver dans des écosystèmes productifs, tels que les roselières, les marais à papyrus et les mangroves, les sols tourbeux se rencontrent souvent dans des milieux improductifs où les plantes poussent très lentement. Leur capacité de stockage est énorme ; selon

certaines estimations, ~550 Gt C seraient stockées globalement dans les sols tourbeux (Sabine *et al.* 2004) et la moyenne mondiale atteindrait 1 450 t C à l'hectare (Parish *et al.* 2008). Ces zones sont très répandues dans le monde, mais elles ne couvrent qu'une très petite proportion des terres, ce qui en fait les réserves de carbone les plus efficaces de tous les écosystèmes, vu l'espace qu'elles occupent.

Avec l'assèchement des tourbières, d'importantes quantités de carbone sont actuellement perdues et, à moins que des mesures urgentes ne soient prises, ces pertes s'aggraveront car les superficies de tourbières asséchées augmentent continuellement. Au moins la moitié de ces

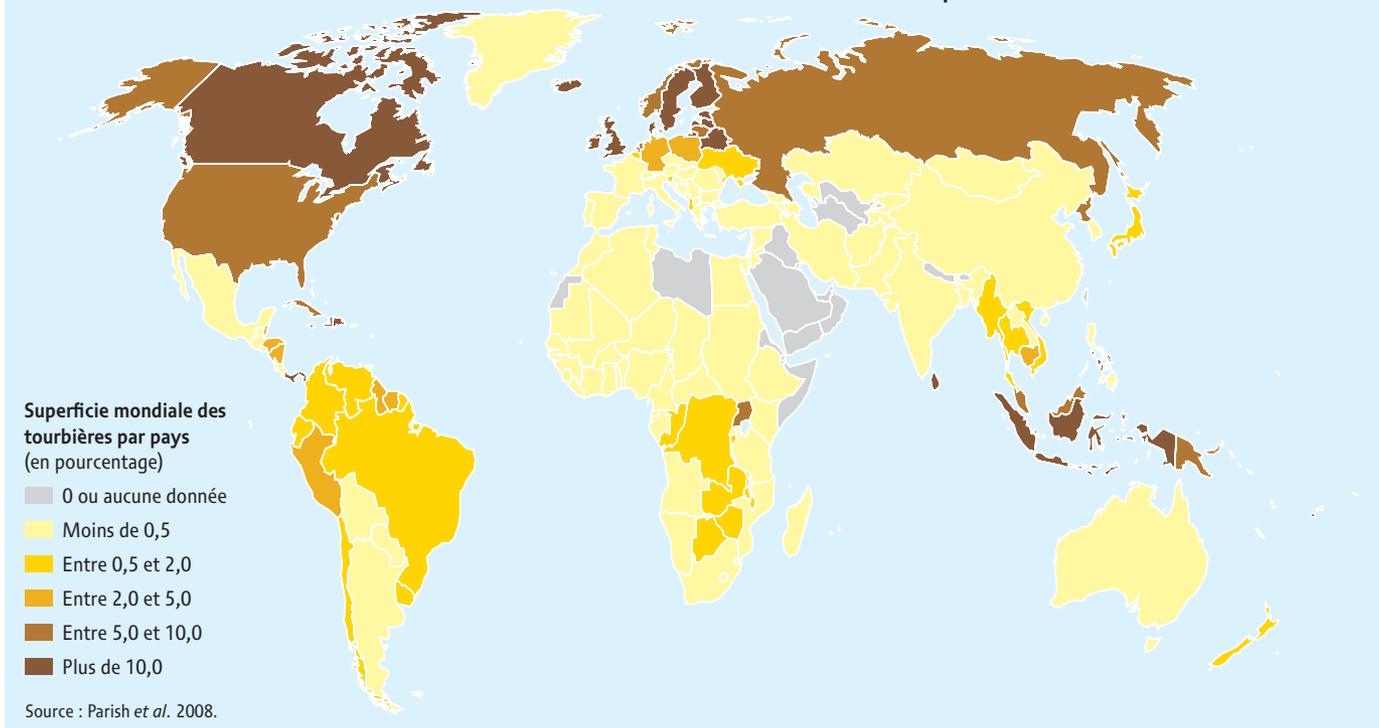


pertes se produisent actuellement dans les tourbières tropicales. Dans ces zones, qui se concentrent en Malaisie et en Indonésie, de vastes étendues de forêts tropicales sont drainées en vue de la production d'huile de palme et de bois de trituration (Verwer *et al.* 2008). L'assèchement des sols tourbeux produit un milieu aérobie dans lequel le carbone de la tourbe est respiré par les organismes se trouvant dans les sols. Les pertes de carbone sont encore aggravées par le risque accru d'incendies dans les tourbières asséchées, la tourbe sèche agissant comme source de carburant alimentant les incendies souterrains.

Des incertitudes subsistent quant au niveau des pertes de carbone à partir des tourbières asséchées (Parish *et al.* 2008; Verwer *et al.* 2008), mais en toute probabilité elles sont déjà importantes (0,5–0,8 Gt C par an) et représentent une proportion substantielle des émissions globales de gaz à effet de serre d'origine anthropique. En

raison de ces pertes, les biocarburants qui sont cultivés sur les terres tourbeuses ont un impact négatif sur le bilan carbone mondial. Il est estimé par exemple que la combustion de l'huile de palme cultivée sur les tourbières asséchées génère par unité d'énergie produite 3 à 9 fois plus de CO₂ que la combustion de charbon, ce qui équivaut à une dette carbone qui ne sera remboursée qu'au bout de 420 ans de production de biocarburant (Fargione *et al.* 2008). Ce chiffre met en lumière la fausse économie de carbone que représente la culture de biocarburants sur des tourbières asséchées, la nécessité de préserver les tourbières en parfait état et le potentiel de réduction des émissions par la ré-humidification. La ré-humidification des tourbières rétablit leur engorgement d'eau, réimpose les conditions anaérobies dans lesquelles la décomposition des matières végétales mortes est interrompue, réduisant ainsi considérablement le rejet de CO₂ et le risque d'incendies.

Répartition des tourbières dans le monde



LES OCÉANS ET LES ZONES CÔTIÈRES

Sans la contribution des océans et des écosystèmes côtiers au piégeage biologique mondial du carbone, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère serait aujourd'hui bien supérieure à ce qu'elle est. Mais la capacité d'absorption des océans et des zones côtières est à la fois limitée et fragile. La réduction des pressions, la restauration et l'exploitation durable sont autant d'options de gestion qui peuvent aider ces écosystèmes à maintenir leur importante fonction de gestion du carbone.

Les océans jouent un rôle énormément important à la fois pour la partie organique et la partie inorganique du cycle du carbone. Ils renferment en dissolution environ cinquante fois plus de carbone inorganique que l'atmosphère, sous forme de mélange complexe de dioxyde de carbone dissous, d'acide carbonique et de carbonates (Raven & Falkowski 1999).

Le dioxyde de carbone est beaucoup plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau tiède et, par conséquent, la relation entre la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et celle de carbone inorganique dissous dans les océans dépend fortement de la température de l'eau et de la circulation océanique. Généralement, aux latitudes élevées, les eaux froides de la surface des océans absorbent d'importantes quantités de dioxyde de carbone. Ce faisant, elles deviennent plus denses et chutent au fond des océans, transportant avec elles du carbone inorganique dissous et créant ce qu'on appelle « la pompe de solubilité ». Au fur et à mesure que la concentration (ou pression partielle) du dioxyde de carbone augmente dans l'atmosphère, les océans en absorbent davantage. De ce fait, on estime que les océans ont absorbé autour de 30 % des émissions de dioxyde de carbone résultant des activités humaines depuis l'industrialisation (Lee *et al.* 2003). Les océans constituent, par conséquent, le deuxième puits de dioxyde de carbone d'origine anthropique le plus important après l'atmosphère (Iglesias-Rodriguez *et al.* 2008). L'absorption supplémentaire de dioxyde de carbone a eu toutefois pour conséquence une acidification légère, quoique mesurable, des océans au cours de cette période (Orr *et al.* 2005).

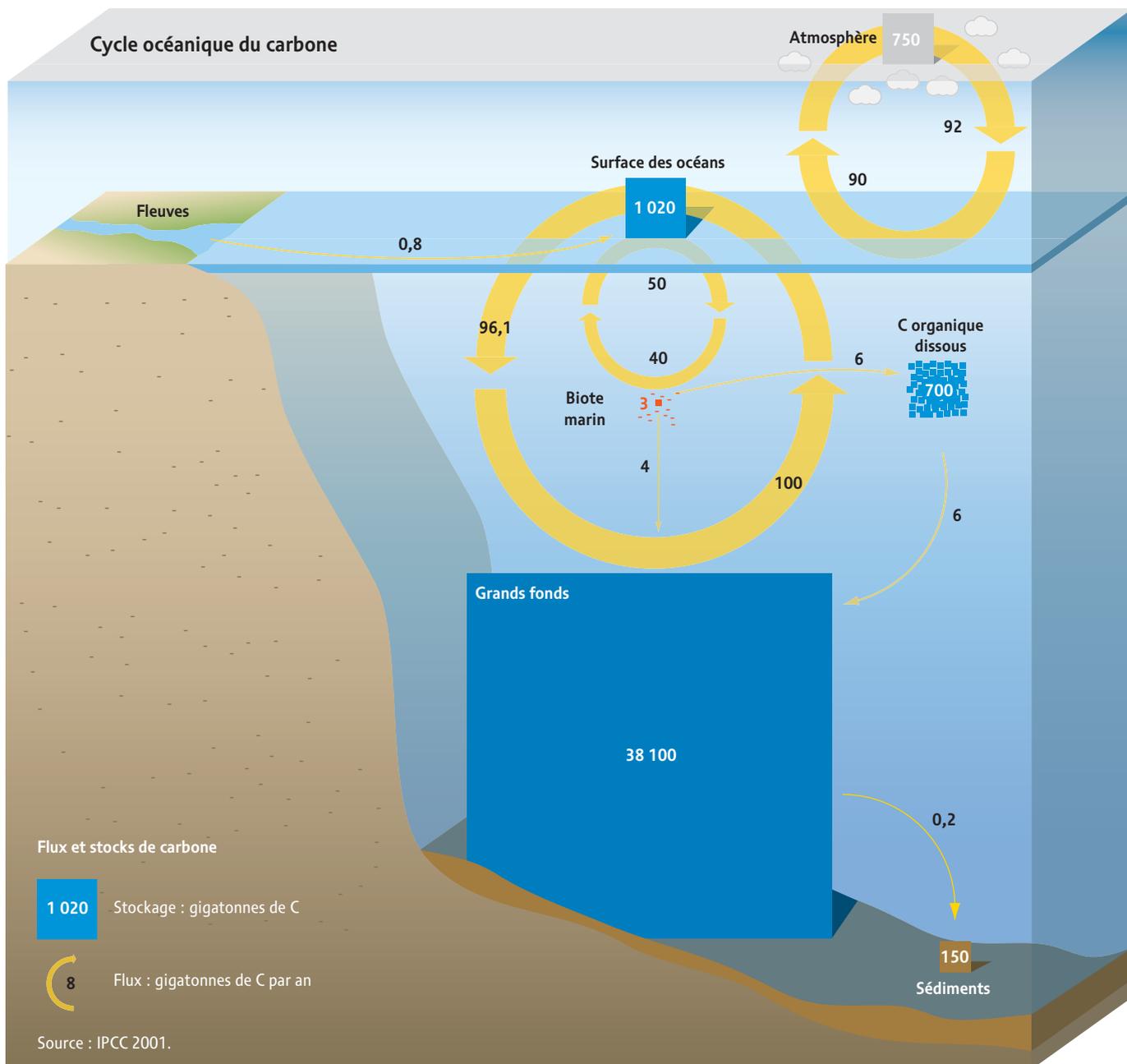
Le carbone inorganique dissous est converti en pleine mer en carbone organique dissous, ou particulaire, par le phytoplancton via la photosynthèse. Au total, les océans sont estimés compter pour près de la moitié de l'absorption biologique de carbone dans le monde (Field *et al.* 1998). La majeure partie du carbone ainsi fixé est recyclée au sein de la zone photique (la hauteur de la colonne d'eau qui est exposée à une lumière solaire suffisante pour permettre la photosynthèse), alimentant les microorganismes qui forment la base de la chaîne alimentaire marine. Dans une grande partie de l'océan, l'activité photosynthétique est limitée par les disponibilités

en matières nutritives. Parmi les exceptions notables figurent les zones de résurgence des eaux profondes (upwelling), où les eaux froides riches en éléments nutritifs remontent à la surface, ce qui favorise une croissance abondante de plancton. Dans ces conditions, le phytoplancton forme parfois des efflorescences gigantesques couvrant des centaines de milliers de kilomètres carrés à la surface des mers et influe alors sur d'importants processus écologiques et sur le cycle du carbone. Lorsque les restes de plancton mort tombent au fond de la mer, les matières organiques issues de leur biomasse s'enfouissent sous forme de sédiments exceptionnellement enrichis en carbone organique – ce mécanisme de transfert du carbone des eaux de la surface (et par conséquent indirectement de l'atmosphère) vers les grands fonds des océans et, finalement, par subduction, dans la croûte terrestre, est appelé « pompe biologique ». Seuls entre 0,03 % et 0,8 % des matières organiques présentes dans les mers forment des sédiments (Yin *et al.* 2006), et pour que ceux-ci soient piégés de manière permanente, il ne faut pas qu'ils soient recyclés dans le système d'échange trophique.

Les zones côtières (les eaux littorales jusqu'à 200 mètres de profondeur, qui comprennent les écosystèmes coralliens et les herbiers) jouent également un rôle important dans le cycle océanique du carbone. Selon diverses estimations, la majeure partie de la minéralisation et de l'enfouissement du carbone organique, ainsi que de la production et de l'accumulation de carbonates se produit dans ces régions, malgré le fait qu'elles couvrent moins de 10 % de la superficie océanique totale (Bouillon *et al.* 2008). L'enfouissement de carbone organique dans ces zones est estimé à un peu plus de 0,2 Gt C par an (Duarte 2002).

Les zones humides côtières sont susceptibles d'accumuler du carbone à des taux élevés sur de longues périodes de temps car elles s'enrichissent continuellement de sédiments à haute teneur organique, qu'elles enfouissent. Par exemple, Chmura *et al.* (2003) ont calculé que, mondialement, les mangroves accumulaient environ 0,038 Gt C par an, ce qui, lorsqu'on prend la zone de couverture en considération, indique qu'elles piègent le carbone plus rapidement que les forêts terrestres (Suratman 2008). Toutefois, on s'accorde largement pour dire que si les tendances actuelles au niveau de l'utilisation des

Cycle océanique du carbone





sols, de l'exploitation des ressources et des impacts se poursuivent, les zones humides côtières deviendront des sources plutôt que des puits de carbone (Hoojier *et al.* 2006; Jaenicke *et al.* 2008; Cagampan & Waddington 2008; Uryu *et al.* 2008; Neely & Bunning 2008; Parish *et al.* 2008). Duarte *et al.* (2005) estiment que l'ampleur considérable des pertes d'habitats côtiers végétalisés a réduit d'environ 0,03 Gt C par an l'enfouissement de carbone dans les océans.

Des solutions technologiques ont été proposées afin d'augmenter le potentiel de piégeage des océans. Certaines, telles que la fertilisation des océans par l'ajout de fer, de phosphore ou de nitrates, augmentent l'absorption biologique de carbone. D'autres, comme l'injection de CO₂ dans les grands fonds marins, font usage de réserves géophysiques. L'objet de ces interventions technologiques dans les milieux océaniques,

qui, selon les estimations, ont une capacité de stockage conjuguée de plusieurs milliers de gigatonnes de carbone, consiste à accélérer le transfert de CO₂ de l'atmosphère vers les grands fonds des océans, processus qui se produit naturellement au rythme estimé de 2 Gt C par an (Huesemann 2008). Selon certains spécialistes, il est peu probable que ces interventions réussissent à l'échelle mondiale, de nombreuses questions subsistant quant à leurs effets indésirables potentiels sur l'environnement et aux répercussions directes qu'elles pourraient avoir sur la vie marine locale. Des expériences de fertilisation des océans menées à grande échelle sont en cours, mais il est difficile de déterminer la quantité de carbone réellement piégée sur le fond océanique. Étant donné le grand nombre de variables inconnues et les déficiences actuelles des modèles, certains incitent à la prudence quant à l'utilisation de ces technologies de géoingénierie dans les océans.

RÉSUMÉ – LES ÉCOSYSTÈMES NATURELS

Renfermant plus de 2 000 Gt C, les écosystèmes terrestres du monde constituent une vaste réserve de carbone et jouent le rôle de puits, piégeant environ 1,5 Gt de carbone par an, dont les forêts tropicales représentent une forte proportion (Luyssaert *et al.* 2007; IPCC 2007b). Le piégeage de carbone à ce rythme équivaldrait à une réduction, d'ici 2011, de 40 à 70 ppm du CO₂ atmosphérique provenant d'émissions d'origine anthropique d'ici 2100 (Canadell & Raupach 2008).

Outre la préservation de ces réserves et de ces puits, les possibilités de réduire les émissions futures de gaz à effet de serre en restaurant les environnements dégradés, comme par exemple en ré-humidifiant les tourbières et en replantant des forêts dans les zones qui ont été déboisées, ainsi qu'en réduisant les taux de déboisement et les pertes de tourbières, sont considérables.

Sans la mise en œuvre de politiques et de mesures efficaces ralentissant le déboisement, l'abattage des forêts tropicales risque de conduire à l'émission de 87 à 130 Gt C supplémentaires d'ici 2100, ce qui équivaut au rejet de carbone que causerait l'utilisation de combustibles fossiles durant plus d'une décennie au rythme actuel de

consommation (Houghton 2005b; Gullison *et al.* 2007). Bien sûr, s'il était possible de mettre fin au déboisement, ces émissions seraient évitées. Toutefois, même en utilisant des hypothèses plus prudentes en ce qui concerne les réductions du déboisement (les taux de déboisement observés dans les années 1990 baissent linéairement de 50 % entre 2010 et 2050, et le déboisement cesse totalement lorsqu'il reste dans chaque pays 50 % des superficies qui étaient boisées en 2000), une réduction cumulée de 50 Gt des émissions de carbone pourrait être réalisée d'ici 2100 (Gullison *et al.* 2007).

Les tourbières constituent un autre écosystème qui offre un énorme potentiel de réduction des émissions futures. Il est estimé qu'au niveau mondial 65 millions d'hectares de tourbières sont actuellement dégradés, essentiellement à la suite de leur assèchement. On pense que l'oxydation de la tourbe dans ces zones est responsable d'émissions annuelles d'environ 0,8 Gt de carbone, ce qui équivaut à 20 % des émissions totales nettes de gaz à effet de serre des Parties de l'annexe 1 à la CCNUCC en 2003. Les incendies dans les tourbières d'Asie du Sud-Est (principalement en Indonésie) sont responsables de la moitié des émissions mondiales à partir de cet écosystème (Parish *et al.* 2008).

Le carbone dans les écosystèmes naturels

	Croissance de la végétation	Décomposition de la végétation	Source ou puits de C	Stockage actuel de C (t C/ha)	Où la majorité de C est stockée	Principale(s) menace(s) quant à l'émission potentielle de C
Toundra	Lente	Lente	Puits	Approx. 258	Pergélisol	Hausse des températures
Forêts boréales	Lente	Lente	Puits	Sols : 116–343; Végétation : 61–93	Sols	Incendies, abattage, exploitation minière
Forêts tempérées	Rapide	Rapide	Puits	156–320	Biomasse au-dessus et en dessous du sol	Pertes historiques élevées mais ayant largement cessé
Prairies tempérées	Intermédiaire	Lente	Puits probable	Sols : 133; Végétation : 8	Sols	Pertes historiques élevées mais ayant largement cessé
Déserts et brousses sèches	Lente	Lente	Puits (mais incertain)	Sols désertiques : 14–102; Sols de zones sèches : < 266; Végétation : 2–30	Sols	Dégradation des terres
Savanes et prairies tropicales	Rapide	Rapide	Puits	Sols : < 174; Végétation : < 88	Sols	Incendies suivis d'une conversion en pâturage
Forêts tropicales	Rapide	Rapide	Puits	Sols : 94–191; Végétation : 170–250	Végétation au-dessus du sol	Déboisement et dégradation des forêts
Tourbières	Lente	Lente	Puits	1 450	Sols	Assèchement, conversion, incendies
Océans et zones côtières	Pour le plancton : rapide	Rapide	Puits	(Total) Surface : 1020 Gt C; COD : 700 Gt C; Grands fonds : 38 100; Sédiments : 150	Grands fonds	Pas d'émission mais capacité d'absorption réduite



LA GESTION DU CARBONE DANS LES ÉCOSYSTÈMES DOMINÉS PAR L'HOMME

Une forte proportion des écosystèmes naturels a déjà été convertie en vue d'usages déterminés par l'Homme, comme par exemple en terres agricoles. Les estimations des superficies de terres exploitées à des fins agricoles varient. L'évaluation des écosystèmes pour le millénaire indique que les « systèmes de culture » couvrent 24 % de la surface terrestre de la planète (Millennium Ecosystem Assessment 2005), mais Foley *et al.* (2005) signalent que les terres cultivées et les pâturages occupent 40 % de la surface terrestre, soit une superficie du même ordre de grandeur que celle couverte par les forêts. La section suivante examine les possibilités de gestion du carbone en agriculture tempérée et tropicale ainsi qu'en ligniculture.

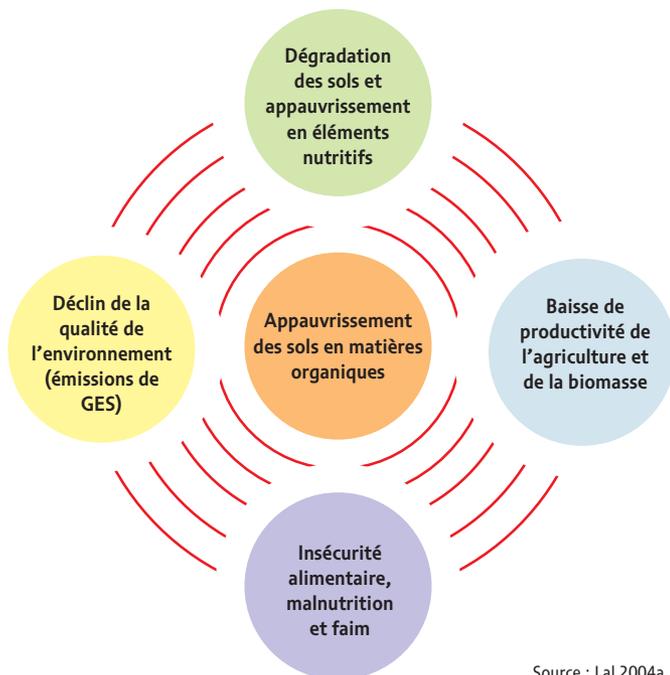


L'AGRICULTURE TEMPÉRÉE

On a acquis une bonne compréhension des meilleurs moyens de stocker le carbone dans les systèmes agricoles et les pratiques visant à augmenter ce stockage peuvent d'ores et déjà être mises en œuvre. Pour accélérer ce processus, des incitations visant à promouvoir le piégeage du carbone dans les terres cultivées pourraient être envisagées, mais il faudrait qu'elles fassent l'objet d'un suivi rigoureux et incluent une analyse tout au long de leur cycle de vie afin d'évaluer le coût carbone réel de diverses pratiques. À l'échelle locale, on pourrait offrir des incitations en faveur de l'adoption de pratiques agricoles permettant le stockage du carbone, ainsi qu'une éducation quand aux meilleures stratégies de gestion des terres pour l'augmentation du stockage de carbone.

En zone tempérée, les systèmes agricoles couvrent généralement des sols fertiles qui auraient jadis été occupés par des prairies tempérées ou des forêts. Le défrichage au profit des terres cultivées et des pâturages a considérablement réduit les réserves de carbone au-dessus du sol par rapport à leur état initial. Par ailleurs, les réserves de carbone dans les sols sont également souvent appauvries car le labour perturbe le sol, l'exposant à des organismes décomposeurs et produisant des conditions aérobies qui stimulent la respiration

Le cercle vicieux de l'appauvrissement des sols en matières organiques



Source : Lal 2004a.

et libèrent du dioxyde de carbone. Il existe d'énormes possibilités d'accroître le stockage de carbone dans ces systèmes. Ainsi, des estimations récentes indiquent que si tous les résidus de paille étaient restitués au sol sur les terres agricoles chinoises, cela permettrait de piéger environ 5 % des émissions de dioxyde de carbone résultant de l'utilisation de combustibles fossile en Chine en 1990 (Lu *et al.* 2008).

Les pertes de carbone dans les systèmes agricoles peuvent être réduites de différentes manières : recours à des systèmes de culture sans labour, rotation des cultures, adoption de systèmes culturaux appropriés, gestion intégrée des éléments nutritifs grâce à l'utilisation de compost et de fumier, paillage, lutte intégrée contre les mauvaises herbes et les parasites et amélioration du pâturage (Lal 2008). La gestion optimale, c'est-à-dire la gestion qui préserve le mieux les stocks de carbone tout en maintenant la production alimentaire, dépend des caractéristiques spécifiques du système agricole en question. Il pourrait donc être préférable de mettre les politiques de gestion des terres en œuvre au niveau local. Ce qui est clair, c'est que l'augmentation des stocks de carbone dans les systèmes agricoles peut représenter une situation gagnant-gagnant du fait qu'une forte teneur en carbone organique dans les sols améliore l'efficacité des éléments nutritifs et de l'utilisation de l'eau, réduit la perte de matières nutritives et, par conséquent, augmente la production végétale. Les conditions d'infiltration et de rétention d'eau, qui sont meilleures dans les sols à haute teneur en carbone organique, améliorent également l'infiltration de l'eau, réduisent le ruissellement et l'érosion et permettent d'éviter les dégâts de la sécheresse, contribuant ainsi à la durabilité de la production alimentaire.

Une autre possibilité consisterait à augmenter la production alimentaire sur certaines terres agricoles existantes grâce à l'utilisation très ciblée d'engrais et de pesticides, technique que l'on appelle « agriculture de précision », ce qui permettrait le retour de la végétation naturelle à d'autres endroits. Dans les pays développés, les superficies cultivées sont déjà en déclin, et il se peut que cette tendance se poursuive à



l'avenir (Balmford *et al.* 2005), libérant potentiellement des terres qui pourraient être utilisées pour le piégeage de carbone. Selon des données récentes, des gains en carbone ont été réalisés sur les terres agricoles abandonnées après l'effondrement de l'Union soviétique (gains dans les sols de 0,47 t C à l'hectare par an, Vuichard *et al.* 2009). On sait que cela est également le cas des terres abandonnées d'Europe et d'Amérique du Nord, car c'est au cours des premiers stades de succession et lors de l'établissement de la forêt que le dynamisme du puits de carbone est le plus fort.

Biochar : une panacée ?

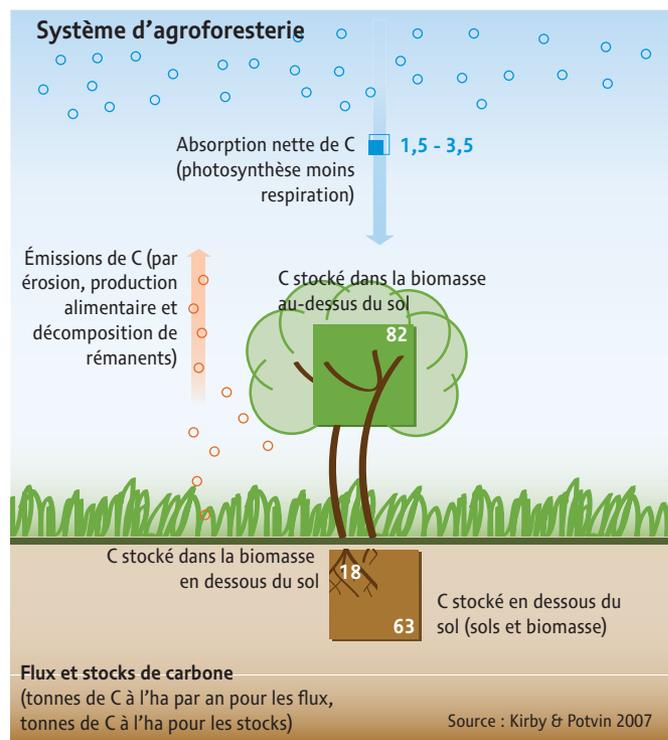
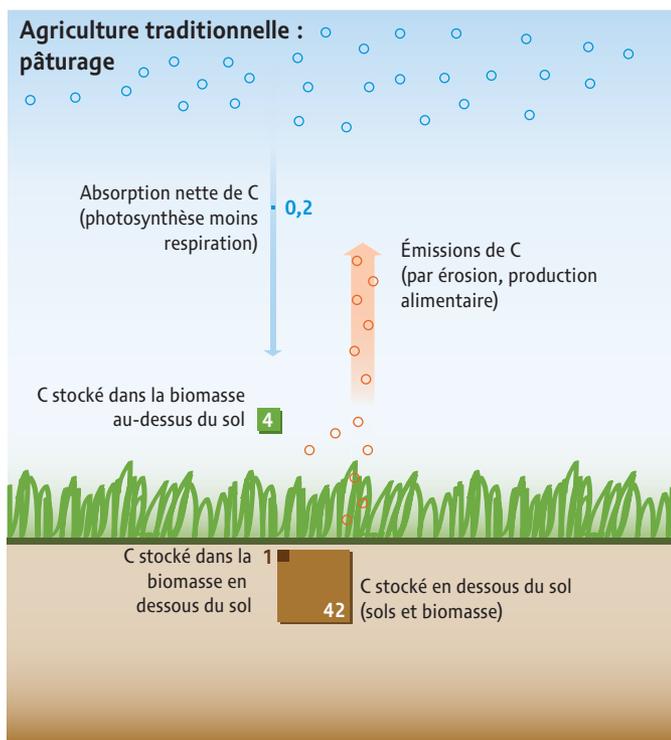
Le biochar est une nouvelle technologie pas très bien comprise, dont l'efficacité en tant que stratégie de stockage du carbone risque de dépendre fortement des facteurs économiques et environnementaux. Les études sont encore à un stade préliminaire et l'usage du biochar à grande échelle est déconseillé tant que ces incertitudes ne seront pas résolues.

Le biochar est une technologie émergente qui consiste à réduire des matières organiques par pyrolyse à des températures comprises entre 350 et 500°C, produisant de l'énergie et un charbon de bois riche en carbone, qui est restitué au sol sous une forme de carbone stable. Les études effectuées à ce jour indiquent que le biochar pourrait potentiellement piéger des quantités importantes de carbone, tout en améliorant la fertilité des sols et la rétention des éléments nutritifs (Lehmann *et al.* 2006).

Néanmoins, la création de plantations destinées à la production de biochar devrait être envisagée avec prudence. Bien que le biochar puisse être utilisé de plusieurs manières, incluant la culture itinérante, la production de charbon de bois et le recyclage des déchets agricoles (Lehmann *et al.* 2006), la source la plus importante de production de biochar sera vraisemblablement la combustion de biocarburants. Pour que cette technologie puisse se justifier en tant que stratégie de stockage de carbone, la quantité piégée doit dépasser celle produite par le transport du biochar de son site de production aux lieux de combustion et d'application. Dans le cas des résidus de récoltes, on devra veiller à ce que l'ajout de biochar apporte un gain de carbone du même ordre que la simple restitution de ces matières au site de production. Les répercussions d'une production de biochar à grande échelle sur la biodiversité et la durabilité agricole à long terme (p. ex. appauvrissement du sol en éléments nutritifs) ne sont pas connues.

L'AGRICULTURE TROPICALE

Le potentiel de restitution de carbone dans les sols des terres agricoles tropicales par l'adoption de pratiques de gestion qui, dans les bonnes conditions, peuvent aussi augmenter la productivité, est énorme. L'agroforesterie peut offrir des gains de carbone particulièrement importants, bien qu'elle puisse contribuer à une augmentation de la demande en eau. Les politiques de piégeage du carbone en agriculture devront être adaptées aux circonstances particulières pour permettre aux agriculteurs d'en tirer des avantages.



De nombreuses régions agricoles tropicales ont souffert d'un appauvrissement sérieux des réserves de carbone dans leurs sols. Il est estimé que certains sols exploités selon les systèmes d'agriculture tropicale ont perdu 20 à 80 tonnes de carbone à l'hectare, dont la majeure partie a été libérée dans l'atmosphère (Lal 2004a). L'érosion des sols, le labour et le brûlage, ou encore l'élimination des résidus de récoltes et la production animale,

réduisent les niveaux de carbone dans les sols et, au fil du temps, les sols se dégradent, ce qui conduit souvent à l'abandon des terres.

Comme les terres agricoles tropicales occupent une grande variété de types de sols et de zones climatiques, la capacité de piégeage de carbone peut varier considérablement. Dans les zones très chaudes et sèches, où les sols ont été dégradés, la mise en œuvre

de pratiques de gestion peut permettre de restituer le carbone et d'éviter d'autres pertes. Dans les climats humides, le potentiel de piégeage du carbone peut atteindre une tonne à l'hectare. Selon certaines estimations, les sols dégradés représentent la moitié du potentiel mondial de piégeage du carbone (Lal 2004a).

L'agroforesterie constitue une pratique de gestion offrant un fort potentiel de piégeage du carbone dans les régions tropicales. Dans les systèmes d'agroforesterie, la production alimentaire est alliée à la plantation d'arbres. Du fait de la présence des arbres, les systèmes d'agroforesterie stockent davantage de carbone sous forme de biomasse végétale et offrent un potentiel plus élevé de piégeage du carbone dans les sols que les systèmes d'agriculture traditionnels (Nair *et al.* 2009). Ils peuvent également être bénéfiques pour la biodiversité. Il est estimé que les pratiques d'agroforesterie permettent de stocker, en moyenne, environ 10 tonnes de carbone à l'hectare dans les régions semi-arides, 20 tonnes à l'hectare dans les zones subhumides et 50 tonnes à l'hectare dans les régions humides, les taux de piégeage de carbone dans les petites exploitations agroforestières des tropiques se situant environ entre 1,5 et 3,5 tonnes de carbone à l'hectare par an (Montagnini & Nair 2004). De plus, les systèmes d'agroforesterie peuvent réduire les pressions exercées sur les forêts naturelles, et avoir par conséquent un effet positif indirect sur le stockage du carbone dans ces dernières (Montagnini & Nair 2004).

Toutefois, comme dans le cas des systèmes d'agriculture traditionnels, des pratiques de gestion durable devront aussi être adoptées dans les systèmes d'agroforesterie afin d'assurer le piégeage du carbone et une utilisation durable des ressources en eau.

Dans certains systèmes, des interactions intrusives entre les espèces de cultures et les arbres plantés dans le cadre des mesures d'agroforesterie peuvent avoir des répercussions négatives sur le rendement des cultures (Garcia-Barrios 2003). Dans ces circonstances, des solutions de compromis, visant à stocker des quantités raisonnables de carbone plutôt que le maximum possible tout en assurant en même temps la rentabilité des cultures, seront peut-être préférables (Verchot *et al.* 2005).



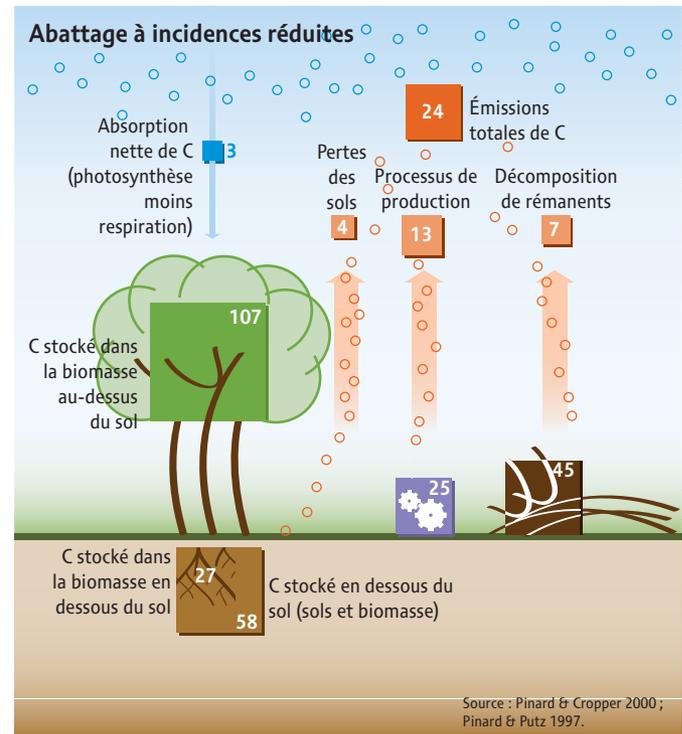
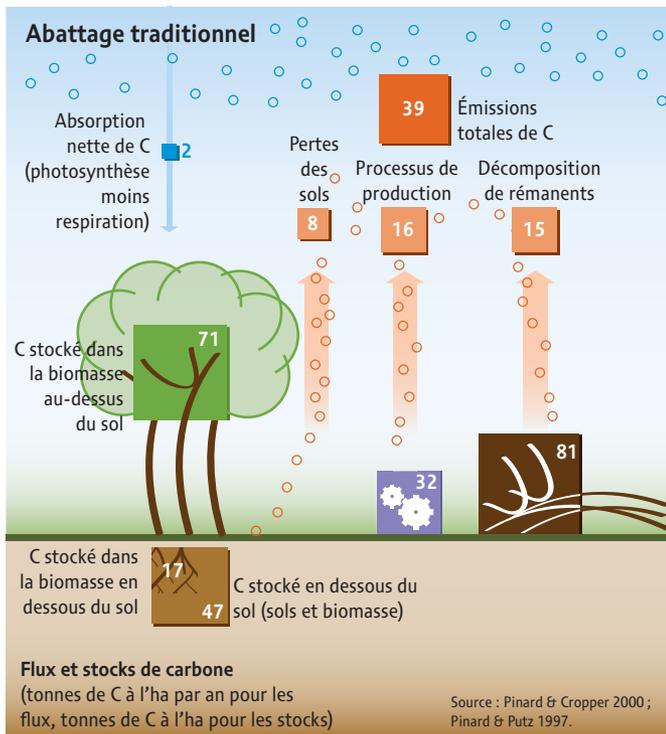
LA LIGNICULTURE

La culture des arbres peut être adaptée de manière à augmenter la quantité de carbone stockée dans les plantations.

Environ 4 % des superficies mondiales boisées sont occupées par des plantations forestières (FAO 2006). Elles satisfont une partie substantielle de la demande de produits ligneux. Les plantations, qui peuvent piéger des quantités importantes de carbone, sont généralement considérées comme des puits de carbone, à moins qu'elles ne remplacent des forêts naturelles, lesquelles sont généralement plus riches en carbone. Les plantations qui offrent le plus fort potentiel de gains en carbone sont celles qui sont créées sur des terres agricoles marginales et des sols dégradés (Lal 2004b). Toutefois, dans certains cas, les plantations épuisent les réserves de carbone dans les sols et, par conséquent, il est nécessaire de les gérer soigneusement. En augmentant la durée des périodes de rotation et en mettant en œuvre des stratégies d'amélioration des sites, les stocks de carbone peuvent être reconstitués et des quantités supplémentaires de carbone piégées par la végétation.

La plantation de peuplements mixtes de préférence à la monoculture apporte des effets bénéfiques sur la biodiversité et réduit l'apparition de parasites tout en améliorant la production ligneuse et le piégeage du carbone (Jandl *et al.* 2007).

Il peut y avoir également d'autres inconvénients. Les plantations d'arbres peuvent favoriser la recharge des nappes d'eau souterraine et la remontée des eaux profondes (upwelling), mais elles peuvent aussi réduire considérablement l'écoulement fluvial ainsi que saliniser et acidifier certains sols, entraînant ainsi des effets négatifs sur la quantité et la qualité de l'eau, ainsi que sur la qualité des sols (Jackson *et al.* 2005). Les répercussions négatives du boisement sur les ressources en eau souterraine et le débit des cours d'eau sont particulièrement courantes dans les régions sèches des tropiques (Bates *et al.* 2008).



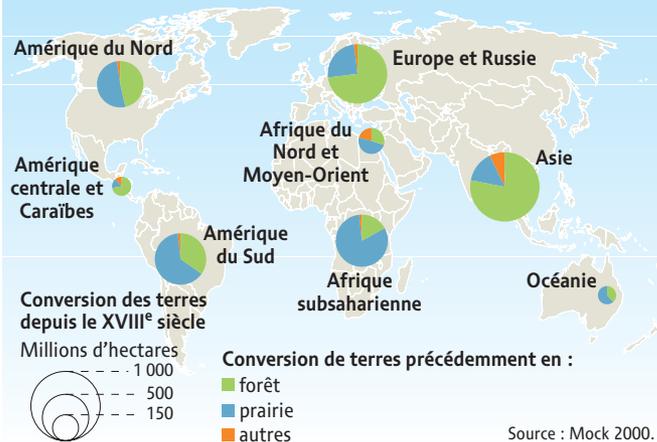


RÉSUMÉ – LES ÉCOSYSTÈMES DOMINÉS PAR L'HOMME

Il est clair que d'importantes superficies de terres doivent être conservées pour l'agriculture, mais il est également possible que les superficies nécessaires à la production alimentaire se stabilisent à l'avenir. C'est dans les systèmes d'agriculture où le potentiel technique d'atténuation des émissions de carbone est significatif que les gains facilement réalisables en matière de stockage de carbone sont les plus grands : ceux-ci sont estimés atteindre environ 0,6 Gt d'équivalent-dioxyde de carbone par an d'ici 2030 (Smith *et al.* 2008).

Il est estimé que si les meilleures pratiques de gestion étaient largement adoptées dans le secteur agricole, entre 5,5 et 6 Gt de CO₂e par an pourraient être piégées d'ici 2030, ce qui est comparable aux émissions provenant de ce secteur. Environ 90 % de ce potentiel pourrait être réalisé grâce au renforcement des puits de carbone (Smith *et al.* 2007a) et environ 10 % grâce aux réductions d'émissions. La majeure partie de ce potentiel (70 %) peut être réalisé dans les pays en développement (Smith *et al.* 2007b). Ce sont la gestion des terres agricoles, la gestion des pâturages et la restauration des sols organiques cultivés et des terres dégradées qui offrent le plus grand potentiel d'atténuation.

Conversion des écosystèmes naturels



LES INCIDENCES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES FUTURS SUR LE CARBONE DES ÉCOSYSTÈMES

Les changements climatiques ont des incidences majeures sur les facteurs qui gouvernent l'absorption et le stockage du carbone par les écosystèmes et, par conséquent, jouent un rôle capital au niveau de la capacité future des écosystèmes à piéger le carbone.

ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES

Les résultats d'études réalisées sur les forêts tropicales d'Amazonie et d'Afrique montrent que le stockage de carbone à l'hectare a augmenté au cours des dernières décennies, en conséquence peut-être de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (Phillips *et al.* 2008; Lewis *et al.* 2009). L'augmentation de la biomasse végétale s'accompagne d'une hausse des apports dans les sols de carbone dérivé des plantes et provenant des débris de feuilles et de racines (Davidson & Janssens 2006). Outre cela, il est possible que de « nouveaux » puits de carbone apparaissent en Arctique et à haute altitude si les hausses de température permettent à la végétation d'y pousser (Schaphoff *et al.* 2006).

Toutefois, divers modèles des changements futurs au niveau du piégeage biologique du carbone prévoient que les écosystèmes terrestres ne joueront le rôle de puits de carbone que jusqu'en 2050. Après cela, il se peut qu'ils deviennent saturés en carbone ou, dans le pire des cas, commencent à se comporter comme des sources de carbone vers la fin du XXI^e siècle (White *et al.* 2000; Cox *et al.* 2000; Cramer *et al.* 2001; Joos *et al.* 2001; Lenton *et al.* 2006; Schaphoff *et al.* 2006). On a découvert que plusieurs facteurs liés aux changements climatiques neutralisent l'augmentation globale des quantités de carbone absorbées et stockées par les écosystèmes, notamment lorsqu'ils s'allient à d'autres éléments provoquant la dégradation des écosystèmes (p. ex. Nepstad *et al.* 2008) : une augmentation de la température accélère la décomposition du carbone stocké

dans les sols, conduisant à un retour plus rapide de celui-ci dans l'atmosphère (respiration) (Heath *et al.* 2005; Davidson & Janssens 2006). Il est possible que les taux de respiration plus élevés en automne, et les pertes en carbone qui s'ensuivent à partir des sols, transforment les zones de forêt boréale en sources de carbone (Piao *et al.* 2008). Les expériences de fertilisation réalisées en Alaska ont montré que même si la croissance annuelle des plantes au-dessus du sol avait doublé, les pertes en carbone et en azote à partir des couches profondes des sols réduisaient à néant ce stockage accru de carbone dans la biomasse végétale (Mack *et al.* 2004). D'autres facteurs associés aux changements climatiques pourraient transformer les puits de carbone en sources, comme par exemple le dégel du pergélisol dans les écosystèmes septentrionaux (Gruber *et al.* 2004; Johansson *et al.* 2006; Schuur *et al.* 2008), une augmentation des niveaux d'ozone qui inhibe la photosynthèse (Felzer *et al.* 2005) et le changement des régimes hydrologiques qui contribue au dépérissement des forêts tropicales (Fung *et al.* 2005; Hutyra *et al.* 2005; Nepstad *et al.* 2007; Huntingford *et al.* 2008). La grave sécheresse qui a frappé la forêt pluviale amazonienne en 2005, par exemple, a entraîné des pertes de carbone considérables à partir de la biomasse au-dessus du sol, celles-ci étant estimées comprises entre 1,2 et 1,6 Gt (Phillips *et al.* 2009). Par ailleurs, les espèces qui composent les forêts tropicales risquent de changer sous l'effet des changements climatiques, ce qui pourrait avoir des incidences majeures sur les capacités de ces forêts à stocker le carbone (Bunker *et al.* 2005).

« La vulnérabilité d'un grand nombre des processus et des réserves qui interviennent dans le cycle du carbone dépend de l'ampleur des changements climatiques futurs. L'ampleur des changements climatiques futurs dépend, à son tour, de la vulnérabilité du cycle du carbone. »

(Gruber *et al.* 2004: 52)

ÉCOSYSTÈMES OCÉANIQUES

Il est difficile d'évaluer l'impact global des changements climatiques sur la capacité des milieux océaniques à absorber le carbone. Le réchauffement des températures aura sans aucun doute des incidences sur l'absorption de carbone inorganique, car le dioxyde de carbone se dissout moins facilement dans les eaux tièdes que dans les eaux froides. L'augmentation des températures peut également conduire à une stratification accrue des eaux de mer et à un ralentissement des échanges entre les eaux de la surface et les eaux profondes, entraînant un transfert moins important de carbone inorganique dissous vers le fond de l'océan. Selon les prévisions d'une étude, la capacité des océans à absorber le carbone inorganique pourrait atteindre un pic d'environ 5 Gt par an d'ici la fin du XXI^e siècle (Cox *et al.* 2000).

La présence de quantités accrues de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer peut avoir un effet fertilisant qui fait que la biomasse des groupes photosynthétiques, telles que les algues brunes et les herbiers, augmentent en même temps que le CO₂ (Guinotte & Fabry 2008). Des études in situ réalisées récemment à Ischia, en Italie, à un endroit où se trouve une cheminée naturelle d'où s'échappe du CO₂, ont montré que les communautés d'herbiers prospèrent dans les milieux où la teneur en dioxyde de carbone est accrue (Hall-Spencer *et al.* 2008).

Cermeno *et al.* (2009) prévoient que le réchauffement planétaire conduira à une diminution supplémentaire de l'efficacité de ce qu'on appelle la pompe biologique quant au piégeage du carbone, en raison de la stratification thermique et de la réduction de l'apport en éléments nutritifs dans les couches profondes de l'océan qui en résulte. Les modèles de carbone ont montré que le taux d'absorption organique du dioxyde de carbone par les océans

peut être réduit de 9 % en conséquence des impacts du changement climatique (du fait de la diminution de l'apport éolien de fer à l'océan, qui résulte en une réduction de la productivité) (Ridgwell *et al.* 2002). Dans le cas de l'océan Antarctique, on a constaté un affaiblissement du puits de carbone durant les deux dernières décennies et la réponse à la question de savoir si cette tendance va se poursuivre ou se renverser est incertaine (Le Quéré *et al.* 2007; Le Quéré *et al.* 2008).

Les conséquences écologiques de l'acidification des océans causée par une absorption accrue de carbone inorganique sont essentiellement inconnues. Toutefois, on s'attend à ce que l'acidification progressive réduise l'accrétion par adjonction de carbonates des coquilles, des os et des squelettes de la plupart des organismes marins, ce qui aura des incidences sur les chaînes alimentaires marines, du plancton carbonaté à l'augmentation des niveaux trophiques (The Royal Society 2005; Nellemann *et al.* 2008).

Globalement, bien que la plupart des modèles climatiques s'accordent sur le fait que les cycles terrestre et océanique du carbone ressentiront tous deux les effets des changements climatiques futurs, une grande incertitude subsiste quant à l'ampleur de ces répercussions (Friedlingstein *et al.* 2006). Une forte incertitude entoure la réaction des forêts tropicales humides d'Amérique du Sud et d'Afrique aux changements climatiques persistants, laquelle dépend largement de la sévérité des changements au niveau des précipitations (Schaphoff *et al.* 2006). Des expériences de grande envergure sur le terrain, telles que celles de FLUXNET, pourraient contribuer de manière considérable à l'amélioration des modèles actuels de carbone et climatiques (Running 2008; Baldocchi 2008).



POSSIBILITÉS ET ENJEUX

Le potentiel technique d'atténuation des changements climatiques par la gestion biologique du carbone, par le biais à la fois du stockage et du piégeage de carbone, est énorme. La mesure dans laquelle ce potentiel peut être réalisé dépend de la mise en place d'un cadre d'action adapté qui puisse le permettre. Dans cette section nous examinons comment le carbone des écosystèmes est traité dans les politiques climatiques actuelles, ainsi que certains des enjeux et des possibilités liés à l'accroissement du rôle qu'elles peuvent jouer.

LA GESTION DU CARBONE DES ÉCOSYSTÈMES SELON LA POLITIQUE CLIMATIQUE INTERNATIONALE

La politique climatique internationale ne s'attaque que partiellement aux émissions résultant du changement d'affectation des terres et n'offre qu'un soutien limité aux activités de piégeage biologique. L'élaboration, au titre de la CCNUCC, d'un cadre d'action global portant sur la gestion du carbone des écosystèmes constituerait un pas en avant très significatif.

Le potentiel qu'offre la gestion du carbone des écosystèmes est reconnu dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et son Protocole de Kyoto par le biais du secteur UTCATF (L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie). Dans le cadre de l'UTCATF, les pays développés (dits de l'annexe I) doivent rendre compte des changements des stocks de carbone résultant du boisement, du reboisement et du déboisement (depuis 1990), et peuvent aussi choisir de faire rapport sur les activités supplémentaires de gestion forestière, de gestion des terres agricoles, de gestion des pâturages et de restauration de la couverture végétale (Robledo & Blaser 2008). Les pays en développement n'ont ni l'obligation, ni la possibilité, de rendre compte des émissions et des activités de piégeage dans le secteur de l'utilisation des terres. Bien que les pays développés puissent obtenir des crédits carbone pour les projets de foresterie mis en œuvre dans les pays en développement par le biais du Mécanisme pour un développement propre (MDP), les règles sont restrictives (Dutschke 2007; Schlamadinger *et al.* 2007) et au moment de la rédaction de ce rapport, seul trois projets de foresterie MDP ont été acceptés.

Le cadre d'action actuel pour le secteur de l'utilisation des terres présente plusieurs déficiences (Cowie *et al.* 2007; Schlamadinger *et al.* 2007; Hohne *et al.* 2007). L'une de celles-ci concerne le manque de participation des pays en développement, comme nous l'avons

mentionné ci-dessus. La couverture incomplète des sources et des puits de carbone est une autre source de préoccupation car les Parties ne sont tenues de rendre compte que des activités relatives à la foresterie. Il est facultatif de faire rapport sur les autres activités et rien n'est prévu en ce qui concerne les zones humides (Schlamadinger *et al.* 2007; Henschel *et al.* 2008). Parmi les autres problèmes figurent les exigences complexes de surveillance et de présentation de rapports, l'obligation de ne rendre des comptes que sur les terres gérées et les difficultés à isoler les perturbations anthropiques des perturbations naturelles (Benndorf *et al.* 2007). La critique la plus sévère est peut-être que les réductions d'émissions à partir du secteur de l'utilisation des terres n'ont pas été prises en compte dans l'établissement des objectifs pour les pays développés, mais qu'elles peuvent néanmoins être utilisées pour les réaliser. Cela a conduit un grand nombre de personnes à considérer l'UTCATF comme un mécanisme de compensation, et non comme un dispositif permettant de réduire globalement les émissions (Cowie *et al.* 2007; Schlamadinger *et al.* 2007).

Ces déficiences font que la gestion du carbone des écosystèmes n'est pas actuellement appuyée par la politique internationale. Cela pourrait changer à l'avenir, car le prochain accord sur le changement climatique est actuellement en cours de négociation. La question de savoir si un cadre d'action plus efficace sera créé dépendra de diverses considérations, dont l'inclusion ou non de « toutes

les terres », et la possibilité ou non de changer la perception de l'UTCATF pour qu'on ne le considère plus comme un mécanisme de compensation, mais comme un secteur en mesure de permettre des réductions réelles des émissions (Cowie *et al.* 2007; Schlamadinger *et al.* 2007; Benndorf *et al.* 2007; Hohne *et al.* 2007). L'élaboration de nouvelles politiques ne sera sans doute pas simple. L'UTCATF a été élaboré à partir d'un processus politique complexe dans une incertitude scientifique considérable, et il est difficile de rendre compte des émissions résultant de l'utilisation des terres en raison de plusieurs facteurs, dont les questions de permanence, de fuite et d'additionnalité (voir glossaire), lesquelles devront être résolues.

À ce jour, bon nombre des débats sur les engagements relatifs à l'utilisation future des terres ont été centrés sur les forêts. Le Plan d'action de Bali, adopté par la CCNUCC lors de la treizième session de sa Conférence des Parties (COP-13), qui s'est tenue à Bali en décembre 2007, charge les Parties de négocier un instrument post-2012 pour la réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD) (Décision 1/CP.13). Les Parties ont spécifié que l'élaboration de cet instrument devrait prendre en considération « le rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et de l'augmentation des stocks de carbone forestiers dans les pays en développement. » L'inclusion de la REDD dans le prochain accord sur les changements climatiques résoudrait en partie le problème des émissions provenant du secteur de l'utilisation des terres dans les pays en développement. La portée de la REDD reste à déterminer, mais elle pourrait considérablement accroître le potentiel de gestion du carbone si elle comprenait l'augmentation des stocks de carbone (Eliash 2008).

Bien que la réduction des émissions provenant du secteur forestier soit, bien évidemment, importante, le présent rapport a également souligné la nécessité de réduire les émissions par le biais d'activités menées dans les écosystèmes non forestiers, et notamment les tourbières et l'agriculture. Cela exigera la mobilisation d'investissements dans des activités appropriées concernant l'utilisation des terres (Hohne *et al.* 2007), et certains ont suggéré que le carbone des écosystèmes non forestiers devrait être inclus dans tout accord succédant au Protocole de Kyoto. Le Terrestrial Carbon Group (Groupe Carbone Terrestre) préconise l'inclusion de tout le carbone stocké dans la biomasse et dans les sols (TCG 2008), la FAO a proposé que l'agriculture soit incluse en faisant valoir que son potentiel d'atténuation est élevé par rapport aux émissions du secteur (FAO 2009), et plusieurs auteurs ont souligné l'importance d'une comptabilisation complète du carbone dans le secteur de l'utilisation des terres (Cowie *et al.* 2007; Schlamadinger *et al.* 2007; Benndorf *et al.* 2007; Hohne *et al.* 2007).

Bien que l'on s'accorde généralement pour dire que tout accord futur sur le changement climatique devrait viser à réduire toutes les émissions anthropiques imputables au secteur de l'utilisation des terres (en conjuguant des activités UTCATF et REDD), on ne sait pas encore avec certitude si cela se réalisera. La question de l'amélioration de la couverture des activités en matière d'utilisation des terres dans le cadre de l'UTCATF est en cours de discussion pour le prochain accord sur les changements climatiques, dans la mesure où il y a possibilité d'inclure l'établissement de rapport sur les tourbières et les zones humides (FCCC/KP/AWG/2009/L.3), et il y a des chances que le cadre de comptabilisation du carbone soit rendu plus rigoureux. Toutefois, la plupart des activités supplémentaires risquent de rester facultatives, du fait qu'une comptabilisation obligatoire sur l'ensemble des écosystèmes ne paraît faisable, ni politiquement ni techniquement. De plus, la relation entre l'UTCATF et la REDD reste encore à déterminer. Il ne semble pas actuellement probable que les pays en développement soient tenus de rendre compte des émissions provenant d'écosystèmes autres que les forêts.

Comme toute politique de gestion du carbone axée sur l'utilisation des terres doit prendre en considération les questions de régime foncier et de mise à exécution, plusieurs instruments internationaux relatifs aux droits de l'Homme deviennent applicables, tels le Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels et la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones (Brown *et al.* 2008). Dans le contexte des accords multilatéraux sur l'environnement, la nécessité d'explorer les synergies entre la CCNUCC et la Convention sur la diversité biologique (CDB) parallèlement aux liens avec les plans nationaux de développement a été admise (Reid & Huq 2005; Blakers 2008), de même que les recouvrements nécessaires avec la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), puisque la désertification, la biodiversité et le changement climatique sont aussi étroitement liés (Lal 2007). Cependant, les différences entre les conventions quant aux parties prenantes et aux dispositions administratives continuent de créer des difficultés.

La mesure dans laquelle la politique climatique couvrira adéquatement les émissions et l'élimination du carbone terrestre et permettra des réductions réelles des émissions influera sans doute sur la mesure dans laquelle les pays adopteront en pratique une gestion écosystémique du carbone. Les politiques actuelles d'atténuation axées sur l'utilisation des terres ne fournissent pas le type de cadre voulu pour mettre en œuvre les mécanismes d'incitation recommandés dans le présent rapport. L'élaboration, au titre de la CCNUCC, d'un cadre d'action global portant sur la gestion du carbone des écosystèmes serait un pas en avant très significatif.

COMBIEN CELA COÛTERA-T-IL ? COMMENT PAIERONS-NOUS ?

La gestion du carbone des écosystèmes peut constituer une action d'atténuation de faible coût, mais son potentiel mondial risque d'être fortement influencé par les incitations financières offertes aux principales parties prenantes. Ces incitations peuvent être obtenues d'un instrument non marchand, tel un fonds international, ou bien du marché du carbone, ou encore par le biais d'une combinaison des deux. Les possibilités d'atténuation au niveau du carbone stocké dans les écosystèmes sont limitées dans les marchés réglementés actuels, mais cela pourrait changer si la REDD était liée au marché du carbone. Le marché volontaire est plus petit mais offre des modèles pour l'inclusion du carbone non forestier et la rémunération de la conservation de la biodiversité. Parmi les obstacles à l'inclusion du carbone des écosystèmes figurent les coûts de transaction élevés ainsi que les problèmes de comptabilisation et de permanence. Les facteurs tels que la gouvernance et les subventions influent également sur les décisions relatives à l'utilisation des terres et ont par conséquent des incidences sur le devenir du carbone stocké dans les écosystèmes.



Les nations qui cherchent le meilleur moyen d'atténuer les changements climatiques doivent prendre en considération le rapport coût-efficacité des choix dont ils disposent. La gestion du carbone des écosystèmes constitue-t-elle une bonne affaire ?

Les coûts de l'atténuation du carbone réalisée en évitant le déboisement, tout particulièrement des tourbières tropicales, peuvent être

très bas par rapport aux options « d'énergie propre » (Spracklen *et al.* 2008). Dans l'agriculture, les coûts de l'atténuation du carbone varient, mais dans un grand nombre de cas sont bas : la gestion du pâturage, des engrais et des incendies dans les prairies ne revient qu'à 5 dollars par tonne d'équivalent-dioxyde de carbone et par an. La restauration des sols et des terres dégradés coûte environ 10 dollars par tonne d'équivalent-dioxyde de carbone par an (Smith



et al. 2008). Pour placer ces coûts dans leur contexte, le GIEC a situé les coûts du piégeage et du stockage du (dioxyde de) carbone (PSC) entre 20 et 270 dollars par tonne d'équivalent-dioxyde de carbone (IPCC 2005).

Bien que la gestion du carbone des écosystèmes ne revienne pas nécessairement très cher, il est possible que d'autres utilisations des terres permettent de meilleurs rendements, tout au moins localement et à court terme. L'un des facteurs capables de faire pencher la balance est le niveau d'incitation proposé aux propriétaires fonciers. Des incitations plus fortes rendront la gestion du carbone plus compétitive par rapport aux autres utilisations des terres. Ainsi, le potentiel économique d'atténuation de la foresterie doublerait si les prix du carbone augmentaient de 20 \$/t de CO₂e à 100 \$/t de CO₂e (IPCC 2007a). Ces niveaux de piégeage du carbone pourraient neutraliser entre 2 et 4 % des émissions prévisionnelles de 20 Gt C par an d'ici 2030, sur la base des taux de croissance actuels (Canadell *et al.* 2007; Raupach *et al.* 2007).

Dans le secteur agricole, la même augmentation du prix du carbone (de 20 \$ à 100 \$ la tonne de CO₂e) ferait plus que doubler le potentiel économique d'atténuation du carbone (celui-ci passant de 1,5 Gt CO₂e par an à 4 Gt CO₂e par an (Smith *et al.* 2007a).

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, seules les activités de boisement et de reboisement ont accès au marché mondial du carbone par le biais du Mécanisme pour un développement propre (MDP) du Protocole de Kyoto et très peu de projets de foresterie sont en cours. Les marchés volontaires du carbone sont beaucoup

plus petits que le marché réglementé, mais les projets de foresterie y sont mieux représentés, ceux-ci comptant pour un cinquième environ de toutes les transactions (Ebeling & Fehse 2009). Certains marchés volontaires acceptent les projets de carbone non forestiers : le Chicago Climate Exchange (CCX) autorise des compensations par la gestion des sols des terrains de parcours et des terres agricoles aux États-Unis (Chicago Climate Exchange 2008).

Offrir des incitations financières directes en faveur de la gestion du carbone des écosystèmes n'est qu'une parmi des nombreuses options politiques et mesures d'incitation visant à changer les décisions concernant l'utilisation des terres. Dans le cas des forêts, les stratégies de déboisement évité peuvent inclure l'élimination des incitations perverses par la modification des subventions aux intrants, des systèmes de délivrance de titres de propriété foncière, des dispositifs de gouvernance des forêts et des régimes fiscaux. Des incitations positives peuvent également être mises en œuvre pour changer directement ou indirectement les éléments moteurs du reboisement, dont le renforcement des droits de propriété. Dans le secteur agricole, certaines interventions n'auront peut-être pas besoin d'être accompagnées d'incitations car elles sont bénéfiques en elles-mêmes, mais elles nécessiteront par contre des investissements dans l'échange des meilleures pratiques (voir ci-dessous). Même dans le cadre d'une stratégie d'incitation financière, un système de rémunération plus large des services rendus par les écosystèmes pourrait être plus approprié pour certains écosystèmes et types d'agriculture. La sélection de la combinaison voulue d'incitations dépendra des politiques et processus qui induisent des changements d'affectation des terres.

LA CONCURRENCE SUR LES TERRES ET LE PROBLÈME DES MOYENS DE SUBSISTANCE

Il existe des demandes concurrentielles en matière d'utilisation des terres. Toute politique qui vise à promouvoir la gestion du carbone des écosystèmes doit résoudre les conflits entre les différentes utilisations des terres et veiller à ne pas désavantager les pauvres.

Pour avoir un effet positif sur le piégeage et le stockage de carbone dans les écosystèmes terrestres (tant naturels que dominés par l'Homme), les politiques peuvent viser soit à assurer le maintien des utilisations existantes des terres – par exemple en renforçant la protection des terres retirées de la production qui renferment des réserves substantielles de carbone, telles que les forêts de tourbières – soit à déclencher des changements d'affectation des terres à grande échelle, par exemple en changeant les pratiques agricoles. Toutes politiques de cette sorte ainsi que leurs répercussions devront être prises en considération dans le contexte d'autres besoins en terres et utilisations des sols, qui peuvent être concurrentiels : pour la production alimentaire, comme espace vital, pour la conservation de la biodiversité, à des fins récréatives ou pour répondre à des besoins esthétiques ou spirituels (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

Comment peut-on alors optimiser l'utilisation et la gestion des terres pour répondre à toute une variété de besoins ? Une solution consiste à maximiser l'efficacité de l'utilisation des terres dans un seul but prioritaire – tel que la production alimentaire ou l'habitat humain – en un lieu donné, laissant ainsi davantage de terres disponibles pour d'autres usages (tels que récréation, conservation des espèces ou piégeage du carbone) ; une autre consiste à exploiter une parcelle

à des fins multiples ou pour en tirer des avantages multiples (Green *et al.* 2005).

Quelle que soit l'option choisie, des compromis seront presque certainement nécessaires et, dans chaque cas spécifique, des individus ou groupes d'individus particuliers accorderont des priorités différentes à différents types d'utilisation des terres. Lorsque plusieurs utilisations concurrentielles des terres sont possibles, des conflits risquent de se produire, avec la forte probabilité qu'il y ait différents « gagnants » et « perdants », du moins à court et moyen termes. Sans une planification rigoureuse, ce sont les pauvres et les défavorisés qui risquent généralement d'être lésés, et ceci, pour diverses raisons : ils dépendent souvent dans une forte mesure des ressources locales et ne sont pas en mesure d'acheter des substituts ; on tient généralement moins compte de leur avis lors des prises de décisions à quelque niveau que ce soit, mais plus particulièrement aux niveaux national et international ; et il se peut qu'ils connaissent moins bien les lois, règlements et politiques et sachent moins bien comment en faire usage pour défendre leurs besoins et leurs aspirations.

Le recours à divers types d'incitations financières, afin d'encourager par exemple la culture dédiée aux biocarburants, ou de promouvoir le boisement à grande échelle pour le piégeage du carbone, constitue une

source de préoccupation potentielle particulière. Dans de nombreux cas, ces incitations auront pour effet d'accroître la valeur économique de terres jusqu'ici considérées comme ayant peu d'intérêt du point de vue commercial. Parfois, ces terres sont en fait marginales; dans de tels cas, leur affectation à ces fins risque peu de causer un conflit. Cependant, parfois, il n'en est pas de même. La parcelle de terre peut être très importante pour la population locale – comme terrain de parcours ou pâturage pour le bétail, ou comme source d'aliments sauvages ou d'autres ressources – ou elle peut être importante pour la biodiversité, ou une combinaison des deux. L'affectation de telles terres peut entraîner des pertes de biodiversité et priver la population locale d'avantages traditionnels, en ne leur offrant qu'une maigre, voire aucune, compensation. Pour éviter que cela ne se produise, tout régime d'incitation devra prendre en compte l'éventail complet des valeurs de la terre, et prendre conscience du régime foncier coutumier et des droits d'accès traditionnels. On devra donner à la population locale les moyens d'agir et l'encourager à prendre pleinement part au processus décisionnel (Rights and Resources Initiative 2008).

Quoi qu'il en soit, les mesures reposant sur des incitations et engageant la participation de la population locale risquent d'entraîner des coûts de transaction plus élevés et d'attirer moins d'investissements. Il y a également un risque que les pauvres conviennent de mener à bien certaines activités (telles que la plantation d'arbres) dont le coût de mise en œuvre dépassera le montant des paiements qu'ils ont acceptés (Campbell *et al.* 2008; Coad *et al.* 2008). Il se peut qu'il existe, en outre, des inégalités locales, dont un déséquilibre des sexes, qui font que les allocations sont bien perçues par la collectivité locale, mais ne sont pas distribuées de manière égale entre ses membres, les coûts étant supportés de manière disproportionnée par les très pauvres (Parasai 2006).

Toutefois, avec une planification rigoureuse, il n'y a aucune raison intrinsèque pour que les politiques qui appuient le stockage et le piégeage du carbone dans les écosystèmes ne soient pas bénéfiques au niveau local. Cela se vérifie en particulier pour le secteur agricole, où les possibilités d'augmenter le stockage du carbone de manières qui peuvent également améliorer la productivité à long terme sont énormes. On se heurte pourtant souvent à des obstacles considérables quand il s'agit de changer les pratiques agricoles, notamment lorsque les agriculteurs ont peu accès aux informations et aux ressources. L'apport d'une assistance extérieure, au minimum sous la forme d'un renforcement des capacités et de l'introduction des technologies appropriées, sera nécessaire pour surmonter ces obstacles. Comme nous l'avons expliqué dans la section sur l'agriculture, les manières appropriées d'augmenter les réserves de carbone dans les sols différeront en fonction des circonstances. Des politiques de gestion du

carbone trop prescriptives quant au choix des technologies pourraient pousser les agriculteurs et les gestionnaires de l'occupation des sols à adopter des méthodes qui ne conviennent pas dans leur cas, ce qui aurait des répercussions négatives sur leurs moyens de subsistance. L'expérience montre que les agriculteurs préfèrent un « panier » de technologies à essayer, qu'ils adaptent très souvent. Pour certains, d'ailleurs, cela fait partie d'un processus par le biais duquel les agriculteurs mettent, en fait, la technologie au point (Sumberg & Okali 1997). Bon nombre des pratiques agricoles qui permettent de stocker davantage de carbone peuvent être mises en œuvre à coût faible, voire nul (Smith 2004), et si les agriculteurs décident que les mesures sont valables, ils les conserveront même lorsqu'ils ne recevront plus de fonds extérieurs, ceci permettant d'obtenir un effet d'atténuation supérieur à celui pour lequel les paiements ont été versés.

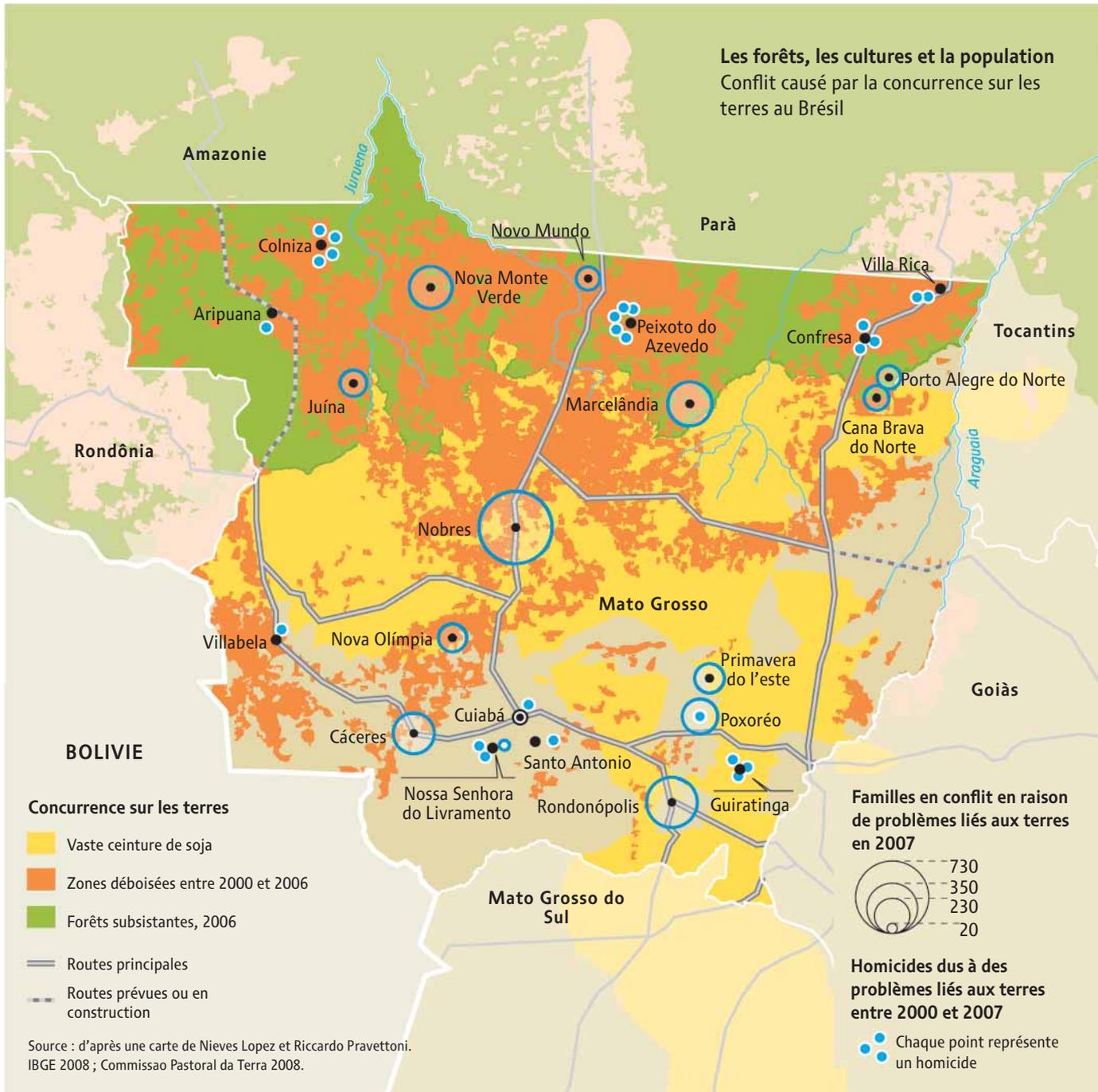
TENDANCES FUTURES PROBABLES

Comprendre les tendances futures probables en matière d'utilisation des terres et ce qui influe sur ces tendances constitue un élément crucial de toute tentative de gestion du carbone stocké dans les écosystèmes. Dans son quatrième rapport d'évaluation, le GIEC a examiné les moteurs du changement d'affectation des terres du point de vue, d'une part, de la demande de produits et services issus de la terre, tels que la demande de denrées alimentaires, et, d'autre part, des possibilités de production et des coûts d'opportunité, tels que le changement technologique (IPCC 2007a). La croissance démographique et le développement économique peuvent être perçus comme les meilleurs éléments moteurs.

Dans le cadre de quelques études mondiales, des projections à long terme de l'utilisation des terres ont été calculées au moyen de scénarios faisant intervenir ces facteurs ainsi que d'autres aussi, p. ex. les scénarios d'émissions (SRES) du GIEC, l'Avenir de l'environnement mondial du PNUE et l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire. À court terme, presque tous les scénarios indiquent une augmentation des superficies de terres cultivées (IPCC 2007a).

Les scénarios à plus long terme donnent des résultats plus mitigés. Ceux qui supposent des taux de croissance plus élevés de la population et de plus fortes demandes de denrées alimentaires parallèlement à des taux d'amélioration technologique plus faibles et, par suite, des augmentations plus faibles du rendement des cultures, suggèrent une forte expansion (jusqu'à 40 %) des superficies agricoles entre 1995 et 2100. Ceux qui supposent une croissance plus lente de la population et un degré élevé d'évolution technologique, indiquent que l'on pourrait voir une diminution de la superficie de terres agricoles pouvant atteindre jusqu'à 20 % d'ici la fin du siècle.

Les forêts, les cultures et la population
 Conflit causé par la concurrence sur les terres au Brésil



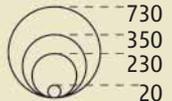
Concurrence sur les terres

- Vaste ceinture de soja
- Zones déboisées entre 2000 et 2006
- Forêts subsistantes, 2006

- Routes principales
- Routes prévues ou en construction

Source : d'après une carte de Nieves Lopez et Riccardo Pravettoni. IBGE 2008 ; Comissão Pastoral da Terra 2008.

Familles en conflit en raison de problèmes liés aux terres en 2007



Homicides dus à des problèmes liés aux terres entre 2000 et 2007

••• Chaque point représente un homicide

AVANTAGES POUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES

La mise en œuvre de politiques qui préservent et restituent le carbone des écosystèmes peut également offrir des avantages pour la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes, mais elle ne sera susceptible de le faire que si les politiques sont conçues en tenant compte de ces objectifs.



Dans les discussions sur la gestion du carbone des écosystèmes, on admet que celle-ci doit offrir des avantages multiples pour être politiquement acceptable. Mais on ne peut pas compter qu'elle fournisse ces avantages en l'absence d'autres interventions : les priorités devront être coordonnées, et des politiques internationales et nationales intersectorielles, de même que des contributions de la recherche interdisciplinaire, seront nécessaires (Lal 2007 ; Miles & Kapos 2008). Les mesures de gestion du carbone offrent un fort potentiel en ce qui concerne l'apport d'avantages

multiples, tels que la conservation des zones riches en biodiversité et l'amélioration des services rendus par les écosystèmes, comme par exemple la fertilité des sols (UNEP-WCMC 2008 ; Eliasch 2008 ; Reid & Swiderska 2008).

Les mécanismes de REDD seront très vraisemblablement bénéfiques pour la biodiversité et peuvent être conçus pour profiter en même temps aux utilisateurs des ressources locales. L'enjeu consiste à concevoir des réglementations qui assurent les deux, évitant ainsi la nécessité de compromis au niveau de la biodiversité ou des moyens de subsistance. En général, les mécanismes qui incluent la réduction de la dégradation des forêts sont susceptibles d'avoir un plus grand impact positif sur la biodiversité que ceux qui se limitent à la réduction du déboisement. Les activités de reboisement peuvent aussi avoir des effets positifs sur la biodiversité (Strassburg 2007 ; Strassburg *et al.* 2008 ; TCG 2008). Toutefois, le boisement peut souvent avoir des répercussions négatives sur la biodiversité.

Divers outils de cartographie sont en cours d'élaboration afin de faciliter la sélection de sites pour la mise en œuvre de projets de REDD grâce à l'identification de zones qui sont riches tant en carbone qu'en biodiversité (UNEP-WCMC 2008).

Le standard « Climat, Communautés et Biodiversité » élaboré par l'Alliance CCB est le standard international le plus largement utilisé et respecté pour l'obtention d'avantages multiples à partir des projets carbone terrestres (CCBA 2008). Il vise à encourager l'élaboration, dans le cadre du Protocole de Kyoto, de projets UTCATF qui pourront avoir des répercussions positives nettes sur la biodiversité, ainsi que sur le bien-être social et économique (Taiyab 2006). Six projets ont déjà été approuvés, 10 autres sont actuellement en cours d'examen et plus de 100 projets prévoient d'appliquer également le standard (CCBA 2008). Les enseignements tirés de l'application de ce standard pourraient par conséquent constituer une contribution importante aux négociations sur les politiques complémentaires concernant les mesures à prendre pour la gestion du carbone des écosystèmes.



CONCLUSIONS

Le fait que nous exerçons des effets profonds et lourds de conséquence sur le climat mondial ne fait plus aucun doute sérieux. En conséquence des activités humaines, les concentrations dans l'atmosphère de gaz dits à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O), atteignent actuellement des niveaux jamais vus depuis au moins les 650 000 dernières années, et elles augmentent à un rythme sans précédent. Environ deux tiers de l'augmentation des gaz à effet de serre au cours des 150 dernières années ou à peu près peuvent être imputés à l'utilisation de combustibles fossiles. La majeure partie du reste provient du changement d'affectation des terres, une petite proportion provenant de la combustion de carbonate de calcium pour la production de ciment. Le changement d'affectation des terres – et plus notablement le déboisement – entraîne une augmentation des gaz à effet de serre, principalement par la libération du carbone stocké dans la biomasse.

Les gaz à effet de serre émis en conséquence des activités humaines entrent dans les cycles du carbone et de l'azote. Grâce à ces cycles, tous les gaz à effet de serre résultant des activités humaines ne restent pas dans l'atmosphère : il est estimé que près de 30 % de ces émissions au cours des 150 dernières années ont été absorbé par les océans et un peu moins de 30 % par les écosystèmes terrestres.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat estime que pour éviter les pires conséquences du changement climatique, il faut, au minimum, stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre entre 445 et 490 parties par million d'équivalent-dioxyde de carbone. La concentration actuelle se situe autour de 430 parties par million de CO₂e. Au rythme actuel d'émission de CO₂ uniquement, le seuil de 445 parties par million de CO₂e sera atteint en sept ans seulement, voire même plus tôt si la production accélérée observée durant les premières années du siècle actuel se poursuit.

Les concentrations de gaz à effet de serre peuvent être stabilisées, soit en réduisant le taux d'émission, soit en augmentant le taux d'absorption des gaz, soit une combinaison des deux. Il est clair que la réduction des émissions provenant de l'utilisation de combustibles fossiles est d'une importance capitale. Les technologies de piégeage du carbone, qui stockent les gaz à effet de serre produits en des points de rejets concentrés, tels que les centrales électriques, offrent un certain espoir de réduction du taux d'augmentation des émissions, bien que leur impact global probable à court et moyen termes reste incertain.

Toutefois, la gestion de l'utilisation des combustibles fossiles et l'adoption de technologies permettant de piéger le carbone ne suffiront pas à elles seules pour empêcher des changements climatiques dangereux au cours des prochaines décennies. La gestion du carbone stocké dans les systèmes vivants doit jouer un rôle capital : même si l'on parvenait à réduire drastiquement les émissions produites par les combustibles fossiles, les pratiques actuelles en matière d'utilisation des terres entraîneraient toujours une augmentation considérable des concentrations de gaz à effet de serre. Ce type de gestion comprend deux éléments fondamentaux : veiller à ce que les stocks de carbone existants que renferment les écosystèmes naturels et les terres agricoles restent intacts ; et tenter d'augmenter le rythme auquel le carbone est piégé dans ces systèmes.

En fait, certains aspects du cycle du carbone sont actuellement impossibles à maîtriser directement par le biais de politiques ou d'interventions technologiques – c'est le cas notamment du rôle des océans en tant que catalyseur pour le cycle du carbone et le climat mondial (des expériences de fertilisation sont actuellement effectuées à grande échelle pour essayer d'améliorer la fixation du carbone par la photosynthèse océanique, mais on ne peut exercer pratiquement aucune influence humaine sur le rôle physique et purement chimique des océans dans le cycle du carbone). De même,

le réchauffement aux latitudes élevées entraînera dans ces régions un dégel au moins partiel de la couche profonde des sols qui est gelée en permanence, ou pergélisol, libérant dans l'atmosphère une proportion des vastes quantités de carbone qui sont stockées dans le pergélisol. Actuellement, il n'existe aucune technologie permettant d'éviter que cela ne se produise : la seule mesure certaine pour se prémunir contre ce problème consiste en fait à empêcher le réchauffement. Globalement, il semble que les possibilités d'augmenter activement les quantités de carbone stockées dans la plupart des écosystèmes naturels, ou essentiellement naturels, soient relativement limitées actuellement.

Il existe, toutefois, de nombreuses zones où des politiques adéquates et des interventions directes pourraient avoir des répercussions importantes. De grandes quantités de carbone sont stockées dans les sols tourbeux du monde entier et dans les forêts tropicales humides qui subsistent. La protection de ces zones contre l'assèchement et le déboisement aiderait considérablement à ralentir le rythme auquel les gaz à effet de serre augmentent, et permettrait de fournir en même temps des avantages bénéfiques pour la biodiversité. Les forêts de tourbières tropicales de l'Asie du Sud-Est sont d'une importance particulière – ces zones sont ironiquement menacées de déboisement pour la production de biocarburants, malgré le fait que leur valeur en tant que réserve de carbone l'emporte largement sur les éventuels avantages tirés des biocarburants qui les remplaceront.

Les systèmes d'agriculture offrent de nombreuses possibilités de piégeage actif du carbone et de réduction des émissions. Les réserves de carbone dans les sols des terres agricoles, qui sont souvent très appauvries, pourraient être restituées par l'adoption de techniques appropriées, telles que la culture sans labour et la gestion intégrée des éléments nutritifs grâce à l'utilisation de compost et de fumier. Globalement, on pense que si les meilleures pratiques de gestion étaient largement adoptées, le secteur agricole pourrait devenir

pratiquement neutre en carbone d'ici 2030. Non seulement cela est techniquement possible, mais c'est aussi économiquement réalisable. En effet, le GIEC a conclu que si le coût des émissions de carbone était estimé à un juste niveau (à savoir, 100 \$ la tonne d'équivalent-dioxyde de carbone), en 2030 le secteur agricole serait potentiellement le deuxième secteur le plus important, après celui du bâtiment, du point de vue de la contribution à l'atténuation des changements climatiques. À ce niveau de tarification du carbone, la foresterie et l'agriculture deviennent conjointement plus importantes que tout autre secteur. Même à des prix carbone plus bas, ces deux secteurs conservent une importance considérable pour l'atténuation des changements climatiques.

De nombreux défis restent à relever avant la mise en œuvre effective des mesures. Le plus grand potentiel d'augmentation du stockage du carbone dans les systèmes d'agriculture réside dans les pays en développement, où les manques de connaissances et d'accès aux technologies constituent des obstacles majeurs au changement. Pour pouvoir surmonter ces obstacles, il faudra prendre l'engagement de renforcer les capacités à très grande échelle. Les systèmes axés sur des incitations, visant par exemple à encourager la plantation de cultures destinées à la production de biocarburants sur des terres marginales, doivent être très soigneusement planifiés et mis en place si l'on ne veut pas qu'ils aient des conséquences négatives sur les moyens de subsistance locaux, la biodiversité, ou bien les stocks de carbone eux-mêmes.

Si la communauté internationale parvient à relever ces défis, les systèmes vivants de la Terre pourront jouer un rôle capital dans la lutte contre les changements climatiques dangereux. Non seulement cela, mais les mesures permettant de gérer le carbone stocké dans les écosystèmes peuvent offrir d'énormes avantages potentiels pour la biodiversité et la fertilité des sols. Cette occasion de contribuer à la réalisation d'un si grand nombre d'objectifs importants est à ne pas manquer.

GLOSSAIRE

Abattage à incidences réduites

Mise en œuvre intensivement planifiée et soigneusement contrôlée des travaux de récolte afin de minimiser l'impact sur les peuplements forestiers et les sols, généralement par une coupe sélective d'arbres choisis individuellement (FAO 2004).

Acidification

Voir *Acidification de l'océan*

Acidification des océans

Diminution du pH de l'eau de mer due à l'absorption de dioxyde de carbone anthropique (GIEC 2007).

Additionnalité

L'additionnalité fait référence à la prévention d'émissions de carbone qui se seraient produites dans un scénario de situation inchangée (business-as-usual) (Angelsen 2008). C'est une question qui concerne le secteur de l'utilisation des terres car le stockage de carbone dans les écosystèmes à des endroits où il n'en aurait pas été dégagé ne peut pas être compensé au titre de réduction d'émissions.

Agriculture de précision

Ensemble de technologies qui facilitent une gestion améliorée de la production agricole en tenant compte des variations de performance des cultures dans l'espace (Robertson *et al.* 2007).

Agroforesterie (systèmes d')

Systèmes mixtes associant les cultures et les arbres et procurant du bois, des produits forestiers non ligneux, des denrées alimentaires, du combustible, du fourrage et un abri. (Chopra *et al.* 2005).

Atténuation

Intervention anthropique pour réduire les sources et augmenter les puits de gaz à effet de serre (Department of Climate Change 2008).

Biocarburant

Tout carburant liquide, gazeux ou solide produit à partir d'une matière organique d'origine

végétale ou animale. Par exemple, l'huile de soja, l'alcool résultant de la fermentation du sucre, la liqueur noire issue de la préparation de la pâte à papier, le bois en tant que combustible, etc. Les biocarburants de deuxième génération sont des produits tels que l'éthanol et le biodiesel, qui sont issus de la transformation de la biomasse ligno-cellulosique par voie chimique ou biologique (GIEC 2007).

Biome

Un biome est un élément régional majeur et distinct de la biosphère, généralement constitué de plusieurs écosystèmes (forêts, cours d'eau, étangs, marécages, etc. dans une même région). Les biomes se caractérisent par des communautés végétales et animales particulières (GIEC 2007).

Boisement

Le boisement est défini suivant le Protocole de Kyoto comme la conversion directe par l'action humaine de terres non forestières en terres forestières permanentes (pour une période d'au moins 50 ans) (Angelsen 2008).

CCNUCC

Voir *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est le premier traité international sur le climat. Entrée en vigueur en 1994, elle a été ratifiée depuis par 189 pays, y compris les États-Unis. Plus récemment, plusieurs pays ont approuvé un addendum au traité : le Protocole de Kyoto, qui prévoit des mesures plus énergiques (et juridiquement contraignantes) (Kirby 2008).

Culture sans labour

Ensemble de pratiques culturales spécialement conçues, qui sont adoptées pour conserver les ressources en sol et en eau, maintenir des rendements élevés et satisfaisants, minimiser la dégradation des sols et de l'environnement et préserver les ressources du sol (Lal 1995).

Cycle du carbone

Expression utilisée pour désigner le flux de carbone (sous diverses formes, telles que dioxyde de carbone) dans l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et la lithosphère (GIEC 2007).

Durabilité

Caractéristique ou état permettant de satisfaire les besoins de la population actuelle et locale sans compromettre la capacité des générations ou populations futures dans d'autres localités à satisfaire leurs besoins (Chopra *et al.* 2005).

Fuite

Dans le contexte du changement climatique, la fuite de carbone est la conséquence des interventions visant à réduire les émissions dans une zone géographique donnée (sub-nationale ou nationale) qui conduisent à une augmentation des émissions dans une autre région. Par exemple, si la restriction de l'empiètement de l'agriculture sur les forêts dans une région donnée entraîne la conversion de forêts en terres agricoles dans une autre région, on considère qu'il s'agit d'une « fuite ». Dans le contexte de la REDD, le phénomène de fuite est également désigné sous le nom de « déplacement d'émissions » (Angelsen 2008).

Gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre sont des constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'acide nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre (GIEC 2007).

Gouvernance

L'exercice de l'autorité politique, économique et administrative dans le cadre de la gestion des affaires d'un pays à tous les niveaux. La gouvernance est un concept neutre com-

prenant les mécanismes, processus, relations et institutions complexes au moyen desquels les citoyens et les groupes expriment leurs intérêts, exercent leurs droits et assument leurs obligations et auxquels ils font appel pour régler leurs différends (UNDP 1997).

L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF)

Secteur d'inventaire des gaz à effet de serre qui couvre les émissions et éliminations des gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et des activités de foresterie directement liés aux activités humaines (UNFCCC 2009).

MDP

Voir Mécanisme pour un développement propre

Mécanisme pour un développement propre (MDP)

Mécanisme défini dans le Protocole de Kyoto et conçu pour aider les pays développés (dits de l'annexe I) à réaliser leurs objectifs de réduction des émissions. Ce mécanisme réduit les émissions par le biais de la mise en œuvre, dans les pays en développement (dits de l'Annexe II), de projets qui sont portés au crédit des pays de l'Annexe I qui les financent et les mettent en œuvre. Le MDP vise non seulement à réduire les émissions ou à renforcer les puits, mais aussi à contribuer au développement durable du pays bénéficiaire (Peskett *et al.* 2008).

Permanence

Durée et non réversibilité d'une réduction d'émissions de GES (Angelsen 2008). C'est une question qui concerne le secteur de l'utilisation des terres car le carbone stocké et piégé dans les écosystèmes reste toujours théoriquement vulnérable et pourrait se dégager à tout moment indéterminé à l'avenir.

Piégeage

L'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique par des processus, soit biologiques (tels la photosynthèse par les plantes et les arbres,

voir Piégeage biologique), soit géologiques (tels le stockage du dioxyde de carbone dans les réservoirs souterrains) (Department of Climate Change 2008).

Piégeage biologique

L'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique par des processus biologiques, comme par exemple la photosynthèse par les plantes et les arbres (Department of Climate Change 2008).

Piégeage du carbone

Processus consistant à augmenter la teneur en carbone d'un réservoir autre que l'atmosphère (Chopra *et al.* 2005).

Piégeage et stockage du (dioxyde de) carbone (PSC)

Processus consistant à extraire le dioxyde de carbone (CO₂) des sources d'émissions industrielles et énergétiques, à le transporter vers un site de stockage et à l'isoler de l'atmosphère pendant une longue période de temps (GIEC 2007).

Protocole de Kyoto

Accord signé sous les auspices de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Les pays qui ratifient ce protocole s'engagent à réduire leurs émissions de dioxyde de carbone et de cinq autres gaz à effet de serre (GES), ou à participer à un échange de quotas d'émissions s'ils maintiennent ou augmentent leurs émissions de ces gaz. Le Protocole de Kyoto couvre maintenant plus de 170 pays au niveau mondial, mais seulement 60 % des pays en ce qui concerne les émissions mondiales de gaz à effet de serre. En décembre 2007, les États-Unis et le Kazakhstan étaient les deux seuls pays signataires à ne pas avoir ratifié l'acte. La première période d'engagement prévue par le Protocole de Kyoto se termine en 2012, et des négociations internationales ont été entamées en mai 2007 sur la période d'engagement suivante (Peskett *et al.* 2008).

PSC

Voir Piégeage et stockage du carbone

Puits

Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol (GIEC 2007).

Puits de carbone

Voir Puits

Reboisement

Le reboisement est la « conversion directement liée aux activités humaines de terres non forestières en terres forestières par la plantation, l'ensemencement et/ou la promotion par des activités anthropiques des sources naturelles de graines, sur des terres qui étaient boisées, mais ont été converties en terres non forestières ». Au cours de la première période d'engagement prévue par le Protocole de Kyoto, les activités de reboisement ont été définies comme le reboisement de terres qui n'étaient pas boisées au 31 décembre 1989, mais avaient été occupées par des forêts à un moment ou à un autre au cours des 50 années précédentes (Angelsen 2008).

Respiration

Processus par lequel les organismes vivants transforment les matières organiques en dioxyde de carbone, en produisant de l'énergie et en consommant de l'oxygène moléculaire (IPCC 2007c).

Source

Tout processus, activité ou mécanisme qui libère dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol (GIEC 2007).

Source de carbone

Voir Source

UTCATF

Voir L'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie

COLLABORATEURS ET RÉVISEURS

AUTEURS

Kate Trumper, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Monika Bertzky, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Barney Dickson, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Geertje van der Heijden, NERC Centre for Population Biology, Imperial College Londres, Royaume-Uni, et Grantham Institute for Climate Change, Imperial College Londres, Royaume-Uni
Martin Jenkins, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Peter Manning, NERC Centre for Population Biology, Imperial College Londres, Royaume-Uni, et Grantham Institute for Climate Change, Imperial College Londres, Royaume-Uni

ASSISTANCE ÉDITORIALE

Janet Fernandez Skaalvik, UNEP/GRID-Arendal, Norvège

CARTOGRAPHIE ET GRAPHIQUES

Riccardo Pravettoni, UNEP/GRID-Arendal, Norvège

MISE EN PAGE

UNEP/GRID-Arendal, Norvège

TRADUCTION

Françoise Barber

REMERCIEMENTS

Nous sommes très reconnaissants des contributions et des conseils que nous avons reçus des participants à deux réunions : The Terrestrial Carbon Scoping Workshop, accueilli par le H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment in Washington, D.C., les 28 et 29 janvier 2009 ; et la réunion du Groupe consultatif pour la science et la technologie (GCST) du Fonds pour l'environnement mondial, accueilli par la FAO à Rome, du 28 au 30 avril. Nous sommes particulièrement reconnaissants à Thomas Lovejoy en la matière. Nous souhaitons également remercier Rody Oñate Zuniga et les autres membres du personnel du Bureau régional du PNUE pour l'Amérique latine et les Caraïbes (ROLAC) pour leur rôle dans la préparation de l'édition espagnole du rapport.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

1 iStockphoto/Heather Craig 1 iStockphoto/Francisco Romero 5 iStockphoto 7 iStockphoto/Claudio Giovanni Colombo 8 iStockphoto/Ali Ender Biring 14 iStockphoto 18 iStockphoto/Dirk Baltrusch 19 iStockphoto/Steve Geer 19 iStockphoto/Angel Herrero de Frutos 28 iStockphoto/Phil Augustavo 32 iStockphoto/Amanda Langford 34 iStockphoto/Rey Rojo 35 iStockphoto/Skip ODonnell 35 iStockphoto/MayumiTerao 37 iStockphoto 39 Topham Picturepoint/PNUE/Le Van Khoa 41 iStockphoto 44 Topham Picturepoint/PNUE/Peter Garside 47 iStockphoto 48 iStockphoto/Dean Turner 48 iStockphoto/Keiichi Hiki 52 iStockphoto/Daniel Defabio 53 iStockphoto/Eric Foltz 66 iStockphoto/Carmen Martínez Banús 68 iStockphoto/Rob Broek

LISTE DES RÉVISEURS

Eric R. Anderson, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe, City of Knowledge – Clayton, Panama
Mario Boccucci, UNEP-DEPI, Nairobi, Kenya
Emil Cherrington, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe, City of Knowledge – Clayton, Panama
Adrián Alfredo Fernández Bremauntz, Instituto Nacional de Ecología, Mexico D.F., Mexique
Peter Gilruth, UNEP-DEWA, Nairobi, Kenya
Bernal Herrera, The Nature Conservancy, San José, Costa Rica
Hans Joosten, Université de Greifswald, Allemagne
Thomas Lovejoy, The H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment, Washington, D.C., États-Unis d'Amérique
Christian Nellemann, UNEP/GRID-Arendal, Norvège
Nick Nuttall, UNEP, Nairobi, Kenya
Dennis Ojima, The H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment, Washington, D.C., États-Unis d'Amérique
Faizal Parish, Global Environment Centre, Petaling Jaya, Selangor DE, Malaisie
Emilio Sempris, Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe, City of Knowledge – Clayton, Panama
Gemma Shepherd, UNEP-DEWA, Nairobi, Kenya
Patrick Smith, Agence pour le développement international (USAID), Washington, D.C., États-Unis d'Amérique
Diana H. Wall, Colorado State University, Fort Collins, États-Unis d'Amérique

LISTE DES COLLABORATEURS

Simon Blyth, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Alison Campbell, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Valerie Kapos, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Jan Kappen, UNEP-DTIE, Nairobi, Kenya
Igor Lysenko, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Monika MacDevette, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Janet Macharia, Bureau du Directeur exécutif du PNUE, Nairobi, Kenya
Lera Miles, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Christian Nellemann, UNEP/GRID-Arendal, Norvège
Corinna Ravilious, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Jorn Scharlemann, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Mohamed Sessay, UNEP-DGEF, Nairobi, Kenya
Lucilla Spini, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Kristian Teleki, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Stephen Twomlow, UNEP-DGEF, Nairobi, Kenya
Terri Young, UNEP-WCMC, Cambridge, Royaume-Uni
Mike Robbins, Overseas Development Group, University d'East Anglia, Norwich, Royaume-Uni

RÉFÉRENCES

- Achard, F., Eva, H. D., Mayaux, P., Stibig, H. J., & Belward, A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB2008.
- Amundson, R. (2001). The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29, 535-562.
- Angelsen, A. (Ed.) (2008). Moving ahead with REDD: Issues, options and implications. CIFOR: Bogor, Indonesia.
- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Erwin, T., Killeen, T., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Lloyd, J., Monteagudo, A., Neill, D., Patiño, S., Pitman, N., Silva, J. N. M., & Vásquez Martínez, R. (2004). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10, 545-562.
- Baldocchi, D. (2008). TURNER REVIEW No. 15. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany* 56, 1-26.
- Balmford, A., Green, R. E., & Scharlemann, J. P. W. (2005). Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. *Global Change Biology* 11, 1594-1605.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.) (2008). Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat: Geneva, Switzerland.
- Benndorf, R., Federici, S., Forner, C., Pena, N., Rametsteiner, E., Sanz, M. J., & Somogyi, Z. (2007). Including land use, land-use change, and forestry in future climate change, agreements: thinking outside the box. *Environmental Science and Policy* 10, 283-294.
- Blakers, M. (2008). Biocarbon, biodiversity and climate change. A REDD Plus scheme for Australia. Green Institute: Hobart, Australia.
- Bond-Lamberty, B., Peckham, S. D., Ahl, D. E., & Gower, S. T. (2007). Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance. *Nature* 450, 89-93.
- Bouillon, S., Borges, A. V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N. C., Kristensen, E., Lee, S. Y., Marchand, C., Middelburg, J. J., Rivera-Monroy, V. H., Smith III, T. J., & Twilley, R. R. (2008). Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles* 22, GB2013.
- Brown, D., Seymour, F., & Peskett, L. (2008). How do we achieve REDD co-benefits and avoid doing harm? In: Moving Ahead with REDD: Issues, Options and Implications. (A. Angelsen, Ed.) CIFOR: Bogor, Indonesia. pp. 107-118.
- Bunker, D. E., DeClerck, F., Bradford, J. C., Colwell, R. K., Perfecto, I., Phillips, O. L., Sankaran, M., & Naeem, S. (2005). Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science* 310, 1029-1031.
- Cagampan, J. P. & Waddington, J. M. (2008). Net ecosystem CO₂ exchange of a cutover peatland rehabilitated with a transplanted acrotelm. *Ecoscience* 15, 258-267.
- Campbell, A., Miles, L., Lysenko, I., Hughes, A., & Gibbs, H. (2008). Carbon storage in protected areas: technical report. UNEP World Conservation Monitoring Centre: Cambridge, UK.
- Canadell, J. G. & Raupach, M. R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320, 1456-1457.
- Canadell, J. G., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., Conway, T. J., Gillett, N. P., Houghton, R. A., & Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 18866-18870.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center (2009). Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA. URL: <http://cdiac.ornl.gov/>. Accessed 03/2009.
- CCBA (2008). Climate, Community & Biodiversity Project Design Standards Second Edition. The Climate, Community and Biodiversity Alliance (CCBA): Arlington, USA.
- Cermeno, P., Dutkiewicz, S., Harris, R. P., Follows, M., Schofield, O., & Falkowski, P. G. (2009). The role of nutricline depth in regulating the ocean carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 20344-20349.
- Chave, J., Olivier, J., Bongers, F., Chatelet, P., Forget, P. M., van der Meer, P., Norden, N., Riera, B., & Charles-Dominique, P. (2008). Above-ground biomass and productivity in a rain forest of eastern South America. *Journal of Tropical Ecology* 24, 355-366.
- Chicago Climate Exchange (2008). Soil Carbon Management Offsets. URL: http://www.chicagoclimatex.com/docs/offsets/CCX_Soil_Carbon_Offsets.pdf. Accessed 02.04.2009.
- Chmura, G. C., Anisfeld, S. C., Cahoon, D. R., & Lynch, J. C. (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17, 1111.
- Chopra, K., Leemans, R., Kumar, P., & Simons, H. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Policy responses, Volume 3. Findings of the Responses Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press: Washington, Covelo, London.
- Coad, L., Campbell, A., Miles, L., & Humphries, K. (2008). The Costs and Benefits of Forest Protected Areas for Local Livelihoods: a review of the current literature. UNEP World Conservation Monitoring Centre: Cambridge, UK.
- Commissao Pastoral da Terra (2008). Online database. URL: <http://www.cptnac.com.br/>. Accessed: 03.2009.
- Cowie, A. L., Kirschbaum, M. U. F., & Ward, M. (2007). Options for including all lands in a future greenhouse gas accounting framework. *Environmental Science & Policy* 10, 306-321.

- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., & Totterdell, I. J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184-187.
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, Victor, Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., & Young-Molling, C. (2001). Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* 7, 375-371.
- Davidson, E. A. & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173.
- De Deyn, G. B., Cornelissen, J. H. C., & Bardgett, R. D. (2008). Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters* 11, 516-531.
- Department of Climate Change (2008). Carbon Pollution Reduction Scheme. Green Paper. Department of Climate Change, Commonwealth of Australia: Canberra, Australia.
- Duarte, C. M. (2002). The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation* 29, 192-206.
- Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences* 2, 1-8.
- Dutschke, M. (2007). CDM forestry and the ultimate objective of the climate convention. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12, 275-302.
- Ebeling, J. & Fehse, J. (2009). Challenges for a business case for high-biodiversity REDD projects and schemes. *Ecoscurities*: Oxford, UK.
- Eliasch, J. (2008). Climate Change: Financing Global Forests. The Eliasch Review. The Stationery Office Limited: UK.
- Fan, J., Zhong, H., Harris, W., Yu, G., Wang, S., Hu, Z., & Yue, Y. (2008). Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climatic Change* 86, 375-396.
- FAO (2001). FAO Statistical Database (FAOSTAT). URL: <http://faostat.fao.org/>. Accessed 03/2009.
- FAO (2004). Reduced impact logging in tropical forests. Forest Harvesting and Engineering Working Paper No.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO: Rome, Italy.
- FAO (2006). Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO: Rome, Italy.
- FAO (2009). Enabling agriculture to contribute to climate-change mitigation. Submission to the UNFCCC by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO: Rome, Italy.
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319, 1235-1238.
- Felzer, B., Reilly, J., Melillo, J., Kicklighter, D., Sarofim, D., Wang, C., Prinn, R., & Zhuang, Q. (2005). Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model. *Climatic Change* 73, 345-373.
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science* 281, 237-240.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science* 309, 570-574.
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, Victor, Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.-G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A. J., Yoshikawa, C., & Zeng, N. (2006). Climate-Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. *Journal of Climate* 19, 3337-3353.
- Fung, I. Y., Doney, S. C., Lindsay, K., & John, J. (2005). Evolution of carbon sinks in a changing climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 11201-11206.
- Garcia-Barrios, L. (2003). Plant-plant interactions in tropical agriculture. In: *Tropical Agroecosystems*. (J. H. Vandermeer, Ed.) CRC Press: Boca Raton, Florida, USA. pp. 11-58.
- Geist, H. J. & Lambin, E. F. (2001). What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence. *LUCC International Project Office*: Louvain-la-Neuve, Belgium.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R. K. & Reisinger, A. (publié sous la direction de-)]. GIEC, Genève, Suisse.
- Goodale, C. L., Apps, M. L., Birdsey, R. A., Field, C. B., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jenkins, J. C., Kohlmaier, G. H., Kurz, W., Liu, S., Nabuurs, G., Nilson, S., & Shvidenko, A. Z. (2002). Forest carbon sinks in the Northern hemisphere. *Ecological Applications* 12, 891-899.
- Grace, J. (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 92, 189-202.
- Grace, J., San José, J., Meir, P., Miranda, H. S., & Montes, R. A. (2006). Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *Journal of Biogeography* 33, 387-400.
- Green, R. E., Cornell, S. J., Scharlemann, J. P. W., & Balmford, A. (2005). Farming and the fate of wild nature. *Science* 307, 550-555.

- Gruber, N., Friedlingstein, P., Field, C. B., Valentini, R., Heimann, M., Richey, J. E., Romero Lankao, P., Schulze, E. D., & Chen, C. T. A. (2004). The Vulnerability of the Carbon Cycle in the 21st Century: An Assessment of Carbon-Climate-Human Interactions. In: Global Carbon Cycle, Integrating Human, Climate, and the Natural World. (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.) Island Press: Washington, D.C. pp. 45-76.
- Guinotte, J. M. & Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134, 320-342.
- Gullison, R. E., Frumhoff, P. C., Canadell, J. G., Field, C. B., Nepstad, D. C., Hayhoe, K., Avissar, R., Curran, L. M., Friedlingstein, P., Jones, C. D., & Nobre, C. (2007). Tropical forests and climate policy. *Science* 316, 985-986.
- Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., & Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454, 96-99.
- Heath, J., Ayres, E., Possell, M., Bardgett, R. D., Black, H. I. J., Grant, H., Ineson, P., & Kerstiens, G. (2005). Rising Atmospheric CO₂ Reduces Sequestration of Root-Derived Soil Carbon. *Science* 309, 1711-1713.
- Henschel, C., Ward, M., Rueterm S., Ashton, R., Bird, N., Frieden, D., Lehtonen, A., Schlamadinger, B., Silvius, M., Tuerk, A., & Zanchi, G. (2008). Options for improving the treatment of LULUCF in a Copenhagen agreement: forest and wetland degradation, factoring out harvested wood products, and approaches for fuller accounting. Working papers, August 18, 2008. Climate Strategies: Cambridge, UK.
- Hohne, N., Wartmann, S., Herold, A., & Freibauer, A. (2007). The rules for land use, land use change and forestry under the Kyoto Protocol-lessons learned for the future climate negotiations. *Environmental Science and Policy* 10, 353-369.
- Hooijer, A., Silvius, M., Wosten, H., & Page, S. (2006). Peat - CO₂: Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia. A technical report. Wetlands International: Wageningen, Netherlands.
- Houghton, R. A. (2005a). Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology* 11, 945-958.
- Houghton, R. A. (2005b). Tropical Deforestation as a source of greenhouse gas emissions. In: Tropical Deforestation and Climate Change. (P. Moutinho & S. Schwartzman, Eds.) Amazon Institute for Environmental Research: Pará, Brazil. pp. 13-21.
- Houghton, R. A. (2007). Balancing the carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35, 313-347.
- Huesemann, M. H. (2008). Ocean fertilization and other climate change mitigation strategies: An overview. *Marine Ecology Progress Series* 364, 243-250.
- Huntingford, C., Fisher, R. A., Mercado, L., Booth, B. B. B., Sitch, S., Harris, P. P., Cox, P. M., Jones, C. D., Betts, R. A., Malhi, Y., Harris, G. R., Collins, M., & Moorcroft, P. (2008). Towards quantifying uncertainty in predictions of Amazon 'dieback'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 1857-1864.
- Hutyra, L. R., Munger, J. W., Nobre, C. A., Saleska, S. R., Vieira, S. A., & Wofsky, S. C. (2005). Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia. *Geophysical Research Letters* 32, L24712.
- IBGE (2008). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Online database. URL: <http://www.ibge.gov.br/english/>. Accessed 03.2008.
- IGBP-DIS (2000). Global Soil Data Products CD-ROM. Global Soil Data Task, International Geosphere-Biosphere Programme, Data and Information System, Potsdam, Germany. Sourced from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA. URL: <http://www.daac.ornl.gov>.
- Iglesias-Rodriguez, M. D., Halloran, P. R., Rickaby, R. E. M., Hall, I. R., Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, J. R., Green, D. R. H., Tyrrell, T., Gibbs, S. J., Von Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, E. V., & Boessenkool, K. P. (2008). Phytoplankton calcification in a high-CO₂ world. *Science* 320, 336-340.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, & C.A. Johnson, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, & L.A. Meyer, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- IPCC (2007a). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, & L.A. Meyer, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- IPCC (2007b). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.) IPCC: Geneva, Switzerland.
- IPCC (2007c). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA.

- Jackson, R. B., Jobbagy, E. G., Avissar, R., Roy, S. B., Barrett, D. J., Cook, C. W., Farley, K. A., le Maire, D. C., McCarl, B. A., & Murray, B. C. (2005). Trading water for carbon with biological sequestration. *Science* 310, 1944-1947.
- Jaenicke, J., Rieley, J. O., Mott, C., Kimman, P., & Siebert, F. (2008). Determination of the amount of carbon stored in Indonesian peatlands. *Geoderma* 147, 151-158.
- Jandl, R., Vesterdal, L., Olsson, M., Bens, O., Badeck, F., & Rock, J. (2007). Carbon sequestration and forest management. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2, No17.
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Ciais, P., Smith, P., Nabuurs, G., Folberth, G., Schlamadinger, B., Hutjes, R. W. A., Ceulemans, R., Schulze, E. D., Valentini, R., & Dolman, A. J. (2003). Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* 300, 1538-1542.
- Johansson, T., Malmer, N., Crill, Patrick M., Friborg, T., Akerman, J. H., Mastepanov, M., & Christensen, T. R. (2006). Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing. *Global Change Biology* 12, 2352-2369.
- Joos, F., Prentice, I. C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G.-K., Gerber, S., & Hasselmann, K. (2001). Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Emission Scenarios. *Global Biogeochemical Cycles* 15, 891-907.
- Kirby, K. R. & Potvin, C. (2007). Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management* 246, 208-221.
- Kirby, A. (2008). Kick the Habit: A UN Guide to Climate Neutrality. United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya.
- Lal, R. (1995) Tillage systems in the tropics: Management options and sustainability implications. *FAO Soils Bulletin* 71. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO: Rome, Italy.
- Lal, R. (2004a). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal, R. (2004b). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1-22.
- Lal, R. (2007). Soil Science and the Carbon Civilization. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1425-1437.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 815-830.
- Le Quéré, C., Rodenbeck, C., Buitenhuis, E. T., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N., Gillett, N., & Heimann, M. (2008). Response to comments on "Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink due to Recent Climate Change". *Science* 319, 570c.
- Le Quéré, C., Rodenbeck, C., Buitenhuis, E. T., Conway, T. J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Metzl, N., Gillett, N., & Heimann, M. (2007). Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change. *Science* 1136188.
- Lee, K., Choi, S.-D., Park, G. H., Wanninkhof, R., Peng, T.-H., Key, R. M., Sabine, C. L., Feely, R. A., Bullister, J. L., Millero, F. J., & Kozyr, A. (2003). An updated anthropogenic CO₂ inventory in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 17, 27-1-27-17.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, 403-427.
- Lenton, T. M., Williamson, M. S., Edwards, N. R., Marsh, R., Price, A. R., Ridgwell, A. J., Shepherd, J. G., Cox, S. J., & The GENIE team (2006). Millennial timescale carbon cycle and climate change in an efficient Earth system model. *Climate Dynamics* 26, 687-711.
- Lewis, S. L., Lopez-Gonzalez, G., Sonké, B., Affum-Baffoe, K., Baker, T. R., Ojo, L. O., Phillips, O. L., Reitsma, J. M., White, L., Comiskey, J. A., Marie-Noel, D., Ewango, C. E. N., Feldpausch, T. R., Hamilton, A. C., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, J. C., Makana, J. R., Malhi, Y., Mbago, F. M., Ndangalasi, H. J., Peacock, J., Peh, K. S. H., Sheil, D., Sunderland, T., Swaine, M. D., Taplin, J., Taylor, D., Thomas, S. C., Votere, R., & Woll, H. (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* 457, 1003-1006.
- Lu, F., Wang, X., Ouyang, Z., Duan, X., Zheng, H., & Miao, H. (2008). Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology* 15, 281-305.
- Luyssaert, S., Inglis, I., Jung, M., Richardson, A. D., Reichsteins, M., Papale, D., Piao, S. L., Schulzes, E. D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beers, C., Bernhoffer, C., Black, K. G., Bonal, D., Bonnefond, J. M., Chambers, J., Ciais, P., Cook, B., Davis, K. J., Dolman, A. J., Gielen, B., Goulden, M., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., Grunwald, T., Guidolotti, G., Hanson, P. J., Harding, R., Hollinger, D. Y., Hutya, L. R., Kolar, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B. E., Le Maire, G., Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Migliavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Nikinmaa, E., Ollinger, S. V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M. J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, M. L., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., & Janssens, I. A. (2007). CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13, 2509-2537.
- Luyssaert, S. E., Schulze, D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.
- Mack, M. C., Schuur, E. A. G., Bret-Harte, M. S., Shaver, G. R., & Chapin III, F. S. (2004). Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature* 431, 440-443.

- Malhi, Y., Baldocchi, D. D., & Jarvis, P. G. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22, 715-740.
- Malhi, Y. & Grace, J. (2000). Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution* 15, 332-337.
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T. R., Wright, J., Phillips, O. L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T. J., Laurance, S. G., Laurance, W. F., Lewis, S. L., Monteagudo, A., Neill, D. A., Vargas, P. N., Pitman, N. C. A., Quesada, C. A., Salomao, R., Silva, J. N. M., Lezama, A. T., Terborgh, J., Martinez, R. V., & Vinceti, B. (2006). The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12, 1107-1138.
- Miles, L. & Kapos, V. (2008). Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and forest degradation: Global land-use implications. *Science* 320, 1454-1455.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press: Washington, D.C., USA.
- Mock, G. (2000). Domesticating the World: Conversion of Natural Ecosystems. World Resources 2000-2001. EarthTrends 2001. World Resources Institute. URL: http://earthtrends.wri.org/pdf_library/feature/bio_fea_convert.pdf. Accessed 28.4.2009.
- Montagnini, F. & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: and underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281-295.
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 10-23.
- Neely, C. & Bunning, S. (2008). Review of Evidence on Dryland Pastoral Systems and Climate Change: Implications and opportunities for mitigation and adaptation. FAO – NRL Working Paper. FAO: Rome.
- Nellemann, C., Hain, S., & Alder, J. E. (2008). In Dead Water - Merging of climate change with pollution, over-harvest and infestation in the world's fishing grounds. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal: Norway.
- Nepstad, D. C., Stickler, C. M., Soares-Filho, B., & Merry, F. (2008). Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 1737-1746.
- Nepstad, D. C., Tohver, I. M., Ray, David, Moutinho, P., & Cardinot, G. (2007). Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology* 88, 2259-2269.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P. & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: a new map of life on Earth. *Bioscience* 51, 933-938.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, Ernst, Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G.-K., Rodgers, K. B., Sabine, C. L., Sarmiento, J. L., Schlitzer, R., Slater, R. D., Totterdell, I. J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y., & Yool, A. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681-686.
- Parasai, R. (2006). Chitwan, Nepal: Will Poor People and Women Benefit Too? In: Community Forest Management as a Carbon Mitigation Option. (D. Murdiyarso & M. Skutsch, Eds.) CIFOR: Bogor, Indonesia. pp. 35-42.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., & Stringer, L., (Eds.) (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre and Wetlands International: Kuala Lumpur, Malaysia, and Wageningen, Netherlands.
- Peskett, L., Huberman, D., Bowen-Jones, E., Edwards, G., & Brown, J. (2008). Making REDD work for the poor. Prepared on behalf of the Poverty Environment Partnership (PEP).
- Phillips, O. L., Lewis, S. L., Baker, T. R., Chao, K. J., & Higuchi, N. (2008). The changing Amazon forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 1819-1827.
- Phillips, O. L., Aragao, L. E. O. C., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C. A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T. R., Banki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., Alves de Oliveira, A. C., Cardozo, N. D., Czimczik, C. I., Feldpausch, T. R., Freitas, M. A., Gloor, E., Higuchi, N., Jimenez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D. A., Nepstad, D., Patino, S., Penuela, M. C., Prieto, A., Ramirez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Thomas, A. S., ter Steege, H., Stropp, J., Vasquez, R., Zelazowski, P., Davila, E. A., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K. J., Erwin, T., Di Fiore, A., Eurdice, H., Keeling, H., Killeen, T. J., Laurance, W. F., Cruz, A. P., Pitman, N. C. A., Vargas, P. N., Ramirez-Angulo, H., Rudas, A., Salomao, R., Silva, N., Terborgh, J., & Torres-Lezama, A. (2009). Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science* 323, 1344-1347.
- Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luysaert, S., Margolis, H., Fang, J., Barr, A., Chen, A., Grelle, A., Hollinger, D. Y., Laurila, T., Lindroth, A., Richardson, A. D., & Vesala, T. (2008). Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* 451, 41-53.
- Pinard, M. A. & Cropper, W. P. (2000). Simulated effects of logging on carbon storage in dipterocarp forest. *Journal of Applied Ecology* 37, 267-283.
- Pinard, M. A. & Putz, F. E. (1997). Monitoring carbon sequestration benefits associated with a reduced-impact logging project in

- Malaysia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2, 203-215.
- Raupach, M. R., Marland, G., Ciais, P., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Klepper, G., & Field, C. B. (2007). Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 10288-10293.
- Raven, J. A. & Falkowski, P. G. (1999). Oceanic sinks for atmospheric CO₂. *Plant, Cell and Environment* 22, 741-755.
- Reid, H. & Huq, S. (2005). Climate change - biodiversity and livelihood impacts. In: Tropical forests and adaptation to climate change. In search of synergies. (C. Robledo, M. Kanninen, & L. Pedroni, Eds.) CIFOR: Bogor, Indonesia. pp. 57-70.
- Reid, H. & Swiderska, K. (2008). Biodiversity, climate change and poverty: exploring the links. International Institute for Environment and Development: London, UK.
- Ridgwell, A. J., Maslin, M., & Watson, A. J. (2002). Reduced effectiveness of terrestrial carbon sequestration due to an antagonistic response of ocean productivity. *Geophysical Research Letters* 29, 1095.
- Rights and Resources Initiative (2008). Seeing people through the trees: scaling up efforts to advance rights and address poverty, conflict and climate change. Rights and Resources Initiative, RRI: Washington, D.C., USA.
- Robertson, M., Carberry, P., & Brennan, L. (2007). The economic benefits of precision agriculture: case studies from Australian grain farms. CSIRO: Melbourne, Australia.
- Robledo, C. & Blaser, J. (2008). Key issues on land use, land use change and forestry (LULUCF) with an emphasis on developing country perspectives. UNDP: An Environment & Energy Group Publication.
- Ruesch, A. S. & Gibbs, H. (2008). New Global Biomass Carbon Map for the Year 2000 Based on IPCC Tier-1 Methodology. Oak Ridge National Laboratory's Carbon Dioxide Information Analysis Center: Oak Ridge, USA. Available online from the Carbon Dioxide Information Analysis Center, URL: <http://cdiac.ornl.gov>.
- Running, S. W. (2008). Climate change - Ecosystem disturbance, carbon, and climate. *Science* 321, 652-653.
- Sabine, C. L., Heimann, M., Artaxo, P., Bakker, D. C. E., Chen, C. T. A., Field, C. B., Gruber, N., Le Quéré, C., Prinn, R. G., Richey, J. E., Romero Lankao, P., Sathaye, J. A., & Valentini, R. (2004). Current Status and Past Trends of the Global Carbon Cycle. In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*. (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.) Island Press: Washington, D.C., USA, pp. 17-44.
- Schaphoff, S., Lucht, W., Gerten, D., Sitch, S., Cramer, W., & Prentice, I. C. (2006). Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Climatic Change* 74, 97-122.
- Schlamadinger, B., Bird, N., Johns, T., Brown, S., Canadell, J., Ciccarese, L., Dutschke, M., Fiedler, J., Fischlin, A., Fearnside, P., Forner, C., Freibauer, A., Frumhoff, P., Hoehne, N., Kirschbaum, M. U. F., Labat, A., Marland, G., Michaelowa, A., Montanarella, L., Moutinho, P., Murdiyarso, D., Pena, N., Pingoud, K., Rakonczay, Z., Rametsteiner, E., Rock, J., Sanz, M. J., Schneider, U. A., Shvidenko, A., Skutsch, M., Smith, P., Somogyi, Z., Trines, E., Ward, M., & Yamagata, Y. (2007). A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. *Environmental Science & Policy* 10, 271-282.
- Schlesinger, W. H., Belnap, J., & Marion, G. (2009). On carbon sequestration in desert ecosystems. *Global Change Biology* 15: online.
- Schuur, E. A. G., Bockheim, J., Canadell, J. G., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Laflour, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G., & Zimov, S. A. (2008). Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *Bioscience* 58, 701-714.
- Scurlock, J. M. O. & Hall, D. O. (1998). The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology* 4, 229-233.
- Shaver, G. R., Billings, W. D., Chapin, F. S., Gilbin, A. E., Nadelhoffer, K. J., Oechel, W. C., & Rastetter, E. B. (1992). Global change and the carbon balance of arctic ecosystems. *Bioscience* 42, 433-441.
- Smith, P. (2004). Engineered biological carbon sinks on land. In: SCOPE 62: The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world. (C. B. Field & M. R. Raupach, Eds.) Island Press: Washington, D.C., USA. pp. 479-492.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., & Sirotenko, O. (2007a). Agriculture. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, & L. A. Meyer, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA. pp. 497-540.

- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., & Towprayoon, S. (2007b). Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 6-28.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 789-813.
- Spracklen, D., Yaron, G., Singh, T., Righelato, R., & Sweetman, T. (2008). The root of the matter. Carbon sequestration in forests and peatlands. Caldecott, B. Policy Exchange: London, UK.
- Strassburg, B. (2007). Reducing Emissions from Deforestation: the 'Expected Emissions' approach" (CSERGE Working Paper, January 2007); paper presented at the 26th Meeting of the Subsidiary Board for Scientific and Technological Advice (SBSTA) of the UNFCCC, Bonn, Germany, 8 May.
- Strassburg, B., Turner, K., Fisher, B., Schaeffer, R., & Lovett, A. (2008). An Empirically-Derived Mechanism of Combined Incentives to Reduce Emissions from Deforestation. *Global Environmental Change*: in press.
- Sumberg, J. & Okali, C. (1997). Farmers' experiments: Creating local knowledge. Lynne Reiner Publishers, Inc.: Boulder, USA.
- Suratman, M. N. (2008). Carbon Sequestration Potential of Mangroves in South East Asia. In: *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*. (F. Bravo, V. LeMay, R. Jandl, & K. Gadow, Eds.) Springer: Netherlands. pp. 297-315.
- Taiyab, N. (2006). Exploring the market for voluntary carbon offsets. IIED: London, UK.
- TCG (2008). How to Include Terrestrial Carbon in Developing Nations in the Overall Climate Change Solution. The Terrestrial Carbon Group, TCG.
- The Royal Society (2005). Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document. 12/05. The Royal Society: London, UK.
- UNDP (1997). Governance for sustainable human development. A UNDP policy document. United Nations Development Programme, UNDP: New York, USA.
- UNEP-WCMC (2008). Carbon and biodiversity: a demonstration atlas. Kapos, V., Ravilious, C., Campbell, A., Dickson, B., Gibbs, H., Hansen, M., Lysenko, I., Miles, L., Price, J., Scharlemann, J. P. W., & Trumper, K. UNEP-WCMC: Cambridge, UK.
- UNFCCC (2009). Glossary of climate change acronyms. URL: http://unfccc.int/essential_background/glossary/items/3666.php. Accessed 02.04.2009.
- Uryu, Y., Mott, C., Foead, N., Yulianto, K., Budiman, A., Setiabudi, Takakai, F., Sunarto, Purastuti, E., Fadhi, N., Hutajulu, C. M. B., Jaenicke, J., Hatano, R., Siegert, F., & Stuwe, M. (2008). Deforestation, Forest Degradation, Biodiversity Loss and CO₂ Emissions in Riau, Sumatra, Indonesia. WWF Indonesia Technical Report. Jakarta, Indonesia. 74 pp.
- Verchot, L. V., Mackensen, J., Kandji, S., Noordwijk, M., Tomich, T., Ong, Chin, Albrecht, A., Bantilan, C., Anupama, K., V, & Palm, C. (2005). Opportunities for linking adaptation and mitigation in agroforestry systems. Tropical forests and adaptation to climate change: in search of synergies. Adaptation to climate change, sustainable livelihoods and biological diversity, Turrialba, Costa Rica, March 2004. 103-121.
- Verwer, C., van der Meer, P., & Nabuurs, G.-J. (2008). Review of carbon flux estimates and other greenhouse gas emissions from oil palm cultivation on tropical peatlands - identifying gaps in knowledge. Alterra report 1741. Alterra: Wageningen, Netherlands.
- Vuichard, N., Ciais, P., Belletti, L., Smith, P., & Valentini, R. (2009). Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990. *Global Biogeochemical Cycles* 22, GB4018.
- White, A., Cannell, M. G. R., & Friend, A. D. (2000). CO₂ stabilization, climate change and the terrestrial carbon sink. *Global Change Biology* 6, 817-833.
- Wohlfahrt, G., Fenstermaker, L. F., & Arnone, J. A. (2008). Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave Desert ecosystem. *Global Change Biology* 14, 1475-1487.
- Woodward, F. I., Lomas, M. R., & Kelly, C. K. (2004). Global climate and the distribution of plant biomes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 359, 1465-1476.
- Yin, J. P., Wang, Y. S., Xu, J. R., & Sun, S. (2006). Advances of studies on marine carbon cycle. *Acta Ecologica Sinica* 26, 566-575.





www.unep.org

Programme des Nations Unies
pour l'environnement (PNUE)
P.O. Box 30552 - 00100 Nairobi, Kenya
Tel. : +254 20 762 1234
Fax : +254 20 762 3927
e-mail : unepub@unep.org
www.unep.org



ISBN 978-92-807-3050-0
DEW/1210/CA

UNEP/GRID-Arendal
Teaterplassen 1
N-4836 Arendal
Norvège

Tél : +47 4764 4555
Fax : +47 3703 5050
grid@grida.no
www.grida.no

UNEP-WCMC
219 Huntingdon Road
Cambridge CB3 0DL
Royaume-Uni

Tél : +44 (0) 1223 277314
Fax : +44 (0) 1223 277136
info@unep-wcmc.org
www.unep-wcmc.org