

GUILLAUME LESCUYER
CIRAD-Tera

BRUNO LOCATELLI
CIRAD-Tera

RÔLE ET VALEUR DES FORÊTS TROPICALES DANS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE



Des quantités importantes de carbone sont stockées dans les forêts tropicales. Après un brûlis, le stock de carbone est faible mais augmentera régulièrement pendant la repousse de la forêt (ici, un champ de la côte est de Madagascar).

Large amounts of carbon are stored in tropical forests. After fires, carbon stocks are low, but they increase regularly as the forest grows back (here, a field on the east coast of Madagascar).

Si les forêts peuvent réduire la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère, quel prix peut-on donner à cette fonction ?

La prise de conscience publique du problème causé par le changement climatique global a eu lieu au Sommet de la Terre en juin 1992. A cette occasion, plus de cent cinquante gouvernements ont signé la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (C.C.N.U.C.C.), qui est entrée en vigueur le 21 mars 1994. Elle est actuellement ratifiée par environ cent soixante pays. L'objectif de cette convention, tel que fixé dans son article 2, est de « stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Plusieurs Conférences des Parties ont été tenues depuis pour organiser les efforts de la communauté internationale à lutter contre la dégradation de l'environnement global. Le résultat majeur de la troisième Conférence des Parties, tenue à Kyoto en décembre 1997, a été la signature d'un protocole contraignant, par lequel trente-huit pays industrialisés s'engagent à réduire globalement leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % entre 2008 et 2012 par rapport à l'année de référence 1990*. La solution retenue pour atteindre ces objectifs est d'instaurer un marché de permis d'émission négociables, dont les modalités d'application ont été discutées en novembre dernier à Buenos Aires. Il est également envisagé d'étendre à plus ou moins long terme ce marché aux pays du Sud. Les prochaines négociations internationales sur le changement climatique constituent donc un enjeu important pour ces nations, notamment en matière de gestion des forêts tropicales qui jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone.

Dans cette perspective, l'objet de cet article est double : il est, d'une

part, de présenter les principales connaissances existant sur les liens entre forêts tropicales et effet de serre ; d'autre part, il s'agit de rappeler que les discussions internationales ayant trait au rôle des forêts dans le réchauffement climatique reposent sur de nombreuses incertitudes tant au niveau physique qu'économique.

LES PROCESSUS PHYSIQUES

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les mesures de la température terrestre, disponibles depuis plus d'un siècle, montrent une augmentation récente de la température moyenne du globe, qui a augmenté d'environ 0,8 °C en cent ans (cf. fig. 1).

Si cette observation confirme l'existence de changement dans le climat terrestre, les raisons sont moins évidentes. En effet, le climat de la terre subit des variations naturelles à différentes échelles de temps (de l'année au siècle ou aux milliers de siècles). On peut citer comme exemple l'époque du Moyen Age appelée Optimum Médiéval (de 900 à 1200 après J.-C.) où les températures étaient suffisamment élevées pour permettre la colonisation de certaines zones du nord de l'Europe (CIESLA, 1997).

Parmi les facteurs naturels liés au changement du climat, on trouve les facteurs astronomiques (comme l'activité solaire ou l'inclinaison de la terre), les facteurs géologiques (comme la dérive des continents ou les éruptions volcaniques), les facteurs océaniques (comme la circulation dans les océans), les facteurs relatifs à la surface de la terre (comme la variation d'albédo ou d'évapotranspiration provoquée par une variation de la couverture des sols) et les facteurs atmosphériques (en particulier l'effet de serre).

* L'Union Européenne s'engage globalement à réduire ses émissions de 8 %, les U.S.A. de 7 %, le Canada et le Japon de 6 %. La Russie et l'Ukraine visent la simple stabilisation.

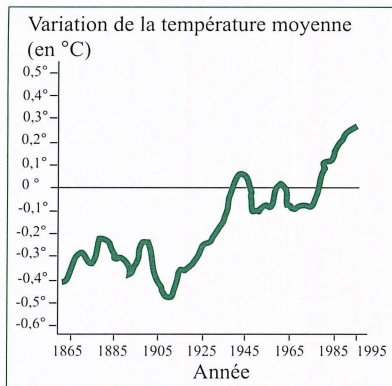


Figure 1. Variation de la température de la terre (d'après SADOURNY, 1992).
Variation of the earth's temperature.

Les activités humaines ne modifient pas directement la température terrestre et, plus généralement, le climat. Par exemple, l'énergie dégagée par les activités humaines représente des quantités infinitésimales par rapport à l'énergie reçue du soleil. La transformation anthropique du climat ne peut être qu'indirecte. Il a été montré (SADOURNY, 1992) que ce sont surtout les facteurs atmosphériques générés par l'homme qui influencent le climat, plus exactement par l'émission de gaz à effet de serre.

Cependant, au vu des nombreux facteurs climatiques encore mal connus, le lien entre changement climatique et émission des gaz à effet de serre n'est pas simple. L'augmentation de température constatée est-elle due uniquement à l'effet de serre ? Comment le système atmosphère-océans-glaces émergées-biosphère va-t-il réagir à ce changement ? Ce sont quelques-unes des questions pour lesquelles existent des controverses.

L'EFFET DE SERRE

L'effet de serre a été décrit pour la première fois, il y a près d'un siècle, par le Suédois ARRHÉNIUS, qui en a donné la définition scientifique précise, sans la connotation catastro-

phiste actuelle (GRINEVALD, 1992). En effet, l'effet de serre est un phénomène atmosphérique naturel sans lequel la vie sur la terre serait impossible car la température moyenne y serait inférieure de 33 °C à sa valeur actuelle (SADOURNY, 1992).

Le mécanisme simplifié de l'effet de serre est le suivant : une grande partie de l'énergie du rayonnement solaire qui atteint la terre est réémise vers l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge (la terre est un corps chaud et tout corps chaud émet des rayonnements infrarouges). Mais, alors que l'atmosphère est assez largement transparente au rayonnement solaire direct, une partie du rayonnement infrarouge (de plus grande longueur d'onde que le rayonnement direct) est absorbée par certains constituants mineurs de l'atmosphère, qu'on appelle les gaz à effet de serre (GES) et réchauffe la basse atmosphère. L'importance du phénomène est fonction de la concentration des GES ; c'est pourquoi une augmentation de la concentration peut conduire à un réchauffement de la planète.

LES GAZ À EFFET DE SERRE

Les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère sont nombreux : H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 , CO , NO_x , O_3 , CFC en sont les principaux. Nous les présenterons ici en fonction des activités humaines concernées.

La vapeur d'eau (H_2O) est abondante dans l'atmosphère ; néanmoins, sa quantité dépend principalement de variables biophysiques sur lesquelles les hommes n'ont que peu d'emprise. Le monoxyde de carbone (CO) n'est pas à proprement parler un gaz à effet de serre mais les mécanismes chimiques de l'atmosphère le rendent responsable de l'augmentation de la concentration en méthane et en oxyde nitreux. L'ozone (O_3), les oxydes d'azote (NO_x) et les chlorofluorocarbones

(CFC) sont produits par des processus industriels.

Les trois autres gaz sont émis, en particulier, par des activités humaines relatives à l'agriculture et à la forêt. Ainsi, 100 millions de tonnes de méthane (CH_4) sont dégagées par an par la décomposition anaérobie dans les rizières et 80 millions de tonnes par l'élevage des ruminants. Ce sont les deux premières sources anthropiques de méthane. L'oxyde nitreux (N_2O) est produit essentiellement par le brûlis de la biomasse et par l'utilisation d'engrais azotés en agriculture. Le dioxyde de carbone (CO_2) est produit par le brûlis de la biomasse (la forêt en particulier) et par la combustion de carbone fossile (pétrole, gaz, charbon).

Au regard de cette liste de gaz, il paraît intéressant de voir ceux qui ont le plus d'incidence sur l'effet de serre. L'importance d'un gaz (on parle du forçage radiatif de ce gaz) dépend de la capacité intrinsèque d'une de ses molécules à absorber le rayonnement infrarouge, de sa concentration dans l'atmosphère et des mécanismes chimiques dans lesquels il intervient, en particulier les réactions chimiques où il est dégradé (un gaz qui a une durée de vie courte aura moins d'incidence sur l'effet de serre qu'un gaz à longue durée de vie). Les indices disponibles pour chiffrer le forçage radiatif ne rassemblent pas toutes les in-

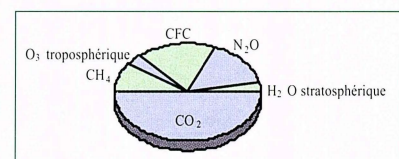


Figure 2. La contribution des principaux gaz à effet de serre au réchauffement de la planète entre 1980 et 1990 (d'après WMO, 1990).

The contribution of the principal greenhouse gases to global warming between 1980 and 1990.

formations sur les gaz à effet de serre et leur potentiel à réchauffer la planète dans la mesure où certains mécanismes chimiques de l'atmosphère sont assez mal connus. Des estimations de la contribution des principaux gaz à effet de serre au réchauffement sont donnés dans la figure 2, p. 7.

LE CARBONE

Le dioxyde de carbone est le gaz qui contribue le plus à l'effet de serre (cf. fig. 2) ; c'est pourquoi, depuis quelques années, les politiques instaurées pour prévenir les changements climatiques se sont principalement portées sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone.

La figure 3 représente l'évolution de la concentration moyenne de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pendant le dernier millénaire. Les données anciennes proviennent d'analyses de carottes de glaces polaires et les plus récentes de mesures directes. On remarque que la concentration était stable avant le début de l'ère industrielle et qu'elle a augmenté de 25 % pour atteindre la valeur actuelle de l'ordre de 350 ppmv (partie par million en volume).

Cette augmentation récente peut s'expliquer par l'existence de deux sources anthropiques de carbone en croissance depuis deux siècles : la

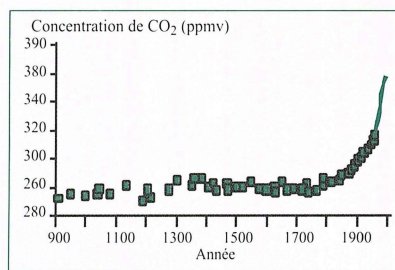


Figure 3. Variation de la concentration de CO_2 au cours du dernier millénaire (d'après WMO, 1990).
Variation in the concentration of CO_2 over the past millennium.

consommation d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et la conversion des terres (surtout la déforestation). Dans les années 1980, les émissions de carbone dues à la consommation d'énergies fossiles s'établissaient à $5,4 \pm 0,5 \text{ Gt.C/an}^*$ tandis que le changement de l'utilisation des sols contribuait à hauteur de $1,6 \pm 1 \text{ Gt.C/an}$ (DIXON *et al.*, 1994).

Les émissions anthropiques de carbone se sont légèrement accrues depuis le début de la décennie et représentent aujourd'hui environ huit milliards de tonne de carbone par an. Ce chiffre est faible dans le cycle global du carbone (cf. fig. 4) mais ces émissions ne sont pas compensées par une captation équivalente de la biosphère et entraînent une tendance à l'accumulation de carbone dans l'atmosphère : un peu moins de la moitié des émissions anthropiques de carbone, soit environ $3,5 \text{ Gt.C/an}$, s'accumule dans l'atmosphère et participe au renforcement de l'effet de serre (WATSON *et al.*, 1996). On ne sait pas vraiment où vont les 2,5 gigatonnes annuelles qui sont dégagées dans l'atmosphère et qui ne s'y accumulent pas (le bilan des flux de la fi-

gure 4 n'est en effet pas équilibré) ; peut-être vont-ils dans l'océan ou dans la biosphère, dont l'absorption serait stimulée par l'accroissement de la concentration en CO_2 atmosphérique.

L'IMPORTANCE DES FORÊTS

□ La séquestration du carbone

Bien que le déséquilibre causé par les émissions anthropiques de carbone soit essentiellement dû à la combustion du carbone fossile et que les changements d'utilisation des sols (la déforestation en particulier) représentent seulement un quart des émissions anthropogènes de carbone, les travaux sur l'effet de serre évoquent souvent le rôle de la forêt.

La forêt et, plus généralement, la biosphère sont en effet primordiales en matière de carbone et d'effet de serre pour la raison suivante : si le flux de carbone induit par la combustion d'énergies fossiles peut être réduit, il ne peut pas être inversé. En revanche, lorsqu'une forêt croît, elle absorbe du

* Les stocks de carbone seront toujours exprimés en Gt (gigatonne ou milliard de tonnes) et les flux en Gt/an.

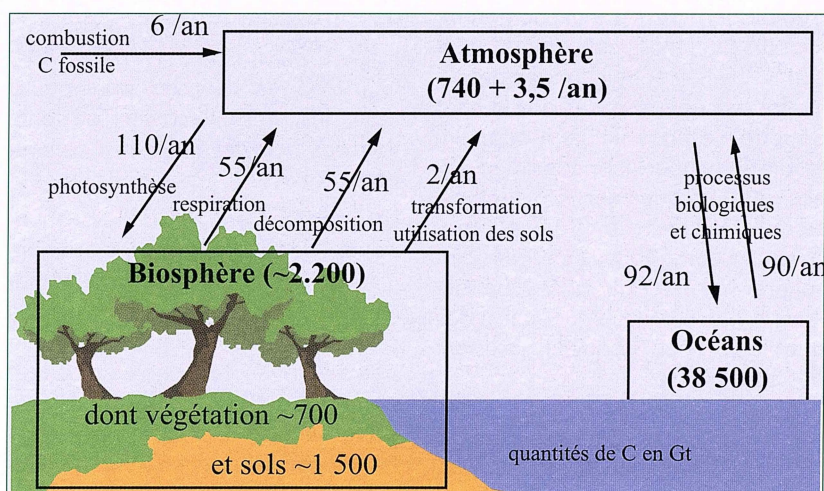


Figure 4. Les grands compartiments et flux du cycle du carbone (d'après DIXON *et al.*, 1991, WATSON *et al.*, 1996).
The major divisions and flows of the carbon cycle.

carbone atmosphérique et le flux net de carbone est dirigé localement de l'atmosphère vers la biosphère. En bref, la combustion du carbone fossile sera toujours une source de carbone, alors que la biosphère peut être soit une source, soit un puits.

Une certaine quantité de carbone stockée dans la biosphère pendant une période donnée, c'est autant de carbone qui ne participera pas à l'effet de serre pendant cette période. On utilise le terme de « séquestration de carbone » pour illustrer l'importance de la rétention du carbone.

Par exemple, les formations végétales des zones tempérées et boréales sont actuellement en croissance et on considère qu'elles absorbent environ 1 Gt de carbone par an (HAMPIKE, 1979), ce qui compense en partie les émissions dues à la transformation des formations végétales tropicales, de l'ordre de 3 Gt par an.

□ La part des forêts

Si la biosphère joue un rôle important dans le cycle du carbone, c'est en grande partie grâce aux forêts. L'ensemble des forêts mondiales représente une grande part du carbone stockée dans la biosphère, environ 80 % du carbone au-dessus du sol et 40 % du carbone souterrain (CIESLA, 1997).

Parmi toutes les forêts, les forêts tropicales sont particulièrement importantes en raison de l'ampleur des transformations anthropiques dont elles sont l'objet et en raison de la quantité de carbone qu'elles contiennent par unité de surface. La figure 5 donne un aperçu des stocks de carbone pour cinq types d'écosystèmes, en tonnes par hectare. Ce ne sont que des ordres de grandeur ; ainsi, pour les forêts tropicales humides, l'ordre de grandeur donné est de 150 t/ha mais les variations sont grandes d'une forêt à l'autre : le stock peut atteindre 500 t/ha dans la végétation de certaines forêts.

D'un point de vue global, les forêts tropicales contiennent 37 % du carbone des forêts mondiales.

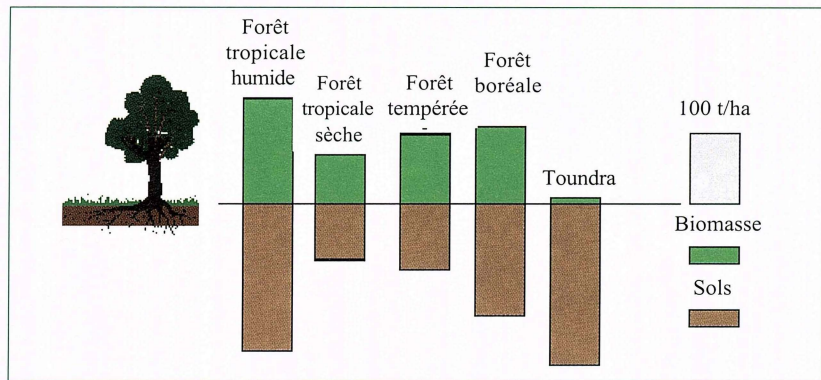


Figure 5. Ordres de grandeurs du stockage de carbone dans la biomasse (aérienne et souterraine) et dans les sols de plusieurs écosystèmes.

Scales of carbon storage in the biomass (above and below ground) and in the soils of several different ecosystems.

□ Pourquoi quantifier les stocks et les flux ?

Si les forêts ont un rôle à jouer dans la séquestration de carbone, il apparaît important de pouvoir calculer les quantités de carbone qu'elles stockent. Dans des projets forestiers orientés « changement climatique » (par exemple, financés par des bailleurs de fonds environnementaux), l'évaluation du projet comprendra une estimation du stock de carbone. De plus, si la tonne de carbone a un prix dans le cadre d'un marché de droits à polluer, la valeur de la forêt relative au changement climatique pourra être calculée à partir de la quantité de carbone qu'elle contient.

Dans le choix des opérations de gestion forestière, un choix pourra être fait sur les techniques qui provoquent le dégagement de CO₂ le plus faible ou l'absorption la plus forte, ce qui nécessite de pouvoir évaluer les flux.

□ Comment estimer des flux ?

Les flux de carbone entre l'atmosphère et un écosystème forestier ne peuvent être mesurés directement. Pour connaître la quantité de carbone absorbée ou émise par une forêt pendant un temps donné (une phase

de croissance ou d'exploitation par exemple), on applique la loi de conservation des éléments : on mesure la quantité de carbone présent dans la biomasse et les sols avant et après la période et on considère que la différence correspond à des échanges avec l'atmosphère. Si la quantité de carbone a augmenté, cette augmentation correspond à une absorption de dioxyde de carbone atmosphérique, et vice versa (cf. fig. 6).

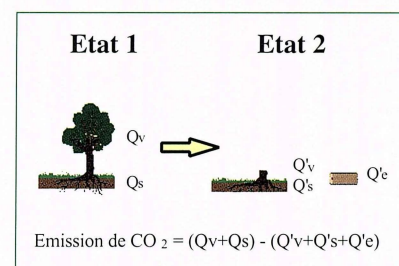
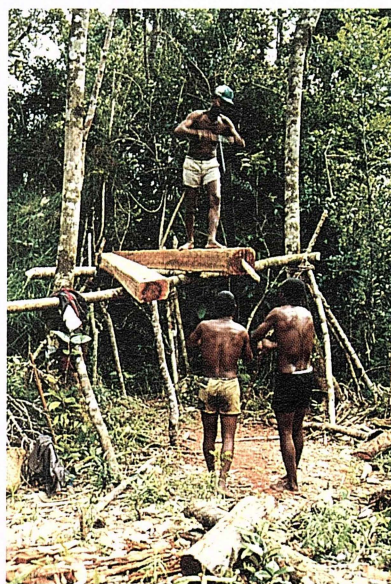


Figure 6. Application de la loi de conservation des éléments pour estimer un flux de carbone entre deux états.

(Q_v et Q_s sont les quantités de carbone stockées dans la végétation et les sols, Q_e est la quantité de carbone stockée dans le bois exporté, l'émission de CO₂ se mesure en tonnes de carbone).

Application of the law of conservation for elements to assess a carbon flow between two states.



Les bilans de carbone doivent tenir compte du devenir des produits tirés de la forêt (ici, des scieurs de long à Madagascar).

Carbon assessments must take the development of products extracted from forests into account (here, pit-sawyers in Madagascar).

Cette méthode sous-entend que le stock de carbone de la forêt n'évolue que par échange avec l'atmosphère. Or, ce n'est pas le cas pour une forêt exploitée où du carbone peut quitter la forêt sous forme de biomasse (les fûts par exemple : Qe sur la figure 6). Le devenir du bois exporté doit être connu : s'il s'agit de bois d'œuvre, une partie du carbone sera séquestrée pendant des années (l'autre partie étant les déchets de scierie par exemple) ; s'il s'agit de bois de feu, le carbone retournera rapidement dans l'atmosphère.

Le flux net de carbone que l'on estime par la méthode décrite ci-dessus est la somme de plusieurs flux qui correspondent, dans le cas d'une forêt perturbée par l'homme, au :

- carbone libéré peu de temps après l'action de l'homme par la biomasse (brûlée ou décomposée) et par les sols,

- carbone libéré plus tard par la décomposition lente des résidus,
- carbone absorbé plus tard par la croissance du recrû,
- carbone libéré hors site (par la biomasse exportée de la forêt) après un temps plus ou moins court (bois de feu) ou long (bois d'œuvre).

Le cas du bois exporté de la forêt met en évidence l'importance de l'échelle de temps et d'espace. Pour l'espace, si on raisonne au-delà du niveau local de la seule forêt, le devenir des produits exportés devra être pris en compte. Si on choisit le long terme, il faut considérer l'avenir des résidus et l'évolution de la biomasse vivante après l'exploitation (la croissance de la forêt par exemple). Sur la figure 7 est représentée l'évolution d'un stock de carbone d'une forêt au cours du temps.



Une grande quantité de carbone est dégagée rapidement dans l'atmosphère au moment du brûlis de la forêt (ici, un champ de la côte est malgache).

A large quantity of carbon is rapidly released into the atmosphere when a forest is burnt (here, a field on the east coast of Madagascar).

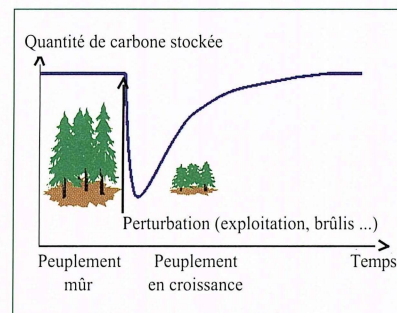


Figure 7. Un exemple de variation de stock de carbone.

An example of carbon storage variation.

Un peuplement mûr est perturbé (par un brûlis ou une exploitation), puis la parcelle est abandonnée.

Dans un premier temps, les flux nets de carbone sont quasiment nuls dans la mesure où le stock de carbone est presque constant (la décomposition des arbres morts est compensée par la croissance de nouveaux arbres). Ensuite, la perturbation entraîne un dégagement net de carbone vers l'atmosphère, puis une absorption lente au cours de la repousse. Suivant l'intervalle de temps que l'on choisira pour l'estimation du flux, le résultat variera fortement. Entre le moment précédant la perturbation et le moment qui vient juste après, le flux net vers l'atmosphère sera très élevé alors qu'il sera faible s'il est estimé avant la perturbation et longtemps après.

La durée nécessaire à la reconstitution du stock de carbone est très variable. Par exemple, à partir d'une étude sur un massif forestier du nord-ouest des U.S.A., HARMON *et al.* (1990) montrent que lors du passage d'une forêt primaire (*old-growth forest*) à une forêt secondaire (*young fast-growing forest*), le stockage de carbone sur le site est considérablement réduit et ne retrouve son niveau initial que deux siècles plus tard.

Dans tous les cas, pour estimer un flux, il faut pouvoir estimer la quantité de carbone stockée dans les trois grands compartiments : la biomasse aérienne (tronc, branches et feuilles des arbres, végétation herbacée et arbustive), la biomasse souterraine (racines, micro- et macro-organismes, etc.) et les sols.

□ La biomasse aérienne

Pour mesurer le carbone présent dans la biomasse aérienne, il n'est pas possible de procéder à la mesure destructive de tous les arbres d'une parcelle. Il s'agit donc de commencer par un échantillonnage de tous les arbres sur la parcelle choisie et d'effectuer des mesures complètes sur quelques arbres, appartenant à chacune des espèces et à chacune des classes de taille.

Cette mesure se fait en abattant l'arbre et en notant le poids de matière fraîche des troncs, des branches et des feuilles. Le pesage d'un tronc n'étant pas toujours facile, il peut être remplacé par le calcul de son volume en mesurant ses dimensions. Il en est de même pour les grosses branches ; quant aux petites branches et aux feuilles, elles doivent être pesées.

Des échantillons de matière fraîche (du tronc, des branches et des feuilles) doivent être pesés sur place et analysés en laboratoire pour déterminer les ratios matière fraîche/matière sèche et matière sèche/carbone.

Lorsqu'on a mesuré le poids des troncs, branches et feuilles pour quelques arbres de chaque espèce et de chaque classe de taille, on essaye d'établir des corrélations entre les dimensions de l'arbre et les masses des différents compartiments. Ces corrélations permettent d'estimer les poids de biomasse pour tous les arbres de la parcelle.

Une mesure rigoureuse de la biomasse aérienne totale doit tenir compte de la strate inférieure de la

végétation (arbustes et herbes) ainsi que de la matière végétale au sol (litière et résidus). La biomasse peut être estimée par coupe et pesée sur un certain nombre de carrés élémentaires. Ces carrés doivent représenter les divers types de couverture sur la parcelle.

La mesure est ensuite rapportée à l'hectare en tenant compte du fait que cette végétation herbacée et la matière végétale au sol ne sont pas présentes là où il y a des arbres. Par exemple, si l'on trouve une moyenne de 1 kg d'herbes, de résidus de litières par mètre carré et que les souches des arbres occupent 5 % du sol, alors la densité de biomasse herbeuse et au sol est de 9,5 t/ha.

Les problèmes rencontrés lors de l'estimation des stocks de carbone dans la biomasse sont semblables à ceux des inventaires forestiers. Il s'agit du choix de la taille des parcelles d'étude, du nombre d'échantillons, de l'époque et de la durée d'échantillonnage.

□ La biomasse souterraine

L'extraction des racines est une opération très délicate pour les gros arbres. On peut contourner ce problème en mesurant les dimensions des racines à l'aide de puits et en mesurant la densité de petites racines par extraction de blocs de terre.

De même que pour la biomasse aérienne, on peut établir des corrélations entre les dimensions de l'arbre et le poids des racines. Ce cas n'est valable que pour les grosses racines dans la mesure où les petites racines et les racelles sont souvent emmêlées ; il est donc difficile de déterminer à quel végétal elles appartiennent.

□ Des méthodes plus simples pour la biomasse

Les méthodes décrites ci-dessus sont idéales mais lourdes. Il est possible d'y apporter des simplifications.

Tout d'abord, les mesures en laboratoire peuvent être évitées grâce à l'utilisation de tables de densité et de tables de ratio carbone/matière sèche. En général, on prend ce ratio égal à 50 %, mais un calcul plus précis peut utiliser des ratios par compartiments de l'arbre et par espèces.

Ensuite, les mesures sur le terrain peuvent se limiter à des mesures classiques de dimension d'arbres, comme dans un inventaire forestier à but commercial. Des auteurs ont développé des tables de ratio biomasse commerciale/biomasse totale qui peuvent être utilisées (BROWN, 1997). Il est vraisemblable que, dans l'avenir, un effort de recherche sur les méthodes d'estimation des stocks de carbone dans la biomasse devra être réalisé. En particulier, des tables d'estimation adaptées aux zones biogéographiques, aux espèces, aux classes de taille, etc. devraient pouvoir être produites.

□ Le sol

Bien que la partie minérale du sol contienne du carbone (sous forme de carbonates et de bicarbonates), elle est rarement prise en compte car elle ne participe presque pas aux échanges de carbone gazeux. La matière organique du sol se compose de racines de plantes vivantes, de restes plus ou moins décomposés de plantes mortes, de matière organique colloïdale (humus), formant souvent 60 à 70 % de matière organique totale, de micro-organismes vivants (bactéries, protozoaires, champignons, etc.), de macro-organismes vivants (vers, fourmis, termites, etc.) et de matière organique inactive ou inerte (charbon, végétation brûlée, cendres, etc.).

Lors des analyses de sols, l'échantillon est passé à travers un tamis (à mailles de 2 mm par exemple) pour éliminer les racines, les restes de plantes, les organismes et la matière

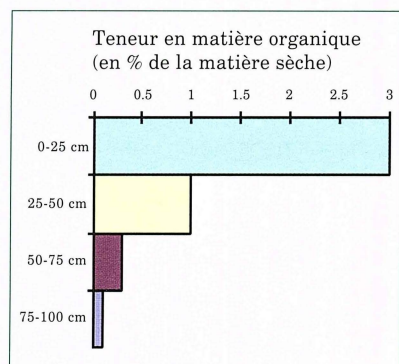


Figure 8. Teneur en matière organique sur un profil de sol (d'après BURINGH, 1984).

Organic matter content in a soil cross section.

organique inerte. Les racines seront comptabilisées dans la biomasse souterraine et les autres éléments seront ajoutés au résultat de l'analyse de matière organique du sol proprement dit.

La teneur en matière organique du sol décroît avec la profondeur. On considère généralement que l'ensemble de la matière organique se trouve dans le premier mètre du sol. Sur l'exemple ci-dessus (cf. fig. 8), 68 % de la matière organique sont dans les 25 premiers centimètres et 91 % dans les 50 premiers centimètres. Tout comme les mesures de biomasse, l'évaluation du stock de carbone compris dans le sol d'un écosystème forestier résulte des prélèvements de profil de sol sur un certain nombre d'emplacements de la parcelle ; d'où des questions similaires sur la représentativité des échantillons analysés.

L'AVENIR

Les difficultés ressenties pour évaluer le stock et les flux de carbone expliquent assez bien la controverse qui anime les débats sur le réchauffement climatique. Néanmoins, malgré ces nombreuses incertitudes, il est aujourd'hui certain que l'accrois-

sement des émissions atmosphériques de carbone constaté depuis la fin du XVIII^e siècle va se perpétuer durant le siècle prochain. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) propose ainsi plusieurs tendances envisageables d'évolution des émissions de carbone (cf. tableau I).

Ainsi, en dépit des objectifs initialement annoncés à Rio, il est maintenant admis que la concentration du carbone atmosphérique est appelée à augmenter dans les prochaines décennies. Si certaines mesures de contrôle des émissions sont prises à moyen terme, comme la poursuite des négociations internationales le laisse penser, plusieurs auteurs* font l'hypothèse d'une stabilisation à 550 ppmv de la concentration en carbone à l'horizon 2100. Ce scénario correspond à un doublement de la concentration par rapport à la situation préindustrielle. Une telle évolution aurait deux conséquences majeures : d'une part, on peut s'attendre à un accroissement moyen des températures atmosphériques de 1,5-2 °C ; d'autre part, le niveau des mers devrait s'élever de 40-50 cm en moyenne.

Cependant, ces scénarios d'évolution et leurs conséquences restent assez incertains. Ils reposent sur des modèles représentant le climat glo-

bal et son évolution sur la base de nombreux modèles de la chimie de l'atmosphère, de la circulation océanique et atmosphérique, des sources et puits de gaz à effet de serre (naturels et anthropogènes), etc. Or, comme nous l'avons indiqué, ces dynamiques physiques restent mal connues et controversées**.

Ainsi, les acteurs engagés dans les négociations internationales de Kyoto ou de Buenos Aires débattent autour de projections et de simulations dont la validité scientifique n'est que rarement attestée. L'absence de certitude sur la quantification physique des flux et des stocks de carbone en provenance des forêts

* Ce scénario est notamment retenu par la majorité des études d'impact économique du réchauffement climatique.

** Des points délicats concernent les rétroactions. Par exemple, l'augmentation de la température moyenne du globe conduirait à une plus forte concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère, donc à un effet de serre renforcé (rétroaction positive) mais aussi à une augmentation de la présence de nuages qui réfléchissent le rayonnement solaire (rétroaction négative). On a ici une source de controverses (LAMBERT, 1992). D'autres débats portent sur l'importance d'une rétroaction négative : la stimulation de la photosynthèse (donc de l'absorption de CO₂ par les végétaux) provoquée par l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique.

TABLEAU I

CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DU CARBONE :
LES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES

Scénario d'émission (HOUGHTON <i>et al.</i> , 1997)	Stock dans l'atmosphère (Gt.C)	Concentration atmosphérique (ppmv)
Niveau préindustriel	590	280
Niveau de 1990	745	359
Doublement du niveau préindustriel en 2100	1 160	550
Doublement du niveau de 1990 en 2100	1 580	750

tropicales se retrouve également dans les expériences d'évaluation monétaire de cette fonction écologique globale.

LA VALEUR DE LA TONNE DE CARBONE

Les différentes négociations menées depuis six ans sur les moyens de réguler les émissions de gaz à effet de serre ont conduit les pays-parties à privilégier une solution en termes de permis d'émission échangeables. En parallèle à un système de contingentements des émissions sans possibilité d'échanger des droits d'émission ou à une application généralisée d'une écotaxe sur le carbone, plusieurs études indiquent qu'un marché mondial de droits d'émission constitue la solution économiquement la plus efficiente (REPETTO, AUSTIN, 1997). Cette perspective n'est pas sans influence sur l'utilisation future des forêts tropicales, qui vont de plus en plus être considérées comme des puits potentiels de carbone. Connaître dès à présent la valeur économique de cette fonction écologique assurée par la forêt tropicale est important pour deux raisons : d'une part, pour ne pas négliger ce bénéfice dans l'élaboration d'un mode de gestion durable de l'écosystème et, d'autre part, pour maintenir cette fonction écologique ; si cette dernière ne fait pas aujourd'hui l'objet d'une valorisation marchande, elle pourrait, dans quelques années, constituer une source conséquente de financements.

Pour connaître la valeur d'une tonne de carbone captée et séquestrée par une forêt tropicale, les économistes recourent à deux méthodes d'évaluation indirecte de l'environnement : la méthode dose-effet et la méthode des dépenses de prévention.

L'APPLICATION

D'UNE MÉTHODE DOSE-EFFET

Le principe de la méthode dose-effet est d'évaluer monétairement la variation de la qualité/quantité de l'environnement en observant les conséquences physiques que ce changement entraîne. Si l'on admet que les principales conséquences du réchauffement climatique sont prévisibles, il est possible d'établir un lien entre les tonnes de carbone émises actuellement et les dommages auxquels elles vont donner lieu. La fonction de séquestration et/ou captation de carbone par la forêt tropicale détient ainsi une valeur économique ; il est possible de l'estimer à partir des coûts monétaires que son maintien permet d'éviter.

Dans le cadre d'un scénario qui verrait doubler la concentration d'équivalent CO₂ dans la seconde moitié du siècle prochain, plusieurs économistes ont proposé une évaluation monétaire de l'ensemble des dommages du réchauffement clima-

tique : ceux-ci s'établissent à 1-1,5 % du PIB par an dans les pays industrialisés et entre 2 et 9 % dans les pays en développement.

Ces estimations globales se révèlent cependant difficilement utilisables pour la prise de décision, notamment parce qu'elles ne permettent pas d'estimer la valeur actuelle d'une tonne de carbone relâchée. En effet, le dommage d'une tonne de carbone est différent selon le stock de gaz à effet de serre qui est déjà présent dans l'atmosphère au moment de son émission : ainsi une tonne émise aujourd'hui aura-t-elle moins de conséquence sur le réchauffement climatique que cette même tonne libérée en 2050. Plutôt qu'un coût moyen de la tonne de carbone émise, il convient donc de connaître le coût marginal de chaque tonne additionnelle de carbone au moment où celle-ci est émise dans l'atmosphère.

A partir d'une comparaison entre coûts et avantages à attendre des stratégies envisageables de réduc-



Avec l'émergence des questions relatives au changement climatique, la tonne de carbone en forêt tropicale prend une valeur monétaire.

With the emergence of issues to do with climate change, a ton of carbon in tropical forest assumes a monetary value.

TABLEAU II
ESTIMATIONS DU COÛT
D'ÉMISSION DE CO₂ (US\$/t.C)

Référence	Coût marginal de la tonne de CO ₂ en US\$
Nordhaus (1991)	7,3
Ayres & Walter (1991)	30-35
Cline (1992)	7,6
Peck & Teisberg (1992)	12-14
Nordhaus (1993)	6,8
Maddison (1993)	8,1-8,4
Fankhauser (1995)	22,8
Maddison (1995)	16,8

(Source principale : FANKHAUSER, 1995).

tion des émissions de gaz à effet de serre, plusieurs études ont estimé la valeur marginale de la tonne de carbone. Nous présentons ci-dessus les estimations calculées à l'horizon 2001-10, qui correspond à la période où des politiques forestières de captation/séquestration de carbone peuvent être mises en place*.

Néanmoins, cette fourchette de coûts marginaux est fondée sur un grand nombre d'hypothèses simplificatrices et largement débattues dans la littérature : choix du taux d'actualisation, évolution des conditions économiques, démographiques et environnementales, équité inter- et intra-générationnelle, etc. Les coûts sociaux de la tonne de carbone émise qui sont proposés ci-dessus ne peuvent pas être considérés autrement que comme des ordres de grandeur peu raffinés, dont les choix éthiques et politiques sous-jacents sont discutables. Il est néanmoins intéressant de comparer ces premières estimations de la valeur de la tonne de carbone à celles que l'on peut obtenir à partir des coûts réels des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

UNE ÉVALUATION DE LA TONNE DE CARBONE PAR LES DÉPENSES DE PRÉVENTION

Au lieu d'estimer la valeur de la tonne de carbone à partir des incidences économiques futures du réchauffement climatique, celle-ci peut également être calculée à partir des dépenses à faire dès aujourd'hui pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Selon cette approche, dite « budget carbone » (FANKHAUSER, 1995), il n'est pas nécessaire de justifier économiquement la mise en œuvre de mesures de réduction des émissions sur la base des dommages futurs qu'elles permettent d'éviter. L'objectif de réduction des émissions est fixé de manière exogène, principalement selon des considérations politiques ; il convient ensuite d'atteindre cet objectif au meilleur coût. L'estimation de la valeur d'une tonne de carbone séquestrée par la forêt tropicale est alors le résultat d'un processus en trois étapes :

- la définition d'un objectif en matière d'émissions de gaz à effet de serre ou de concentration atmosphérique de carbone ;
- l'identification des politiques de prévention du changement climatique qui permettent d'atteindre cet objectif au moindre coût ;
- la valeur de la tonne de carbone stockée correspond alors à la dépense de prévention qu'elle permet d'éviter. Par exemple, si l'on prend le cas de l'Union Européenne, une réduction de 15 % des émissions en 2010 par rapport au niveau de 1990 impliquerait un coût d'environ 1 500 \$ par tonne de carbone épargnée. Cette estimation correspond au consentement maximal à payer par des pays européens pour se procurer une tonne de carbone non émise sur un éventuel marché mondial. Le coût financier des dé-

penses de prévention à instaurer en Europe sert alors à estimer la valeur d'une tonne de carbone dont le stockage est assuré par la forêt tropicale.

Dans le cadre actuel du protocole de Kyoto, plusieurs simulations d'un marché des droits d'émission ont été effectuées, qui permettent d'estimer un prix mondial de la tonne de carbone sur la base des mesures des stratégies de parade existant dans chaque pays-partie. La simulation d'un marché du carbone confrontant la demande et l'offre de cet actif naturel se révèle une tâche ardue et dépendante de nombreuses hypothèses**. A partir d'un scénario moyen et des prescriptions du protocole de Kyoto, plusieurs études parviennent à calculer une valeur de la tonne de carbone sur un éventuel marché des droits d'émission. C'est le cas du cabinet norvégien de consultants, ECON, dont les estimations sont rapportées par FALLOUX (1998) :

- le coût marginal d'une tonne de carbone non émise dans les pays développés varierait entre 60 et 90 dollars ;
- dans la plupart des pays du Sud, le coût de réduction serait de l'ordre de 20 dollars par tonne de carbone. A titre de comparaison, la vente de « bons carbone » au Costa Rica correspondant à un volume d'une tonne de carbone captée/séquestrée se fait au cours fixe de dix dollars (DUTSCHKE, MICHAELOWA, 1997) ;

* A partir d'un échantillon plus large d'études, le GIEC (1995) indique que les estimations des dommages varieraient entre 5 et 125 US\$ (au taux de 1990) par tonne de carbone actuellement émise.

** Celles-ci portent notamment sur le profil des futures émissions, le comportement du cycle naturel du carbone, le progrès technique, le degré de coopération internationale...

• au total, « il est difficile de prévoir à quel prix se négociera la tonne de carbone dans le cadre de projets de mise en œuvre conjointe, mais si l'on imagine un prix médian de 40 dollars, ce type d'opération serait avantageux pour toutes les parties » (FALLOUX, 1998, p. 22).

Ces nouvelles estimations de la valeur de la tonne de carbone, calculées à partir des dépenses de prévention évitées, se révèlent plus élevées que celles obtenues à partir de l'estimation des dommages futurs. Il peut alors paraître étonnant que les pays engagés acceptent de financer de coûteuses politiques de réduction des émissions alors que les dommages futurs ne semblent avoir qu'un impact marginal sur leurs économies. Ce comportement préventif trouve probablement sa source dans la confiance limitée des décideurs lorsqu'il s'agit d'estimer les dommages futurs. Il existe, en effet, une incertitude forte tant sur la validité des incidences économiques retenues que sur la méthode d'actualisation sur le très long terme. Mettre en œuvre des politiques de réduction des émissions, dont les coûts présents sont supérieurs aux bénéfices futurs probables qu'elles apportent, c'est le prix à payer pour se garantir contre le risque représenté par le réchauffement climatique. Cependant il est vraisemblable qu'avec l'accroissement des connaissances sur ce phénomène, le prix de la tonne de carbone sur un éventuel marché mondial tendra vers la valeur des dommages qu'elle permet d'éviter.

UNE LARGE ÉCHELLE DE VALEUR POUR LA FONCTION DE SÉQUESTRATION DU CARBONE

A ce jour, aucune convention n'est acceptée concernant la démarche à suivre pour estimer la valeur

TABLEAU III
**VALEURS DE LA TONNE DE CARBONE SÉQUESTRÉE/CAPTÉE
PAR UNE FORÊT TROPICALE**

US\$/t.C	Valeur basse	Valeur haute
Par les dommages marginaux	7	30-35
Par le budget carbone	10	60

d'une tonne de carbone épargnée. À partir des études que nous avons identifiées, il est néanmoins possible de présenter une fourchette d'estimations économiques potentielles (cf. tableau III).

Ces données ne constituent que des ordres de grandeur fortement dépendants des hypothèses posées pour réaliser le calcul. Étant donné la disparité de ces estimations et des démarches suivies pour les produire, le choix d'une valeur économique moyenne de la tonne de carbone se révèle en grande mesure arbitraire. Plusieurs études récentes tendent à privilégier une estimation de l'ordre de 20 US\$/t.C. Cette valeur a d'ailleurs été reprise dans la littérature consacrée à la forêt tropicale. Les prochaines conférences sur le climat permettront sans doute de préciser les modalités d'un tel marché et d'estimer de manière moins aléatoire le prix de ce nouvel actif environnemental.



Comme nous avons tenté de le montrer, les recherches portant sur les liens entre forêt tropicale et réchauffement climatique sont caractérisées par de nombreuses incertitudes physiques et économiques. Ces incertitudes ne doivent pas empêcher la prise de décision et restreindre la capacité de la communauté internationale à prendre les mesures les plus adéquates étant donné l'état des

connaissances. Dans cette perspective, l'avantage de recourir à la foresterie comme stratégie de lutte contre le réchauffement climatique est double :

- Dans un univers de décision incertain, la mise en œuvre de stratégies forestières est facilement adaptable, voire réversible*. Or, puisque l'acquisition de nouvelles connaissances est un processus continu en matière d'effet de serre, les mesures relatives au changement climatique doivent pouvoir être constamment revues à la lumière de nouvelles informations. La gestion des écosystèmes forestiers est la seule alternative qui permette cette flexibilité.

- De telles politiques forestières, comme le ralentissement de la déforestation, l'accélération du reboisement, ou le développement des réserves forestières, présentent l'avantage d'inciter à une gestion rationnelle et durable des forêts, dont les usagers vont tirer bien d'autres bénéfices que ceux liés au seul stockage de carbone. Ces mesures forestières constituent donc clairement une stratégie « sans regret », c'est-à-dire dont les principaux avantages ne sont pas à attendre de la réduction des dommages imputables au changement climatique : « a no regret policy seems to be the only logical road to follow, meaning that forestry activities, forest

* Il n'en serait pas de même avec, par exemple, les politiques énergétiques.

conservation and reforestation, should be vigorously pursued because of their multiple benefits. The resulting carbon sequestration function should be seen as a positive side-effect » (BEKKERING, 1992, p. 41).

L'application généralisée de ces mesures permettra sans doute

d'affiner les connaissances sur le rôle de la forêt tropicale dans le réchauffement climatique et d'en améliorer l'utilisation pour le bien-être des populations tant sur le plan local qu'à l'échelon de la planète.



Crédit photos : B. LOCATELLI.

► Guillaume LESCUYER
Bruno LOCATELLI
CIRAD-Terra
B.P. 5035
34032 MONTPELLIER CEDEX 1

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEKKERING T. D., 1992.
Using Tropical Forests to Fix Atmospheric Carbon: The Potential in Theory and Practice. *Ambio* 21(6) : 414-19.
- BROWN S., 1997.
Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests. Rome, FAO, FAO Forestry Paper n° 134, 55 p.
- BURINGH P., 1984.
Organic Carbon in Soils of the World. In : The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing, Scope 23, G. M. Woodwell éd., New York, Etats-Unis, John Wiley and Sons, p. 91-109.
- CIESLA W. M., 1997.
Le changement climatique, les forêts et l'aménagement forestier. Rome, FAO, Etude FAO Forêt n° 126, 139 p.
- COSTANZA R., D'ARGE R.,
DE GROOT R., FARBER S. *et al.*, 1997.
The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* 387 : 253-60.
- DIXON R. K., BROWN S.,
HOUGHTON R. A. *et al.*, 1994.
Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263 : 185-90.
- DIXON R. K., SCHROEDER P. E.,
WINJUM J. K. éd., 1991.
Assessment of Promising Forest Management Practices and Technologies for Enhancing the Conservation and Sequestration of Atmospheric Carbon and Their Costs at the Site Level. US Environmental Protection Agency, Corvallis, USA, 140 p.
- DUTSCHKE M., MICHAELOWA A., 1997.
Joint Implementation as Development Policy: the Case of Costa Rica. In : The International Workshop Economic Globalisation and Sustainable Development: Are They Compatible?, 7-8 novembre, Saint-Quentin-en-Yvelines, France, 50 p.
- FALLOUX F., 1998.
Des dollars plus verts. *Courrier de la planète* 44 : 22-23.
- FANKHAUSER S., 1995.
Valuing Climate Change: the Economics of the Greenhouse. Londres, Grande-Bretagne, Earthscan, 178 p.
- GRINEVALD J., 1992.
De Carnot à Gaïa : histoire de l'effet de serre. *La Recherche* 243 : 532-541.
- GROUPE D'EXPERTS
INTERGOUVERNEMENTAL
SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, 1995.
Aspects socio-économiques de l'évolution du climat : résumé à l'intention des décideurs. Report of IPCC Working Group III. Suisse, Genève, 20 p.
- HAMPICKE U., 1979.
Net Transfer of Carbon Between the Land Biota and the Atmosphere Induced by Man. In : The Global Carbon Cycle, SCOPE 13, B. Bolin, E. T. Degens, S. Kempe, P. Ketner éd., New York, U.S.A., John Wiley & Sons, p. 219-236.
- HARMON M. E., FERRELL W. K.,
FRANKLIN J. F., 1990.
Effects on Carbon Storage of Conversion of Old-growth Forests to Young Forests. *Science* 247(4943) : 699-702.
- HOUGHTON J. T., MEIRA FILHO L. G.,
GRIGGS D. J., MASKELL K., 1997.
Stabilisation des gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques. Document technique III du GIEC. Genève, Suisse, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 50 p.
- LAMBERT G., 1992.
Les gaz à effet de serre. *La Recherche* 243 : 550-556.
- OGAWA H. K., YODA K., OGINO K., KIRA T., 1965.
Comparative Ecological Studies of Three Main Types of Forest Vegetation in Thailand, I : Plant biomass. *Nat. Life Southeast Asia* : 449-81.
- PEARCE D., 1996.
Can Non-market Values Save the World's Forests? In : Symposium international The Non-market Benefits of Forestry, Edimbourg, Grande-Bretagne, 23-29 juin 1996, 15 p.
- REPETTO R., AUSTIN D., 1997.
Les coûts de la protection du climat : un guide pour les indécis. *Ecodécision* 25 : 58-61.
- SADOURNY R., 1992.
L'homme modifie-t-il le climat? *La Recherche* 243 : 522-531.
- WATSON R. T., ZINYOWERA M. C.,
MOSS R. H. éd., 1996.
Techniques, politiques et mesures d'atténuation du changement climatique. Document technique I du GIEC. Genève, Suisse, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 98 p.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANISATION, 1990.
Climate Change: the IPCC Scientific Assessment. United States Environment Program, Cambridge University Press.

R É S U M É

RÔLE ET VALEUR DES FORÊTS TROPICALES DANS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La concentration atmosphérique du dioxyde de carbone, le plus important des gaz à effet de serre, augmente à cause de la combustion des énergies fossiles et des changements d'utilisation des sols, la déforestation en particulier. Les forêts tropicales jouent un rôle important dans le changement climatique en raison des fortes densités de carbone stockées dans leur végétation et leurs sols et en raison de leur potentiel à absorber du carbone de l'atmosphère. La valeur économique de cette fonction écologique varierait de 7 à 60 US\$ par tonne de carbone. Les stratégies forestières de lutte contre le changement climatique présentent de nombreux avantages.

Mots-clés : Changement climatique. Effet de serre. Dioxyde de carbone. Carbone. Forêt. Valeur économique.

A B S T R A C T

THE ROLE AND VALUE OF TROPICAL FORESTS IN CLIMATE CHANGE

The atmospheric concentration of carbon dioxide, the principal greenhouse gas, rises because of the burning of fossil fuels and because of changes in land use – in particular deforestation. Tropical forests play a major role in climate change on account of the high densities of carbon stored in their vegetation and their soil, and also because of their potential absorption of carbon from the atmosphere. The economic value of this ecological function ranges from \$7 to \$60 per ton of carbon. Forest strategies aimed at combatting climate change offer many advantages.

Key words : Climatic change. Greenhouse effect. Carbon dioxide. Carbon. Forests. Economic value.

R E S U M E N

COMETIDO Y VALOR DE LOS BOSQUES TROPICALES EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

La concentración atmosférica de dióxido de carbono, el más importante de los gases de efecto invernadero, aumenta debido a la combustión de energías fósiles y a los cambios de utilización del suelo, sobre todo aquellos vinculados a la deforestación. Los bosques tropicales desempeñan un importante cometido en el cambio climático debido a las altas densidades de carbono almacenadas en su vegetación y suelos y en razón de su potencial para absorber carbono de la atmósfera. El valor económico de esta función ecológica varía de 7 a 60 dólares por tonelada de carbono. Las estrategias forestales de lucha contra el cambio climático presentan numerosas ventajas.

Palabras clave : Cambio climático. Efecto invernadero. Dióxido de carbono. Carbono. Bosques. Valor económico.

SYNOPSIS

THE ROLE AND VALUE OF TROPICAL FORESTS IN CLIMATE CHANGE

GUILLAUME LESCUYER, BRUNO LOCATELLI

Public awareness about the issue of global climate change came to the fore at the June 1992 Earth Summit. At the Rio conference, more than 150 governments signed the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), the target of which was to *stabilize [...] concentrations of greenhouse gas in the atmosphere at a level preventing any human disturbance posing a threat to the climatic system*. In December 1997, the Third Conference of the Parties was held at Kyoto. Here, a protocol was signed whereby 38 industrialized countries undertook to reduce their overall greenhouse gas emissions by 5.2 % between 2008 and 2012, in relation to the reference year, 1990. The solution adopted to achieve these targets involves the introduction of a deal to do with negotiable emission permits, although the ways these are to be applied still remain to be discussed. Upcoming international negotiations on climate change represent a major challenge, particularly in terms of the management of tropical forests, which play a vital role in the carbon cycle.

Against this backdrop, the purpose of this article is twofold : on the one hand, it presents the principal existing store of knowledge about the links between tropical forests and the greenhouse effect ; on the other hand, it reminds readers that international discussions dealing with the role of forests in climate warming are based on a great many uncertainties, in both physical and economic terms.

THE ROLE OF FORESTS IN CARBON CYCLE

Measurements of the earth's temperature, which have been available for more than a century, show a recent rise in the world's average temperature of about 0.8 °C in one hundred years (cf. fig. 1). This observation may indeed confirm that there are changes in the earth's climate, but the reasons for them are less obvious. It has nevertheless been shown that it is above all by way of atmospheric factors that man has affected the climate, and more specifically by the emission of greenhouse gases. This said, is the rise in temperature recorded due solely to the greenhouse effect ?

The greenhouse effect is a natural atmospheric phenomenon, without which life on earth would not be possible, for the average temperature would be 33 °C lower than its current level. Whereas the atmosphere is fairly broadly transparent to the direct rays of the sun, part of the infrared radiation re-emitted by the earth is absorbed by certain lesser components of the atmosphere, which are called greenhouse gases. This trapped radiation heats up the lower atmosphere : this is the so-called greenhouse effect. The scale of this phenomenon has to do

with the concentration of greenhouse gases ; this is why increased concentration may lead to planetary warming.

Among the different greenhouse gases present in the atmosphere (H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 , CO , NO_x , O_3 , CFC), carbon dioxide is the most active^x (cf. fig. 2) ; so, for some years, policies drawn up to ward off climate changes have focused mainly on the reduction of carbon emissions.

The concentration of CO_2 was stable before the birth of the industrial age, and has risen by 25 % to reach its current level of some 350 ppmv (cf. fig. 3). This recent increase can be explained by the existence of two man-related sources of carbon, which have been expanding over the past two centuries : the consumption of fossil fuels (oil, gas, coal) and the way land has been altered (deforestation, most importantly). In the 1980s, carbon emission due to the consumption of fossil fuels settled at 5.4 ± 0.5 Gt.C/year, while changes in land use contributed some 1.6 ± 0.1 Gt.C/year. This is a low figure in the global carbon cycle (cf. fig. 4), but these emissions are not compensated by any equivalent catchment from the biosphere and the oceans, and they entail a tendency for carbon to build up in the atmosphere.

The forest and, more generally, the biosphere are of prime importance where carbon and greenhouse effect are concerned, for, if the burning of fossil fuel is perforce a source of carbon, the biosphere may be both a source and a sink. Furthermore, if the biosphere plays an important role in the carbon cycle, this is largely because of forests. The world's forests, taken all in all, represent a large share of the carbon stored in the biosphere, about 80 % of above-ground carbon, and 40 % of below-ground carbon. Lastly, of all the world's forests, tropical forests are especially important because of the scale of changes caused by man's activities, to which they are subject, and also because of the amount of carbon that they contain per surface unit (cf. fig. 5). From a global standpoint, tropical forests contain 37 % of the carbon in the world's forests.

If forests have a role to play in the retention of carbon, it seems important to be able to quantify the amounts of carbon which they store, or absorb and emit. In order to discover the amount of carbon absorbed or emitted by a forest over a given period of time (a growth or logging phase, for example), measurements are taken of the amount of carbon present in the biomass and the soil before and after the period. It is reckoned that the difference corresponds to exchanges with the atmosphere (cf. fig. 6). The future development of exported products must be known : if general timber is involved, part of the carbon will be retained for years (the other part being sawmill waste, for

example) ; if firewood is involved, the carbon will be swiftly restored to the atmosphere.

THE MONETARY VALUE OF CARBON BY THE TON

Current negotiations about climate change have a certain effect on the future use of tropical forests, which will be regarded, more and more, as potential carbon sinks. For two reasons, it is important to be acquainted, as of now, with the economic value of this ecological function assumed by tropical forests : on the one hand, so as not to overlook this advantage in the formulation of a sustainable management system for the ecosystem ; on the other hand, because the upkeep of this ecological function, which is not nowadays subject to any commercial assessment, may, within a few years, represent a major source of funding.

In order to know the value of a ton of carbon captured and retained by a tropical forest, economists use two indirect environmental assessment methods : the dose-effect method and the preventive expenditure method. The principle behind the dose-effect method is to come up with a monetary assessment of the variation in the quality/quantity of the environment, by observing the physical consequences entailed by this change. With the help of scenarios involving the development of CO_2 concentration, several economists have proposed a monetary assessment of all the damage from climate warming, whence come estimates of the marginal value of carbon by the ton of between US\$7 and \$35.

By the preventive expenditure method, the value of carbon by the ton is calculated on the basis of expenditures to be made as of now in order to reduce greenhouse gas emissions. The estimate of the value of a ton of carbon retained by tropical forest is thus the result of a three-stage process : the definition of a target in terms of emissions ; the identification of preventive policies ; and the calculation of the value of a ton of carbon stored as a preventive expenditure, which it helps to avoid. Results range from US\$10 to \$60.

These data only represent scales that are greatly reliant on hypotheses put forward to make the calculation. Given the disparity of these estimates and of the methods adopted to produce them, the choice of an average economic value of a ton of carbon turns out to be largely arbitrary. Several recent studies favour a value per ton of carbon of around US\$20.

Against this backdrop of physical and economic uncertainty to do with climate change, political choices must be set within a context of "no-regrets strategies". Even if the role of tropical forests in climate warming is a subject of some debate, the use of forestry has the advantage of being both reversible and adaptable. □