

biologie et forêt

LE GAZ CARBONIQUE DANS L'ATMOSPHÈRE : LE RÔLE DES FORÊTS

P. BOUVAREL

LE CONSTAT

L'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère est un fait indiscutable, constaté par les mesures faites depuis 1958 à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï), plus récemment dans l'Antarctique et à Point Barrow (Alaska).

De 1958 à 1985, la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique (CO₂) est passée de 315 ppm⁽¹⁾ à 345 ppm, soit une augmentation annuelle à peu près régulière d'environ 1 ppm. Les oscillations annuelles d'environ 7 ppm d'amplitude traduisent les variations saisonnières de la photosynthèse végétale (figure 1, page 302).

Le stock de carbone de l'atmosphère, évalué à 700 Gt⁽²⁾ s'accroît chaque année de 2,9 Gt. Il est constitué en presque totalité par le gaz carbonique, auquel s'ajoutent en faible proportion d'autres composés carbonés, notamment le méthane (CH₄). On a pu estimer les variations de la teneur en gaz carbonique, avant le début des mesures directes, par des mesures des rapports isotopiques du carbone contenu dans les accroissements annuels des arbres, ou du gaz des microbulles d'air enfermées dans la glace des pôles⁽³⁾.

(1) ppm : partie par million.

(2) Gt : gigatonne (milliard de tonne).

(3) L'isotope stable ¹³C (1 % environ) est moins abondant dans les végétaux et les combustibles fossiles que dans l'air. La diminution du rapport ¹³C/¹²C rend compte de l'augmentation régulière du CO₂ ayant cette origine végétale. L'isotope radioactif ¹⁴C, dont la période est 5 500 ans, a disparu des combustibles fossiles ; la radioactivité du carbone des anneaux d'arbres décroît depuis le début de l'ère industrielle, traduisant une dilution plus forte du ¹⁴C dans le gaz carbonique de l'air.

Les estimations varient selon les auteurs ; les plus couramment admises sont : 275 ppm en 1800, 290 ppm en 1900. L'analyse de la glace dans l'Antarctique, sur une grande épaisseur, permet de remonter beaucoup plus loin : 160 000 ans grâce à la carotte de 2 200 m extraite à la station de Vostok. L'analyse révèle des variations fréquentes et importantes de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, avec un maximum de 300 ppm vers - 130 000, un minimum de 180 ppm vers - 40 000. Ces oscillations sont étroitement liées à celles de la température, reconstituée par d'autres techniques isotopiques. Le mécanisme de cette liaison reste mal expliqué (Lorius, 1988).

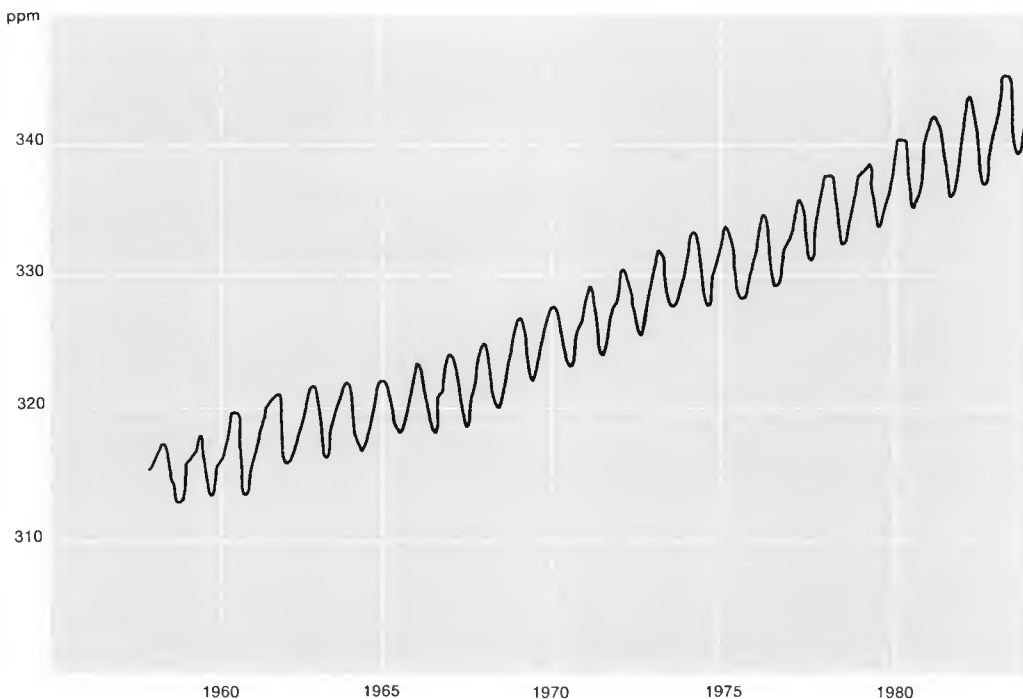
LES RISQUES

Cette dérive d'un élément de notre système planétaire — matériau de la photosynthèse, source de toute vie — ne risque-t-elle pas d'en compromettre l'équilibre ? Plusieurs questions se posent :

- comment l'expliquer ?
- quels peuvent en être, et à quel terme, les effets ?
- comment les prévenir ou les corriger ?

De nombreux chercheurs s'attachent, depuis 25 ans environ, à trouver des réponses. La diversité de celles-ci, l'importance des équipes engagées dans de nombreux pays, traduisent la gravité et la difficulté de ce problème, qui pourrait bien être le principal défi écologique du prochain siècle.

Figure 1 **TENEUR DE L'ATMOSPHÈRE EN GAZ CARBONIQUE, MESURÉE À MAUNA LOA (HAWAÏ).**
D'après G. Lambert, 1987, reproduit de R.H. Gammon et al., 1985.



Le scénario le plus plausible repose sur les conséquences de ce qu'on appelle l'effet de serre : le gaz carbonique et d'autres composés carbonés comme le méthane, s'ils laissent passer le rayonnement solaire de faible longueur d'onde, freinent le retour à l'espace du rayonnement infra-rouge réfléchi par la terre et règlent ainsi la température de la biosphère. Tout renforcement de l'écran de composés carbonés doit entraîner un réchauffement de la planète, avec pour conséquence des changements climatiques qui peuvent être catastrophiques, la fusion des glaces polaires, une élévation du niveau des océans.

LES TERMES DU BILAN

Les études sur le bilan global du carbone visent à identifier et évaluer les **sources** (émission de carbone vers l'atmosphère) et les **puits** (stockage du carbone atmosphérique).

Il est évident que l'homme a modifié l'atmosphère de la planète en brûlant, depuis deux siècles et surtout depuis 1850, le carbone contenu dans les combustibles fossiles, charbon puis pétrole. On a calculé que, depuis plusieurs décennies, l'activité industrielle et les foyers domestiques rejettent dans l'atmosphère environ 5 Gt de carbone par an. Or nous avons vu que celle-ci s'enrichit seulement de 2,9 Gt. On a pensé tout d'abord que les océans pouvaient être le puits absorbant, par dissolution sous forme d'acide carbonique, cet excès de carbone. Mais on sait depuis une quinzaine d'années que cette équation est fautive : d'une part, parce que la capacité d'absorption de la couche superficielle des océans est insuffisante, d'autre part parce que la biomasse joue certainement un rôle dans le déséquilibre actuel du cycle du carbone.

Je limiterai mon propos à ce dernier point, en m'attachant surtout au rôle de la biomasse forestière, qui représente environ 85 % de la biomasse végétale (Atjay *et al.*, 1978). La biomasse animale est négligeable par rapport à celle-ci.

LA FORÊT VIERGE : BILAN CARBONÉ NUL

L'affirmation parfois lue ou entendue : « la forêt tropicale est le poumon de la planète » est doublement équivoque : d'abord, le terme poumon, dans le sens d'épurateur de l'atmosphère, est impropre, car un poumon émet du gaz carbonique, mais surtout une forêt adulte, en équilibre, inexploitée, ne contribue en rien à l'assainissement de l'atmosphère, car son bilan carboné est nul. En effet, tout le carbone fixé dans les arbres vivants par la photosynthèse est, après un temps plus ou moins long, restitué à l'atmosphère par la respiration des organismes décomposeurs, végétaux et animaux, qui se nourrissent du bois mort, et des consommateurs primaires et secondaires.

En réalité, ce bilan n'est pas tout à fait nul : une partie du carbone fixé n'est pas restitué par la forêt à l'atmosphère. Le lessivage des sols entraîne une partie des acides organiques solubles vers les rivières, et, finalement, vers les océans. Mais cette fraction est probablement très faible par rapport à la masse de carbone échangée entre l'atmosphère et la forêt.

Si la formulation un peu simpliste du rôle bénéfique des forêts est critiquable, la réalité est celle-ci : **l'existence des forêts garantit, pour ce qui les concerne, l'équilibre des flux ; toute modification au statut des forêts compromet cet équilibre** : défrichement, exploitation, création de forêts nouvelles, changements dans la sylviculture ou la transformation des produits font que, à un instant donné, la biomasse forestière fonctionne comme une source ou un puits pour le carbone atmosphérique. Examinons donc les conséquences sur le bilan du carbone des transformations apportées par l'homme aux forêts.

LA FORÊT EXPLOITÉE : PUIITS DE CARBONE

Un massif forestier exploité et aménagé fonctionne comme une forêt vierge en équilibre, à cela près que l'accroissement, au lieu d'être dégradé sur place sous forme d'arbres morts, est exporté sous forme de produits. Le carbone contenu dans ceux-ci retourne à l'atmosphère plus ou moins vite, selon qu'il s'agit de rémanents brûlés, de bois de feu, de bois de papeterie, de souches décomposées ou de bois d'œuvre. Seul le bois d'œuvre utilisé pour la construction ou l'ameublement représente un stockage de longue durée du carbone ; l'augmentation de sa production dans le monde a sans doute contribué à atténuer l'augmentation du carbone atmosphérique.

La production mondiale de grumes de sciage et placage était, en 1986 (Annuaire des produits forestiers de la FAO), de 960 millions de mètres cubes, ce qui représente un puits de 0,24 Gt de carbone ⁽⁴⁾. Elle était en 1964 de 700 millions de mètres cubes (0,17 Gt de carbone). Sur ce total, les pays en voie de développement (que l'on assimilera aux régions tropicales) représentent 0,057 Gt de carbone, et les forêts des zones tempérées et boréales 0,183 Gt.

L'extension des forêts par le reboisement et les accrues naturels est un autre facteur favorable. Pendant la période de croissance, et avant le début des exploitations, un jeune boisement stocke du carbone, fonctionne donc comme un puits du carbone atmosphérique. Ce stockage peut être évalué approximativement de la façon suivante :

- biomasse totale à 40 ans : 160 tMS/ha, soit 80 tC/ha ;
- stockage annuel : 2 tC/ha ;
- pour environ 150 millions d'hectares de jeunes forêts nouvelles :
 $2 \text{ t} \times 150 \cdot 10^6 = 300 \cdot 10^6 \text{ tC/an} = 0,3 \text{ GtC/an.}$

Par d'autres voies, Hampicke (1979) obtient une valeur analogue.

DÉFORESTATION : SOURCE DE CARBONE

La déforestation se traduit évidemment par un déstockage massif et un retour souvent rapide du carbone à l'atmosphère. La destruction des forêts tropicales est là le phénomène majeur, il a retenu l'attention de la plupart des auteurs qui étudient l'évolution du bilan du carbone ⁽⁵⁾.

Que la forêt soit détruite par l'incendie ou par l'exploitation à blanc, la majeure partie du carbone de la biomasse aérienne est restituée à l'atmosphère instantanément ou après quelques années. Le retour de ce qui reste, rémanents ou bois incomplètement brûlés, souches et racines, prendra au plus quelques décennies ; une partie au moins du carbone organique du sol sera minéralisé sous forme de gaz carbonique.

Selon ce que devient la surface déforestée, la perte de carbone est définitive ou compensée, à terme, par un restockage partiel : définitive si le désert — ou l'urbanisation, ou les voies de communication — succède à la forêt ; restockage partiel mais très faible s'il y a mise en culture [la phytomasse vivante d'une forêt est 70 fois supérieure à celle d'une culture, 20 fois à celle d'une prairie (Atjay *et al.*, 1978)].

Si à la place de la forêt primaire, se développe une forêt d'essences secondaires, le carbone qu'elle accumule pendant sa croissance compense partiellement celui perdu.

(4) On utilisera les coefficients de transformation suivants : matière sèche (MS) en carbone : 0,5 ; mètres cubes en carbone : 0,25.

(5) Les forêts tropicales représentent environ 60 % en masse de carbone, de la totalité des forêts du globe (Atjay *et al.*, 1979).

Biologie et forêt

Cet essai d'estimation du flux du carbone dû à la déforestation en zone tropicale utilise les données :

- de Lanly pour les surfaces (S) ;
- de Cannell pour les biomasses (B). J'ai pris les moyennes des données mentionnées pour divers pays de la zone tropicale ;
- de l'annuaire des produits forestiers de la FAO pour les volumes de bois d'œuvre (V).

	Surface 10 ⁶ ha	Biomasse t/ha	Carbone tC/ha
Déforestation forêt dense	S _d = 7,5	B _d = 450	C _d = 225
Déforestation forêt ouverte	S _o = 3,8	B _o = 260	C _o = 130
Jachère forestière	S _j = 5,1	B _j = 100	C _j = 50

Sur les 11,3 millions d'hectares détruits par an, 6,2 millions sont remplacés par des formations à biomasse négligeable (agriculture permanente), ou nulle (déserts) ; sur 5,1 s'établit un complexe d'agriculture itinérante et de formations secondaires que Lanly désigne par « jachère forestière ». J'ai estimé, faute de données, sa biomasse moyenne à 100 tMS/ha.

Pour obtenir le flux net, il faut donc retrancher au carbone perdu par la déforestation, celui restocké dans les jachères forestières, et celui conservé sous forme de bois mis en œuvre.

$$(C_d \times S_d) + (C_o \times S_o) - (C_j \times S_j) - V = (225 \times 7,5 \cdot 10^6) + (130 \times 3,8 \cdot 10^6) - (50 \times 5,1 \cdot 10^6) - 57 \cdot 10^6$$

$$= 1\,860 \cdot 10^6 = 1,86 \text{ GtC/an.}$$

Le puits de carbone que représentent les forêts tempérées, grâce aux bois mis en œuvre et à la croissance des jeunes forêts, doit partiellement compenser la fuite du carbone due à la déforestation en zone tropicale. Le flux net de carbone des forêts du globe serait :

- forêts tropicales (source) : + 1,86 Gt
- forêts tempérées et boréales (puits) : - (0,30 + 0,183) = - 0,483 Gt
- flux net des forêts : + 1,377 Gt.

On comprendra facilement, compte tenu des larges approximations employées pour l'obtenir, que ce chiffre doit être considéré avec beaucoup de prudence ; il indique seulement un ordre de grandeur et une tendance.

La diversité des évaluations faites par ailleurs, sur des bases et avec des méthodes variées, témoigne bien de la difficulté de l'entreprise :

Auteurs	Flux de carbone à partir des forêts tropicales (en Gt/an)
Hampicke (1979)	2,5 à 3 *
Houghton <i>et al.</i> (1983)	1,3 à 4,2
Molofsky <i>et al.</i> (1984)	0,5 à 1,8
Houghton <i>et al.</i> (1985)	0,9 à 2,5
Detwiller <i>et al.</i> (1988)	0,47 à 1,55

* Pour les forêts du globe.

On notera une tendance à la baisse de ces estimations, probablement due à la révision en baisse des surfaces déforestées depuis les inventaires réunis par Lanly en 1982. Depuis cette date, il se peut que cette tendance soit inversée, car le massacre de la forêt amazonienne s'est aggravé.

AUTRES FACTEURS MAL CONNUS

Il existe probablement d'autres puits ou sources de carbone concernant les forêts, difficiles à évaluer, susceptibles de modifier (dans quelle mesure ?) les valeurs disponibles d'après les études actuelles. On peut citer :

- la fuite de carbone soluble par les rivières drainant les grandes zones forestières ;
- l'évolution du carbone organique des sols après défrichement ;
- le rôle de la tourbe : l'énorme stock de carbone contenu dans la tourbe en zone boréale évolue-t-il ? L'exploitation de la tourbe (combustible « semi-fossile ») a-t-elle un impact significatif ?
- la déforestation accidentelle (incendies) ou non en zones tempérées et boréales ;
- l'évolution de la sylviculture : exploitation de l'arbre entier, rotations courtes, etc.

EFFET DE L'ENRICHISSEMENT EN CO₂ SUR LA VÉGÉTATION

L'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère provoque (ou provoquera)-t-elle en retour, grâce à une photosynthèse accrue, une accélération de la croissance des plantes ? On sait que l'enrichissement de l'atmosphère d'une serre a cet effet. Plusieurs auteurs le pensent, certains ont tenté une évaluation [0,3 à 0,6 Gt/an (Hampicke, 1979)]. Cet effet, s'il était établi, serait un mécanisme d'auto-régulation, mais sûrement insuffisant. La photosynthèse n'est d'ailleurs pas le seul facteur limitant de la croissance. On ne peut cependant pas manquer d'être troublé par le constat récent d'une augmentation, depuis plusieurs décennies, de la productivité primaire des forêts, d'après des études précises portant sur des forêts tropicales, tempérées et boréales. L'explication la plus couramment avancée est justement celle de l'effet de l'enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique.

Michel Becker, dans son analyse très fine de la croissance du Sapin dans le Vosges, constate une accélération de la croissance depuis 150 ans. Mais il va plus loin : si la tendance générale est bien à l'augmentation, les variations annuelles de la croissance sont liées de façon frappante aux conditions météorologiques (température et pluviosité). Il avance l'hypothèse suivante : si — ce qui reste à prouver — l'augmentation du gaz carbonique est bien le facteur initial, son effet sur la croissance végétale ne serait pas direct, par la photosynthèse, mais indirect par les modifications climatiques qu'il aurait provoquées.

*

**

Les tentatives d'explication du cycle global du carbone comportent deux certitudes, appuyées sur des chiffres pratiquement sûrs :

- l'augmentation du carbone atmosphérique, régulière et importante, et, de ce fait, préoccupante pour un avenir assez proche ;
- l'émission due à l'emploi des combustibles fossiles, principaux responsables de cette augmentation.

Ces deux certitudes ne permettent pas de boucler le cycle, puisqu'on n'a pu encore évaluer aussi bien la fonction, d'une part des océans, d'autre part de la biomasse et au premier rang des forêts.

Concernant ces dernières, cet essai n'a d'autre ambition que de rappeler :

- une forêt adulte, non exploitée, a un bilan carboné nul ;
- la destruction des forêts aggrave de façon sensible la situation ;
- la production de bois d'œuvre, c'est-à-dire la conséquence d'une bonne sylviculture, peut, dans une faible mesure, la corriger.

P. BOUVAREL
THIBOMPRÉ, SAINT-RÉMY
88480 ÉTIVAL-CLAIREFONTAINE

BIBLIOGRAPHIE

- ATJAY (J.-L.), KETNER (P.), DUVIGNEAUD (P.). — Terrestrial primary production and phytomass. In : The global carbon cycle, pp. 129-182. 1978 (Scope, 13).
- BECKER (M.). — The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of north-east France. — *Canadian Journal of Forestry* (sous presse).
- BECKER (M.), LÉVY (G.). — À propos du dépérissement des forêts : climat, sylviculture et vitalité de la sapinière vosgienne. — *Revue forestière française*, vol. XL, n° 5, 1988, pp. 345-358.
- BROWN (S.), LUGO (A.E.). — Biomass of tropical forests : a new estimate based on forest volume. — *Science*, n° 223, 1984, pp. 1290-1293.
- CANNELL (M.G.R.). — World forest biomass and primary production data. — Academic Press, 1982. — 391 p.
- DETWILLER (R.P.), HALL (C.A.S.). — Tropical forests and the global carbon cycle. — *Science*, n° 239, 1988, pp. 42-47.
- FAO. — Annuaire des produits forestiers 1964-1975. — Rome : FAO, 1977. — 397 p.
- FAO. — Annuaire des produits forestiers 1975-1986. — Rome : FAO, 1988. — 348 p.
- FRANCEY (R.J.). — Recent $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ trends in atmospheric CO_2 and tree rings. — *Nature*, n° 293, 1981, pp. 679-680.
- HAMPICKE (U.). — Man's impact on the earth's vegetation cover and its effects on carbon cycle and climate. pp. 139-159. In : *Man's impact on climate* / Bach and al. Eds. — Elsevier, 1979.
- HOUGHTON (R.A.) et al.. — Net flux of carbon dioxide from tropical forests in 1980. — *Nature*, n° 316, 1985, pp. 617-620.
- HOUGHTON (R.A.) et al.. — Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1960 and 1980 net release of CO_2 to the atmosphere. — *Ecological Monograph*, 53, 1983, p. 235-262.
- LAMBERT (G.). — Le Gaz carbonique dans l'atmosphère. — *La Recherche*, n° 189, 1987, pp. 778-787.
- LANLY (J.-P.). — Les Ressources forestières tropicales. — Rome : FAO, 1982. — 113 p. (Etude FAO, 30).
- LORIUS (C.) et al.. — Antarctic ice core : CO_2 and climatic change over the last climatic cycle. — *Eos*, 69, 1988, pp. 681-684.
- MOLOFSKY et al.. — In : *The biosphere : problems and solutions*. pp. 181-194. — Elsevier, 1984.
- WALSH (J.J.) et al.. — Biological export of shelf carbon is a sink of the global CO_2 cycle. — *Nature*, n° 291, 1981, pp. 196-198.