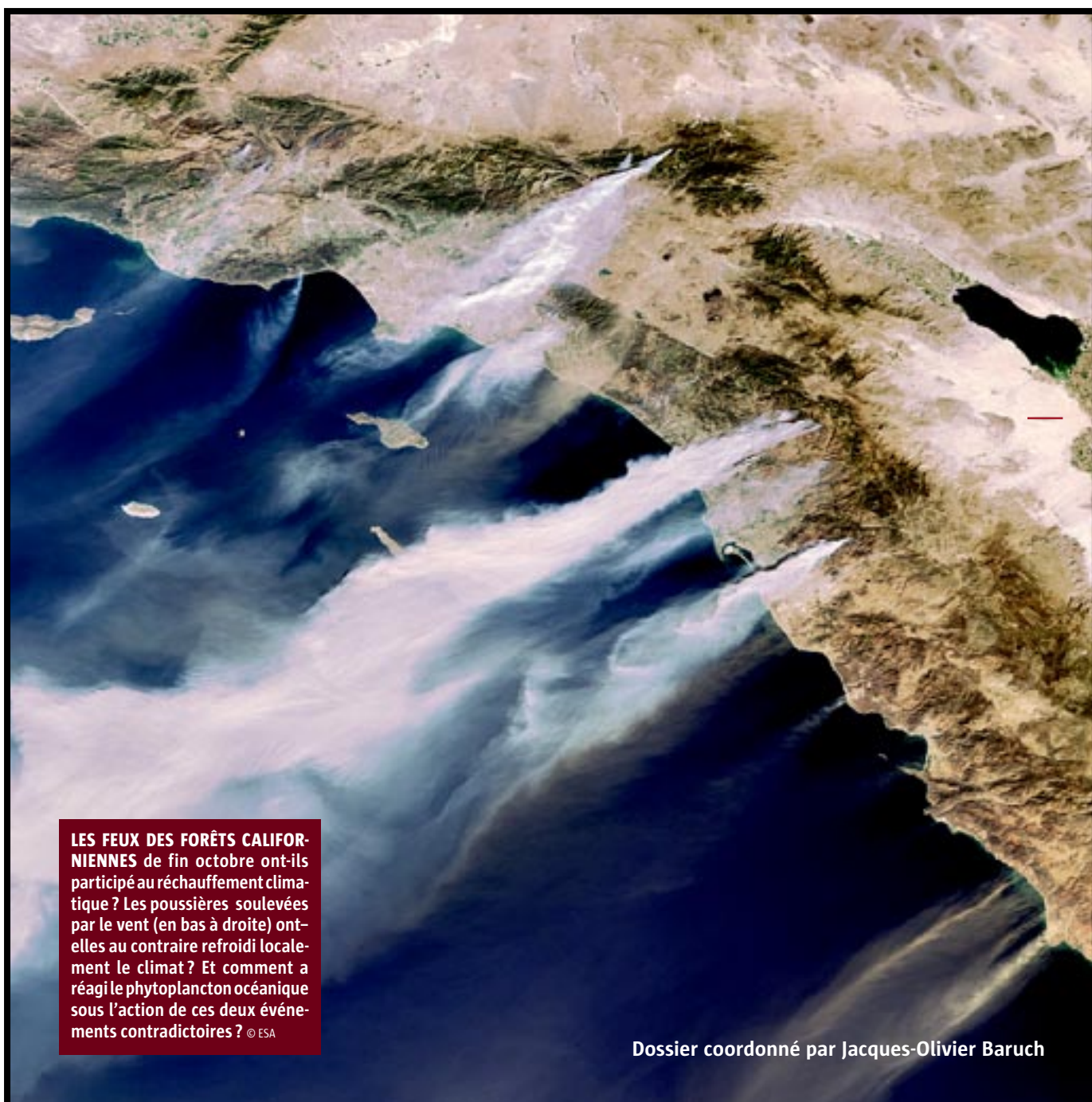


► DOSSIER

Les trois inconnues du CLIMAT



LES FEUX DES FORÊTS CALIFORNIENNES de fin octobre ont-ils participé au réchauffement climatique ? Les poussières soulevées par le vent (en bas à droite) ont-elles au contraire refroidi localement le climat ? Et comment a réagi le phytoplancton océanique sous l'action de ces deux événements contradictoires ? © ESA

Dossier coordonné par Jacques-Olivier Baruch

Combien seront-ils à Oslo, ce 10 décembre, pour recevoir le prix Nobel de la paix? Le nouveau récipiendaire, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, ne compte en effet pas moins de 2 500 scientifiques. Et que feront-ils des 5 millions de couronnes suédoises que le GIEC

recevra? Peut-être bien encore des recherches! Car même si la relation entre augmentation de l'atmosphère en gaz à effet de serre d'origine anthropique et réchauffement climatique est maintenant établie, de nombreuses interrogations persistent. La machine climatique est si complexe que les multiples actions et rétroactions sont difficiles à modéliser. Et les incertitudes sur les cycles du carbone ou de l'eau sont encore nombreuses. En voici quelques exemples.

■ **EN DEUX MOTS** ■ Lieu d'échange, avec l'atmosphère, d'énergie, d'eau, de chaleur et de composés chimiques, la forêt est au cœur de la machinerie climatique. Comment rendre compte de son rôle dans le contexte actuel de réchauffement? Des modèles existent, ils s'améliorent, mais s'appuient encore sur des observations trop rares et parcellaires. Autre inconnue: l'action de l'homme qui façonne les paysages et utilise le bois.

SOMMAIRE

- 1 Le rôle ambigu des forêts p. 31
- 2 Turbulences dans l'océan p. 36
- 3 Le double jeu des aérosols p. 40
- 4 Un monde d'incertitudes p. 44
- 5 AMY DAHAN DALMEDICO: « Les modèles doivent marier économie et climat » p. 46

1 Le rôle ambigu des forêts

Dresser le bilan des effets des forêts sur le climat? C'est un exercice difficile car il s'agit de mettre en équations la biosphère, de la respiration de la feuille à la migration des espèces végétales. Comment vont-elles réagir au changement climatique?

Nathalie de Noblet-Ducoudré est bioclimatologue au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-UVSQ).
nathalie.de-noblet@lscce.jipsl.fr
En collaboration avec **Jean-Luc Dupouey**, écologue à l'UMR écologie et écophysologie forestières de l'INRA de Nancy.

Un remède, presque une panacée: jusqu'à la fin des années 1990, on a présenté la reforestation comme un moyen de limiter le réchauffement climatique en cours. Dix ans après Kyoto, le discours a quand même changé. Dans son dernier rapport paru en mai dernier, le groupe III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) concluait qu'en 2030 diverses actions sur les forêts, tels le reboisement mais aussi un changement de pratique de la sylviculture, l'utilisation accrue du bois énergie ou de

construction, pourraient permettre d'éviter l'émission de 1,7 à 18,2 milliards de tonnes de CO₂ par an. La fourchette est large, mais l'enjeu est de taille: ces valeurs représentent une part significative du CO₂ émis actuellement chaque année dans le monde, soit 34 gigatonnes. Mais attention: cette estimation du GIEC est un « simple » calcul de flux de gaz à effet de serre, en aucun cas celui d'un potentiel d'atténuation du réchauffement de l'atmosphère, exprimable en degrés. Elle ne le pourrait pas car elle ne considère que l'action des forêts sur la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, ⇨

[1] S. Manabe, *Monthly Weather Review*, 97, 739, 1969.

⇒ en oubliant tous les autres rôles de la forêt dans la machine climatique. En effet, outre le dioxyde de carbone, les milieux forestiers échangent avec l'atmosphère, à tout instant, de l'énergie, de l'eau, de la chaleur et d'autres composés chimiques [fig.1]. Une modification de ces échanges agit sur la circulation de l'atmosphère et par conséquent sur le climat. Or ces interactions impliquant la forêt ne sont pas toutes prises en compte dans les modèles de changement climatique. L'évolution réelle du climat pourrait nous réserver quelques surprises.

Trop d'échelles de temps

Il faut dire que le système qui fait intervenir le sol, la végétation et l'atmosphère est au moins aussi difficile à mettre en équations que les circulations atmosphérique et océanique constituant le cœur des modèles climatiques actuels. D'abord, les échelles de temps à prendre en compte sont extrêmement variées : instantanées pour la photosynthèse et la respiration, annuelles en ce qui concerne la saisonnalité du feuillage et la croissance des arbres. L'échelle atteint le siècle quand il s'agit de migration, d'adaptation génétique et d'interactions entre espèces végétales. Et même le millénaire pour le stockage ou le relargage de carbone du sol. Sans compter que nous devons également intégrer les choix agronomiques des sociétés humaines : modes d'utilisation du sol, niveaux de fertilisation et d'irrigation, type de sylviculture, dates des semis et récoltes, etc.

Intégrer la végétation dans les scénarios climatiques n'a donc jamais été chose facile. La première tentative remonte aux années 1970, quand le Japonais Suki Manabe, alors au laboratoire de géophysique de la

NOAA américaine, construit le premier modèle simple de la surface continentale [1]. Il choisit de représenter le sol comme un seau qui se remplit par les pluies, se vide par évapotranspiration, et déborde s'il est plein. La végétation est prise en compte au travers de deux paramètres : l'albédo, c'est-à-dire la capacité de la surface à réfléchir l'énergie solaire, ce qui permet de quantifier l'énergie absorbée, et la « rugosité », soit l'irrégularité de cette surface. La surface continentale est ensuite découpée en une dizaine de grands types de végétations, ou biomes, auxquels on affecte ces deux caractéristiques. Cette modélisation peut paraître simpliste. Elle est néanmoins encore en vigueur dans un grand nombre de modèles de climat. Son défaut majeur est d'être incapable de prendre en compte un scénario d'évolution, comme l'avènement d'une déforestation par exemple. Cela n'était pas la préoccupation principale à l'époque de Manabe.

Dix ans plus tard, on souhaite avoir une image plus explicite de la végétation. Au début des années 1980, deux équipes américaines, celle de Piers Sellers, de l'université du Michigan, et celle de Robert Dickinson,

de l'université du Minnesota, se focalisent sur deux points essentiels. Premièrement, ils représentent les stomates, ces ouvertures qui se trouvent sur les feuilles et au travers des-

quelles se fait la diffusion de l'eau en direction de l'atmosphère et du dioxyde de carbone vers la plante. Le fonctionnement de ces stomates est mis en équation en utilisant une variable appelée résistance stomatique, dont l'intensité fluctue en fonction des conditions atmosphériques et hydriques, ainsi que de la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Deuxièmement, les équipes intègrent dans leurs modèles la surface dite foliaire – recouverte par les feuilles –, ce qui permet de distinguer une fraction de sol non ombragée, et par là même de différencier l'énergie absorbée par la plante de celle absorbée par le sol. Cette valeur n'est pas calculée, mais fixée dans le modèle pour chaque mois de l'année, dans chaque région du monde et pour chaque type de végétation.

Ces modèles des années 1980 intègrent également une amélioration de la représentation des écoulements de l'eau de pluie. Ils différencient l'eau qui est interceptée par les feuilles et n'atteint pas le sol de celle qui ruisselle directement sans pénétrer dans le sol si les pluies sont trop intenses, mais aussi de celle qui pénètre le sol et sera extraite par les racines. On distingue aussi les forêts des formations herbacées : en moyenne, les premières peuvent puiser l'eau plus profondément dans le sol et comportent plus de feuilles que les secondes. La biosphère est alors perçue par les climatologues comme un milieu à la fois résolument physique et sta-

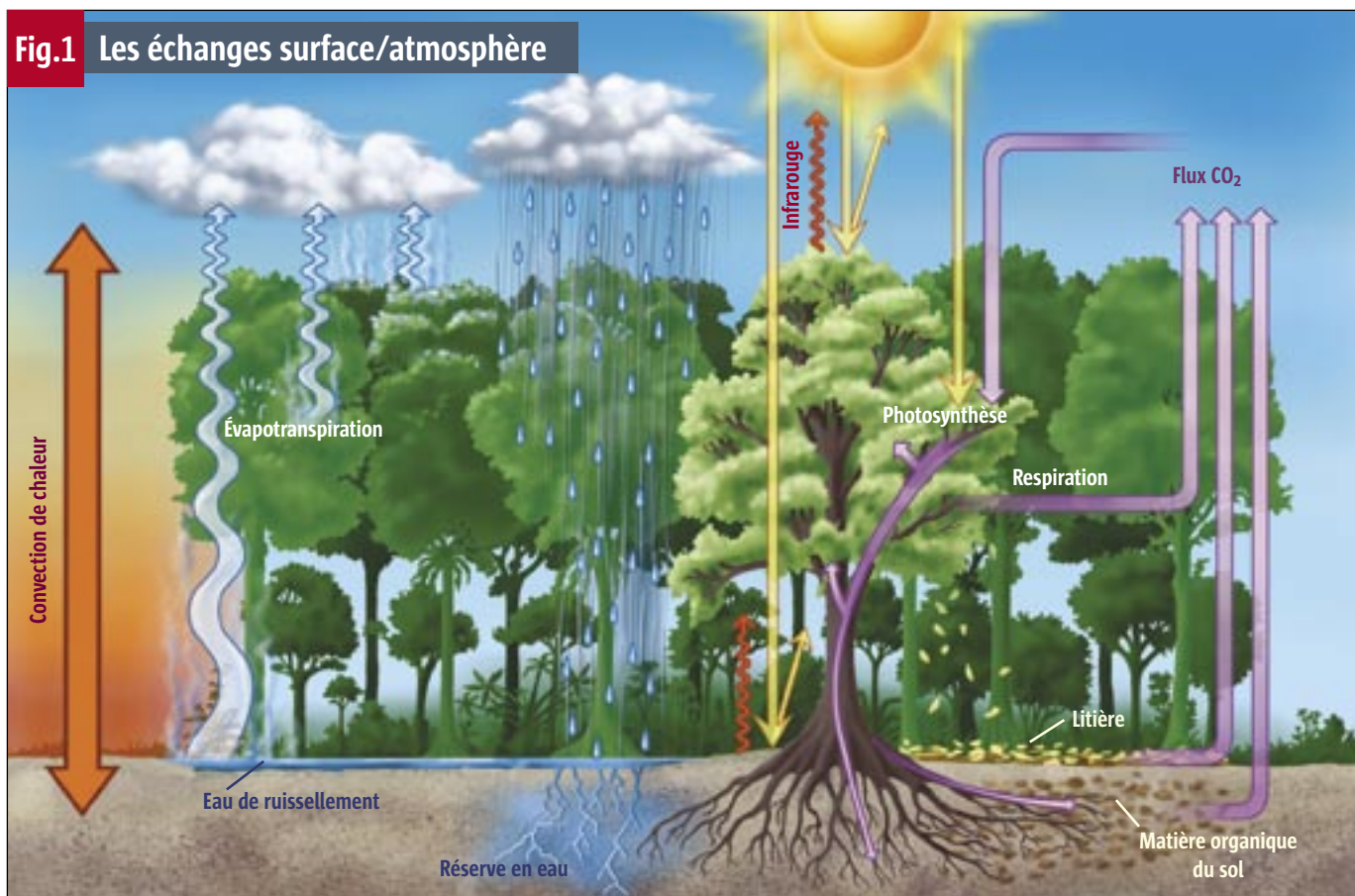
L'évolution de la végétation est absente des premiers modèles, toujours en vigueur

DANS LA RÉGION DE MONTPELLIER, des forêts sont instrumentées afin de mesurer les échanges de dioxyde de carbone entre la surface et l'atmosphère. De tels sites sont rares. Il n'en existe que cinq en France.



© DUNG VO TRUNG/ORIZON

Fig.1 Les échanges surface/atmosphère



LES MODÈLES ACTUELS prennent en compte divers flux entre les surfaces forestières et l'atmosphère. Le carbone de l'atmosphère est fixé dans la végétation par photosynthèse. Il est stocké dans les feuilles, le bois, les racines et le sol. Il est réémis lors de la combustion ou de la décomposition de la matière organique. Les arbres réévalent l'eau de pluie interceptée par les feuilles ou prélevée dans le sol. Les forêts renvoient dans l'infrarouge une partie du rayonnement solaire reçu. Elles transfèrent de la chaleur à l'atmosphère par convection. © INFOGRAPHIE PASCAL PINEAU

tique. Dans ces modèles, aucune plante ne peut réagir aux fluctuations climatiques, que ce soit par un développement de ses feuilles plus ou moins abondant et plus ou moins durable suivant les années, ou, à plus long terme, par l'éventuelle disparition de la plante au profit d'une autre mieux adaptée.

Des plantes qui s'adaptent

Mais au début des années 2000 cette vision commence à changer. Les physiciens introduisent progressivement des cycles biogéochimiques, en particulier celui du carbone, dans leurs modèles. Par exemple en mettant en équation le processus de la photosynthèse qui permet à la plante d'assimiler le dioxyde de carbone. Les calculs intègrent aussi la répartition du carbone absorbé par l'arbre entre les feuilles, les tiges ou les racines. Les plus sophistiqués des modèles simulent une compétition entre différentes plantes. On les appelle les « modèles globaux de la dynamique de la végétation ». Ils simulent l'effet d'un changement climatique en autorisant non seulement des variations temporelles dans les caractéristiques du fonctionnement d'un type de plante donné, mais également le déplacement de ces plantes vers des zones qui leur sont climatiquement plus favorables. Il s'agit là d'un pro-

grès considérable, auquel ont participé plusieurs chercheurs de l'Institut Pierre-Simon-Laplace, qui ont développé le modèle Orchidée [2].

Pour autant, les modèles représentent-ils la réalité de façon fidèle? Au vu du très grand nombre de processus différents qu'ils intègrent, la question de leur validation est cruciale. Il faut bien reconnaître que nous ne possédons encore que peu d'outils pour les alimenter en données précises, *via* l'observation de la dynamique des écosystèmes. Les réseaux d'observation au sol, en particulier les inventaires forestiers permettant d'estimer les croissances et les biomasses, n'existent que depuis quelques petites dizaines d'années, et encore, seulement dans les pays les plus riches de la planète. De plus, ils n'ont pas été conçus pour suivre l'impact des changements climatiques. Un exemple: la phénologie, étude de l'apparition des événements biologiques périodiques déterminés par les variations saisonnières du climat, n'y était pas intégrée. Depuis une quinzaine d'années, des réseaux plus spécialisés sont apparus, mais nous avons encore trop peu de recul, et le nombre de sites est trop petit. Il n'y a par exemple, en France, que 5 stations capables d'effectuer des mesures directes des flux de carbone au-dessus de la couverture des arbres. Évidemment, il y a des ➔

[2] G. Krinner *et al.*, *Global Biogeochemical Cycles*, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.

[3] P. R. Moorcroft et al., *Journal of Theoretical Biology*, 241, 601, 2006.

⇒ mesures aéroportées ou satellitaires effectuées sur une large échelle, mais pour un nombre très limité de paramètres. Elles ne permettent pas, par exemple, de mesurer la croissance des arbres.

Événements extrêmes

Ainsi, les prédictions des modèles de végétation sont encore sujettes à caution. Si la plupart s'accordent pour prédire un déplacement des aires de répartition potentielle des espèces vers des zones aujourd'hui plus froides, les modalités de ces déplacements sont encore très mal connues. Comment s'opérera la disparition des végétaux sur les marges qui deviendront plus chaudes ou plus sèches. Y aura-t-il une acclimatation des espèces ? À quels niveaux de sécheresse ou de chaleur meurt un arbre, et à quelle vitesse ? Quel sera le rôle respectif des incendies et des dépérissements ? Les années 1976 (sécheresse), 1999 (tempête) ou 2003 (canicule et

sécheresse) nous ont montré que les événements extrêmes jouent un rôle primordial dans l'évolution des écosystèmes. Or, ils sont justement mal ou pas du tout représentés dans les scénarios climatiques actuels ! De plus, avant même que des végétaux ne meurent en masse, leurs populations s'affaiblissent sous l'effet des contraintes climatiques et deviennent plus sensibles à d'autres perturbations telles les attaques de pathogènes ou, probablement, les dépôts de particules atmosphériques. Difficile de prendre en compte tous ces éléments dans un même modèle. Certains privilégient l'absence de froid qui affectera la dormance hivernale des arbres. D'autres, les limitations pour cause de sécheresse estivale. Mais les données actuellement connues ne permettent pas toujours de justifier ces choix. Et aucun modèle n'inclut l'effet d'attaques de parasites ou de ravageurs. Or, celles-ci jouent un rôle important dans la dynamique des écosystèmes [3].



À MADAGASCAR, comme dans les zones tropicales, la déforestation est synonyme de réchauffement, car le sol conserve alors l'énergie reçue au lieu de la dissiper par évapotranspiration. © FRANS LANTING/J.H. EDITORIAL

Dans les zones tropicales en revanche, il ne neige pas. L'albédo y joue un rôle minoritaire, comme l'ont montré Édouard Davin et ses collègues du LSCE [2]. La présence continue du feuillage et la température élevée entraînent la permanence du cycle hydrologique en forêt. Ce recyclage continu de l'eau maintient une convection forte au-dessus des forêts et tempère l'assèchement pluviométrique résultant des fluctuations saisonnières de la zone de convergence intertropicale.

Une déforestation dans ces régions affaiblirait la capacité de recyclage de l'eau de pluie et rendrait la saison sèche vraiment très sèche. De plus, la dissipation d'énergie par l'évapotranspiration diminuerait, et le sol émettrait plus de rayonnement infrarouge, réchauffant les basses couches de l'atmosphère.

[1] V. Brovkin et al., *Global Change Biology*, 10, 1253, 2004.

[2] E. Davin et al., *GRL*, 34, L13702, 2007.

RÉCHAUFFEMENT Déforester ? Réfléchir avant d'agir

LA DÉFORESTATION n'est pas forcément synonyme de réchauffement. La forte capacité qu'ont les forêts à absorber le rayonnement solaire, de par leur faible albédo, peut en effet contrecarrer leur fonction « puits de carbone ». Mais tout dépend de la région du monde concernée. Victor Brovkin, de l'Insti-

tut de climatologie de Postdam [1], a calculé que les changements d'usage des sols européens et nord-américains des mille dernières années ont conduit à un refroidissement net de l'hémisphère Nord, malgré le rejet de CO₂ occasionné par la déforestation.

Dans les très hautes latitudes, l'al-

bédo des surfaces est également prépondérant. Quand une toundra remplace une forêt, la surface réfléchit plus de rayonnement, puisque l'albédo augmente de 10 % à plus de 50 %, notamment lorsque la neige commence à tomber. Au Canada ou en Sibérie, une déforestation occasionnerait un refroidissement.

Encore une incertitude: nous ne connaissons pas avec précision le rôle que jouera la diversité génétique dans les interactions climatiques. Dans quelle mesure permettra-t-elle aux écosystèmes en place de se maintenir, malgré le réchauffement? Et surtout quelle sera la vitesse de l'adaptation des populations végétales aux nouvelles conditions environnementales? Nous manquons de connaissances sur les mécanismes de l'évolution, et cela nous a empêchés jusqu'à maintenant d'introduire cette variable clé dans les modèles de changement à long terme de la biosphère.



Un paramètre important et mal déterminé est la taille des zones génétiquement homogènes à prendre en compte. Faut-il considérer chaque espèce comme un large bloc, ou bien comme la juxtaposition d'une multitude de populations, chacune adaptée à des conditions climatiques locales? Loin de ce niveau de détail, la plupart des modèles de dynamique de la végétation, comme le modèle Orchidée du LSCE, ne différencient qu'un tout petit nombre de types de plantes tels les arbres à feuilles ou aiguilles caduques, à feuilles ou aiguilles persistantes et les herbacées. La diversité du vivant y est donc représentée de façon grossière, ce qui peut avoir des conséquences importantes.

Prédictions hasardeuses

Par exemple, quand les modèles projettent les conséquences du changement climatique sur la distribution des grands biomes, ils en concluent que la forêt amazonienne risque de disparaître partiellement, voire totalement, avant la fin du XXI^e siècle, à cause du déficit pluviométrique prévu. La régression de la forêt dans cette région du Globe

aggraverait le climat régional en renforçant la sécheresse prévue. Ce résultat a tenté d'être exploité par des décideurs pour accélérer la déforestation au profit de l'exploitation agricole puisque cette disparition de forêts semble inéluctable! Il est cependant possible que nos prédictions de disparition de la forêt soient erronées car liées à l'absence, dans nos modèles, de variabilité entre les espèces et à l'intérieur d'une même espèce. Un très petit nombre de types d'arbres est en effet utilisé pour représenter la quasi-totalité de l'Amazonie! Cette réduction de la biodiversité à quelques types fonctionnels de

LES SUÉDOIS REPLANTENT chaque année 300 millions de pins sylvestres. Dans ces hautes latitudes ouest-européennes, les calculs montrent qu'une reforestation permet un stockage d'environ 30 tonnes de carbone à l'hectare. Des travaux réalisés par Richard Betts semblent indiquer qu'en Scandinavie l'effet « puits de carbone » l'emporte sur la plus grande absorption de la chaleur générée par ces plantations, contrairement au Canada et en Sibérie où la période d'enneigement est plus longue. © M. PRUNEVILLE/ANA

plantes est une limitation importante des modèles actuels. Il est possible que la forêt soit beaucoup plus résistante et résiliente dans la réalité. Les décisions prises en fonction de nos scénarios doivent donc être précautionneuses.

Et puis il y a l'homme. Il modifie le paysage, et gère de nouvelles

régions ouvertes à la colonisation. L'occupation de ces espaces par certaines espèces dépendra non seulement de leur capacité de dispersion, mais également de l'organisation spatiale des terres aménagées. Peu de modèles incluent ces contraintes, car il faut alors manipuler des représentations explicites des paysages, jusqu'à des grains très fins. Pourtant, dans nos régions, la proportion de haies est, par exemple, un facteur décisif du potentiel migratoire des espèces.

Enfin, comment prendre en compte l'intervention de l'homme sur le milieu forestier pour parvenir à une décision raisonnée? Prenons l'exemple de la forte demande, récente, de bioénergies dans les pays très dépendants du pétrole, du charbon et du gaz. Les forêts des pays industrialisés, en croissance, séquestrent actuellement une part significative des émissions de carbone fossile (17% à l'échelle de la France). Mais ces forêts sont très loin d'être, avec le bois de chauffage, une source majeure d'énergie de substitution (4% de la consommation, en France). Si le bois

énergie était plus utilisé, au prix d'un changement important de l'usage des sols, ne risquerait-on pas de voir les chiffres s'inverser, et la séquestration diminuer? Il

Contrairement à une idée naïve et répandue, le climat est sous fort contrôle

serait alors difficile d'évaluer le rôle des écosystèmes dans le cycle du carbone pendant cette transition.

Ainsi, contrairement à l'idée naïve que nous nous en faisons, le climat est sous fort contrôle biologique. Les incertitudes sur le rôle exact que jouera la biosphère sur son évolution soulignent à nouveau que l'homme serait bien inspiré de tenter de diminuer les émissions de gaz à effet de serre plutôt que d'essayer de stocker ces éléments, une fois produits, dans des compartiments biologiques encore improbables. ■

N. de N.-D.