

Paris, le 21 février 2006

Contribution au débat sur la forêt, source de méthane

Texte coordonné par Jean-Luc Peyron (Ecofor)

Avec la contribution de Michel Badré (Ige), Christian Barthod (Medd), Jean-Claude Bergonzini (ex-Ecofor et Cirad), Damien Bonal (UMR Ecofog), Ingrid Bonhême (Ecofor), Alain Chaudron (Map), Philippe Ciais (Cea), Jean-Pierre Fontelle (Citepa), Jean-Claude Germon (Inra), André Granier (Inra), Olivier Hamel (Cirad), Sandrine Landeau (Ecofor), Guy Landmann (Ecofor), Franck Lecocq (Lef Engref/Inra), Patrice Mengin-Lecreulx (Onf), Serge Rambal (Dream Cefe-Cnrs), Bernard Roman-Amat (Engref), Arthur Riedacker (UMR Cired), Bernard Riéra (Ecofor), Bernard Saugier (Université d'Orsay), Anne Varet (pour l'Afocel), Christophe Voreux (Engref et Rff)¹.

Projet d'article à soumettre par ailleurs pour publication à la Revue forestière française sous le titre : « Forêt et méthane : entre science et politique, expérimentations et extrapolations, objectivité et subjectivité ».

* * *

Le méthane (CH₄) est un gaz à effet de serre qui est dûment pris en compte par la convention cadre sur le changement climatique (1992) et le protocole de Kyoto (signé en 1997, entré en vigueur en 2005) qui en a découlé. S'il n'est présent dans l'atmosphère qu'en relativement faibles quantités, sa concentration atmosphérique a plus que doublé depuis le début de l'ère industrielle et son potentiel de réchauffement global du climat est 21 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone (CO₂). On savait que le secteur agricole était très concerné par le méthane à travers les émissions des ruminants. Les rizières étaient également bien connues pour être d'importantes sources de ce gaz. Le secteur forestier semblait largement à l'écart de cette problématique, hormis par le biais des exhalaisons significatives des termites et à travers les produits de la combustion de la biomasse (incendies de forêt, bois de feu). Des chercheurs travaillant notamment dans le cadre de l'institut Max-Planck d'Heidelberg viennent peut-être de mettre en évidence un phénomène insoupçonné jusqu'alors : **la végétation émettrait des quantités importantes de méthane en conditions aérobies dans le cadre d'un mécanisme encore inconnu mais différant radicalement des processus microbiens anaérobies observés dans les rizières et marécages**. Les premiers résultats de ces recherches viennent d'être publiés le 12 janvier 2006 dans la revue *Nature* par Frank Keppler, John T.G. Hamilton, Marc Brass et Thomas Röckmann (Keppler *et al.*, 2006)

Cette découverte, qui émane de résultats expérimentaux en laboratoire et *in situ*, reste à confirmer ou infirmer. Mais, elle a incité ses auteurs à aller plus loin en

¹ Les contributeurs cités ici et qui doivent être chaleureusement remerciés ne sont pas pour autant engagés par cette note. La soumission de cette dernière sous forme d'article donnera lieu à une identification plus formelle de ceux des contributeurs majeurs qui acceptent de s'engager en tant qu'auteurs.

tendant, par extrapolation, d'en estimer la portée au niveau planétaire. La correction du bilan de méthane qui s'ensuivrait serait conséquente mais, là encore, les chiffres fournis ne constituent qu'une première tentative à vérifier. Enfin, les premiers commentateurs de l'article se sont alors saisis de ces informations pour les mettre en lien avec le rôle dévolu à la végétation, la forêt notamment, en tant que puits de carbone dans la lutte contre l'effet de serre.

L'emballage médiatique autour de cette information a été immédiat. Or, dans de telles circonstances, si le besoin de commentaires et interprétations est patent et urgent, il serait présomptueux et dangereux de prétendre en tirer objectivement, dans l'instant, toutes les conséquences. Cette note vient ainsi après quelques jours de réflexion et de consultation, qui ont permis de recueillir l'avis, dans les divers domaines en cause, de différents experts. Elle a pour objectif de contribuer à la discussion qui s'est développée en réalisant un point critique sur les connaissances actuelles et les nouvelles perspectives dorénavant ouvertes.

Trois questions méritent d'être posées, auxquelles il s'agit d'essayer de répondre :

- quelle est exactement la découverte expérimentale relatée dans *Nature* et quel crédit faut-il lui accorder ?
- quelles modifications du bilan du méthane est-elle censée introduire, selon les résultats de ses auteurs, et que faut-il penser de ces premières estimations ?
- quelles conséquences pourrait-elle avoir dans la lutte contre l'effet de serre ?

Chacune de ces trois questions est considérée de trois points de vue : celui des auteurs de l'article initial, celui des commentateurs qui se sont immédiatement prononcés, celui enfin des experts qui ont été consultés dans le cadre de la rédaction de cette note. Il s'agit ainsi de mettre en évidence le fait que la découverte d'une nouvelle source de méthane au niveau de la végétation doit être considérée avec le sérieux qu'elle mérite mais demande encore à être confirmée, généralisée et expliquée. Par ailleurs, sa quantification au niveau planétaire repose actuellement sur des bases très insuffisantes et vraisemblablement surestimées par les auteurs compte tenu des méthodes utilisées. Enfin, les interprétations des commentateurs et de la presse en matière de conséquences sur les politiques climatiques apparaissent largement dénuées de fondements.

1. La découverte expérimentale

1.1. Selon la publication originale de Kepler *et al.*

Le résultat fondamental publié dans *Nature* est le suivant : les végétaux émettent du méthane, que le matériel végétal soit en croissance ou récolté (organes foliaires), quels que soient les espèces testées, leur nature (plantes herbacées ou arbres), leur origine (tropicale, tempérée) et leur mode de fonctionnement (en C₃ ou C₄)^{2,3}.

² Selon les végétaux, on distingue trois types de photosynthèse : C₃, C₄ et CAM. Chez les arbres, le blé, les plantes herbacées de sous-bois ou encore des régions tempérées à boréales, la photosynthèse produit des composés organiques à trois atomes de carbone, donc en C₃. Pour le maïs et les plantes herbacées de savane, les composés organiques sont à quatre atomes de carbone, donc en C₄. Le type CAM est celui dit du métabolisme acide des crassulacées et correspond à une variante du mode en C₄ et à une activité différée de fixation de CO₂ la nuit.

Le processus précis expliquant cette émission n'a pas été élucidé mais certaines de ses caractéristiques ont été mises en évidence :

- l'émission est environ 100 fois supérieure pour du matériel vivant à sa valeur pour du matériel récolté frais ou sec ; considérée à 30°C pendant une heure et mesurée en nanogrammes par gramme de matière sèche (ng/gms), elle varie de 0,2 à 3 ng/gms pour du matériel récolté et de 12 à 370 ng/gms pour du matériel vivant ;

- elle se produit aussi bien au laboratoire que dans le milieu naturel ; les mesures de laboratoire sur du matériel récolté ont permis de noter qu'elle augmente avec la température en doublant approximativement tous les 10°C ; elle s'accroît également d'un facteur 3 à 5 lorsque le matériel végétal vivant ou récolté est exposé à la lumière du soleil ; elle a lieu en présence d'oxygène ; elle n'est pas modifiée par une stérilisation aux rayons gamma et se produit donc en l'absence de toute activité microbienne ; elle résulterait par conséquent d'un processus physico-chimique dans la plante elle-même, vraisemblablement en rapport avec la photosynthèse. Ce faisant, elle se démarque radicalement des processus de production de méthane à partir de matière organique dans les zones humides, qui caractérisent une activité microbienne en situation anaérobie⁴ ;

- les expérimentations ont été conduites en atmosphère exempte de méthane de manière à mieux mettre en évidence les flux considérés qui, en atmosphère normale, se trouvaient difficilement discernables du méthane présent au sein de celle-ci ;

- les mesures faites sur l'isotope 13 du carbone montrent d'abord qu'il est difficile de distinguer, au dessus des zones humides dont les rizières, les émissions dues aux processus classiques anaérobies de celles issues de la végétation ; de plus, le carbone de ces émissions est très semblable à celui qui constitue la végétation et particulièrement la pectine, ce qui pourrait laisser penser que ce composant structurel des plantes joue un rôle majeur dans le phénomène.

1.2. Les réactions immédiates à cette découverte expérimentale

Les résultats publiés par Keppler *et al.* ont indéniablement surpris. Dans le même numéro de la revue *Nature*, trois commentaires ont été diffusés dont les titres sont éloquentes : « Une découverte de méthane déconcerte les scientifiques », « Comment avons-nous pu manquer cela ? », « Une source d'étonnement environnemental » (Schiermeier et Peplow, 2006 a et b ; Lowe, 2006)⁵. Le journal anglais *The Guardian* sous-titrait par ailleurs son article du 12 janvier sur le sujet par « Les spécialistes du climat choqués par de nouveaux résultats »⁶. Cette surprise tient d'abord au fait que les physiologistes n'avaient jamais envisagé une telle émission dans la mesure où l'on ne connaît aucun processus métabolique de fabrication du méthane. Elle

³ Les informations supplémentaires communiquées par les auteurs contiennent les noms de 20 espèces dont dix en C₃ des régions tempérées et les autres des régions tropicales à raison de sept en C₃ (espèces cultivées et ornementales) et trois en C₄ (espèces cultivées). Quatre espèces d'arbres (tempérés) figurent dans la liste : le Frêne commun (*Fraxinus excelsior*), le Hêtre (*Fagus sylvatica*), l'Erable plane (*Acer platanoides*) et l'Épicéa commun (*Picea abies*).

⁴ Deux réactions de réduction (au sens chimique du terme) sont habituellement citées pour expliquer la production de méthane à partir de matière organique : la réduction, par l'hydrogène, du dioxyde de carbone CO₂ en méthane CH₄ et la réduction acétoclastique qui transforme l'acétate en gaz carbonique et méthane.

⁵ Les titres correspondants en anglais sont : « Methane finding baffles scientists » ; « How could we have missed this ? » ; « A green source of surprise ».

⁶ Le titre anglais est « Climate scientists shocked by new findings ».

s'explique aussi par la mauvaise connaissance du devenir atmosphérique du méthane, selon Yadvinder Malhi, cité par le journal *The Guardian* du 12 janvier. Elle provient enfin de ce que le mécanisme de ces émissions n'a pas été élucidé. Ce manque explique que, pour certains, la surprise se soit mue en scepticisme (Colin Prentice cité par Schirmeier et Pelow, 2006 b).

Cependant, tout en avouant leur étonnement, nombreux sont ceux qui ont admis une telle émission possible et en ont envisagé quelques conséquences aussi bien du point de vue du bilan de méthane que de l'effet de serre (voir plus loin). Ils prennent alors la précaution de s'exprimer au conditionnel ou de se placer explicitement dans l'hypothèse où la découverte serait confirmée.

1.3. Que faut-il penser de cette découverte expérimentale ?

Il faut noter tout d'abord que les résultats qui ont été publiés dans *Nature* émanent de chercheurs reconnus issus d'instituts réputés. La revue qui les a accueillis est extrêmement sélective et agit après avis d'un comité de lecture de haut niveau. Certes, quelques exemples montrent que cette barrière n'est pas toujours suffisante ; par ailleurs, la recherche d'un effet médiatique peut troubler quelque peu la rigueur attendue. Mais il faut considérer, *a priori*, que la découverte révélée ici est digne d'un grand intérêt. Cette affirmation ne doit toutefois pas empêcher de poursuivre les investigations susceptibles de la confirmer ou de l'infirmer.

Les analyses expérimentales qui ont été réalisées portent sur plusieurs types de matériels : organes foliaires et rameaux récoltés, plantes testées au laboratoire, plantes testées *in situ*. Certaines n'ont été réalisées que sur un type de matériel, d'autres sur plusieurs. Les auteurs tendent à admettre que ce qui a été trouvé sur un type de matériel est extrapolable aux autres. Ceci peut poser problème dans la mesure où, par exemple, les émissions constatées sur matériel récolté sont d'un ou deux ordres de grandeur inférieures à celles relatives à des plantes en croissance. Ainsi, l'évolution des émissions avec la température a été obtenue sur du matériel récolté, mais la température à laquelle les observations ont été conduites sur les plantes vivantes n'est pas fournie.

Une interrogation plus sérieuse que les limites précédentes pourrait être formulée : puisque les mesures ont été conduites en atmosphère initialement exempte de méthane, ces conditions particulières n'ont-elles pas une influence directe sur le processus observé lui-même ?

Quelque sérieuses que puissent paraître les expérimentations réalisées par Keppler *et al.*, il est clair que les résultats obtenus doivent maintenant être confirmés et cautionnés par l'ensemble de la communauté scientifique concernée. Pour cela, trois pistes doivent être suivies en parallèle :

- l'extension des analyses à d'autres espèces végétales que celles qui ont été testées jusque là ;

- la réalisation de mesures de flux de méthane en conditions naturelles, de manière à voir si des émissions peuvent être mises en évidence et mesurer leur importance ; par exemple, alors que les sites-ateliers forestiers ou agricoles, lourdement instrumentés, jaugent essentiellement dans l'atmosphère les flux de

carbone associés au dioxyde de carbone, une instrumentation pourrait être ajoutée vis-à-vis du méthane⁷ ;

- la recherche des mécanismes explicatifs en l'absence desquels il sera difficile de conclure définitivement ; une réflexion commune sur les différentes hypothèses en cause pourrait s'organiser entre les spécialistes des diverses disciplines potentiellement concernées de manière à parvenir collectivement, méthodiquement et rapidement au but.

2. Quelles conséquences pour le bilan du méthane ?

2.1. Selon la publication de Keppler et al.

A partir de leurs résultats expérimentaux, les auteurs ont voulu passer à l'échelle planétaire pour voir ce que leur découverte pouvait changer au bilan de méthane qui est encore caractérisé par plusieurs zones d'ombre et de grandes incertitudes. Deux aspects les intriguaient plus particulièrement. Tout d'abord, l'observation récente de quantités surprenantes de méthane au-dessus des forêts tropicales. Ensuite, le fait que des carottes glaciaires montrent des évolutions encore inexplicables de la concentration de méthane en liaison avec l'augmentation de température au cours de périodes interglaciaires. L'intuition que leur découverte pouvait apporter des explications à ces questions les a conduits à un exercice d'extrapolation de leurs résultats expérimentaux à l'ensemble de la végétation mondiale. Tout en attirant l'attention des lecteurs quant au caractère exploratoire des estimations produites, ils ont été amenés à faire des hypothèses dont les suivantes :

- les résultats obtenus en laboratoire et *in situ* sont représentatifs du fonctionnement de la biomasse foliaire à l'échelle planétaire ; en particulier, les émissions de méthane par unité de matière sèche des plantes adultes (dont les arbres) sont équivalentes aux émissions de méthane par unité de matière sèche observées sur les échantillons ;

- les émissions peuvent être reliées à l'assimilation nette des végétaux (ou encore à la production de matière sèche) et varient selon le type de biome⁸, la durée de la saison de végétation et la durée journalière moyenne d'ensoleillement.

Les auteurs reconnaissent que ces extrapolations négligent la complexité des écosystèmes terrestres et la variabilité de l'insolation. Mais il leur paraît nécessaire d'évaluer, même grossièrement, les conséquences des émissions découvertes au niveau global. Sur la base de leurs hypothèses, ils quantifient les émissions de méthane concernées, pour la biomasse à hauteur de 149 MtCH₄/an (millions de tonnes de méthane par an), moyenne que les auteurs estiment comprise à l'intérieur d'un intervalle de confiance de 62 à 236 MtCH₄/an. Pour la litière, les émissions sont nettement plus faibles : estimées en moyenne à 3 MtCH₄/an, elles seraient approximativement comprises entre 0 et 7 MtCH₄/an. Ces émissions se répartiraient à raison de plus de la moitié pour les forêts tropicales, de 20% pour les savanes et prairies tropicales, de 16 % pour les autres forêts boréales, tempérées ou

⁷ Notons qu'un tel équipement était prévu depuis quelque temps sur le site Guyaflux de Guyane, mais n'a pu encore recevoir de financement.

⁸ Les types distingués dans l'article sont les suivants : forêts tropicales, forêts tempérées, forêts boréales, formations arbustives méditerranéennes, savanes et prairies tropicales, prairies tempérées, déserts, cultures.

méditerranéennes. Elles représenteraient 10 à 30 % des émissions totales de méthane, estimées à environ 600 MtCH₄/an. Après conversion en masse de carbone émis par hectare et par an (à raison de 0,75 gramme de carbone par gramme de méthane⁹), elles représenteraient en moyenne 1,8 ‰ et, pour les forêts tropicales, 2,7 ‰ de l'assimilation nette de carbone¹⁰ (ce rapport n'est pas fait dans l'article original mais s'en déduit aisément).

Sur ces bases, les auteurs s'attachent alors à commenter les ordres de grandeur obtenus par rapport à ce qu'on savait jusque là du bilan du méthane. La connaissance de ce dernier est relativement approximative. Selon certaines estimations, il y aurait place pour une source supplémentaire, dont le niveau devrait toutefois rester inférieur à celui trouvé ici, de manière à maintenir le bilan approximativement équilibré. Les auteurs expliquent que les émissions qu'ils ont quantifiées au niveau global pourraient être partiellement redondantes par rapport à ce que l'on savait déjà du bilan du méthane. En effet, du fait de la possible confusion entre le méthane issu de la végétation et celui provenant des zones humides, certaines émissions auraient pu être classifiées à tort comme d'origine microbienne anaérobie alors qu'elles émanaient pour partie du processus aérobie venant d'être découvert. La nouvelle estimation ne devrait donc pas être intégralement ajoutée aux sources quantifiées jusque là qui, pour partie, devraient être réparties entre les deux natures d'émission.

Les auteurs remarquent également que leurs évaluations sont compatibles avec la dimension de la poche de méthane trouvée récemment au-dessus des forêts tropicales. Ils ajoutent qu'elles pourraient même, du fait de la déforestation tropicale, expliquer aussi le fléchissement, observé depuis quelques années, de l'augmentation de la concentration de méthane dans l'atmosphère.

2.2. Les réactions immédiates par rapport au bilan de méthane

Le résultat annoncé par les auteurs, à savoir que les émissions de méthane dues à la végétation représenteraient 10 à 30 % des émissions totales de méthane, participe de la surprise des scientifiques, déjà signalée précédemment, dans la mesure où il s'agit d'une source qui est loin d'être négligeable.

Si le résultat des estimations globales a souvent été repris tel quel, il a peu été critiqué. L'article d'Hervé Morin paru dans le journal *Le Monde* dès le 13 janvier cite néanmoins les propos de Bernard Saugier qui se dit « intéressé » par les mesures de laboratoire mais « agacé par leur extrapolation sommaire à la biosphère tout entière ». Une réaction rapide de l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO, 2006) mentionne également à ce sujet que « transposer et extrapoler des résultats obtenus dans des pots sur de petits échantillons, des semis et sur seulement une espèce d'arbre¹¹ à l'ensemble des forêts et à d'autres biomes

⁹ La masse atomique du carbone est 12 et celle de l'hydrogène 1 ; ainsi, une quantité donnée de méthane CH₄ contient du carbone à raison de 12/16^{èmes} de sa masse, soit encore 75%.

¹⁰ Les émissions de méthane sont estimées par Kepler *et al.* à 152 MtCH₄/an soit encore 114 MtC-CH₄/an. L'assimilation nette (ou production primaire nette) est quant à elle estimée à 62 GtC-CO₂/an. Le rapport entre ces deux grandeurs vaut 1,8 ‰. Pour les seules forêts tropicales, les chiffres correspondants sont 80 MtCH₄/an soit encore 60 MtC-CH₄/an pour les émissions de méthane tandis que l'assimilation nette est estimée à 22 GtC-CO₂/an : le rapport vaut alors 2,7 ‰.

¹¹ En réalité, il aurait fallu dire non pas « une espèce d'arbre » mais « quelques espèces d'arbres ».

n'est pas une « première estimation » valide, mais au mieux une hypothèse qui devrait être testée »

En réalité, la plupart des commentateurs sont directement passés de l'existence possible d'une nouvelle source de méthane à ses conséquences en matière de lutte contre l'effet de serre. Mais ils ont peu discuté les extrapolations faites au niveau planétaire que les auteurs demandent à considérer avec précaution et dont eux-mêmes n'ont peut-être pas bien apprécié toutes les insuffisances.

2.3. Que faut-il penser des extrapolations au bilan global du méthane ?

Il faut d'abord remarquer que la révélation d'une source nouvelle de méthane permettrait d'expliquer différemment l'évolution de la concentration atmosphérique en méthane sans modifier celle-ci qui est mesurée par ailleurs. Seuls les flux de méthane sont donc en cause, à l'exclusion des stocks.

Cette remarque étant faite, les extrapolations réalisées par les auteurs sont fondées sur des hypothèses qu'il importe de critiquer assez strictement. Tout d'abord, les expérimentations réalisées sont-elles vraiment représentatives du fonctionnement de la biomasse foliaire à l'échelle planétaire ? On peut en douter pour plusieurs raisons :

- une grande partie des expérimentations ont été faites sur du matériel récolté dont le comportement est forcément très différent de celui des plantes vivantes, ce qu'il faut considérer d'autant plus qu'on ne connaît pas précisément le processus dont on observe les résultats ;

- les plantes vivantes qui ont été testées n'étaient que de petits spécimens ; à titre d'exemple, les chambres utilisées pour contrôler les paramètres atmosphériques avaient une capacité de 200 litres et un diamètre de 63 centimètres ; les arbres étudiés ne pouvaient être que de dimension réduite ; là encore, est-il légitime de postuler que des résultats obtenus sur de jeunes arbres s'appliquent de la même façon à l'ensemble de la couverture boisée ?

- les plantes vivantes étudiées sont en nombre très limité, une vingtaine d'espèces au total, dont seulement quatre espèces d'arbres tempérés ; comment dès lors extrapoler valablement les résultats obtenus sur ce faible nombre d'espèces à l'ensemble des biomes de la planète, en faisant de surcroît huit catégories ? comment obtenir des résultats valables en forêt tropicale alors qu'aucune espèce tropicale d'arbre ne figure dans la liste des espèces utilisées ? globalement, c'est un plan d'échantillonnage qui fait ici cruellement défaut ; en son absence, les estimations réalisées ne peuvent être dignes de confiance et sont essentiellement des conjectures.

Selon la seconde hypothèse des auteurs, les émissions pourraient être reliées à l'assimilation nette et donc à la production de matière sèche. Or, s'ils ont bien exprimé leurs résultats expérimentaux en masse de méthane rapportée à la masse de matière sèche, ils ne semblent pas avoir testé ce lien entre ces deux grandeurs¹². De plus, l'extrapolation réalisée par Keppler *et al.* s'est faite sur la base de la surface de chaque biome alors qu'elle aurait pu être faite en référence à la productivité¹³. La

¹² Commentaire notamment de Bernard Saugier.

¹³ Remarque de Philippe Ciais.

méthode d'extrapolation ne peut dès lors qu'apparaître sujette à caution. En outre, les variations supposées des émissions de méthane selon la saison de végétation et la durée journalière moyenne d'ensoleillement ne sont modélisées que de façon extrêmement fruste, ce que reconnaissent d'ailleurs les auteurs.

De cette critique des hypothèses, il résulte que la marge d'erreur sur les résultats annoncés est sans doute bien supérieure à celle qui est fournie. De premiers calculs alternatifs semblent aller dans ce sens. Ils ne sont pas forcément beaucoup plus fiables que ceux de Keppler *et al.* mais pourraient bien l'être tout autant :

- Bernard Saugier a fait des calculs simples sur une base différente en estimant la biomasse de feuilles de la biosphère¹⁴, et en la multipliant par le flux moyen de méthane par unité de biomasse trouvé dans l'article ; il arrive à un résultat de seulement 20 MtCH₄/an au lieu de 62 à 236 MtCH₄/an selon Keppler *et al.*

- Philippe Ciais et son équipe ont également fait une extrapolation en reprenant les chiffres de Keppler *et al.* mais en utilisant le modèle global ORCHIDEE de la productivité des écosystèmes ; ils ont trouvé le même résultat que Bernard Saugier, à savoir 20 MtCH₄/an.

La similitude de ces deux résultats ne signifie pas pour autant qu'ils soient proches de la réalité. Mais ils tendent à montrer que les évaluations de Keppler *et al.* sont surestimées, peut-être d'un facteur 10.

L'analyse du bilan global du méthane fournit par ailleurs d'autres raisons pour lesquelles des émissions de ce gaz par la végétation pourraient avoir été manquées. Ce bilan est en effet tout d'abord très incertain. Dans son commentaire de l'article de Keppler *et al.*, Lowe (2006) rappelle les intervalles dans lesquels le rapport 2001 du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du climat situait d'une part les sources de méthane, entre 500 et 600 MtCH₄/an, d'autre part les puits, entre 460 et 580 MtCH₄/an. Si l'on admet que les émissions mises en évidence par Keppler *et al.* ont été surestimées lors de leur quantification au niveau planétaire, on voit qu'elles pourraient être comprises dans les marges d'incertitude du bilan global de méthane. En outre, bien que potentiellement importantes au niveau planétaire, les émissions considérées seraient beaucoup plus diffuses que la plupart des autres sources de méthane : les rizières émettent de l'ordre de 400 kg de méthane par ha ; or, en reprenant les chiffres de Keppler *et al.*, les forêts tropicales n'en émettraient que 34, et 7 pour les autres forêts¹⁵ : ces chiffres seraient évidemment d'autant plus faibles que les estimations de Keppler *et al.* s'avèreraient surestimées.

¹⁴ Une végétation bien développée a une biomasse foliaire d'environ trois tonnes de matière sèche par hectare ; d'après les mesures satellitaires d'indice de végétation, on peut estimer le recouvrement moyen à environ un tiers du recouvrement maximal, ce qui donne une biomasse foliaire moyenne d'une tonne de matière sèche par hectare. Sur une surface continentale de 15 milliards d'hectares (y compris Antarctique et Groenland), la biomasse foliaire de la planète serait de 15 milliards de tonnes de matière sèche. Considérant que les émissions de méthane sont de l'ordre de 300 nanogrammes par gramme de matière sèche et par heure mais qu'elle ne sont efficaces que la moitié du temps, on obtient 150 x 24 x 365 x 15 tonnes de méthane par an, soit encore environ 20 millions de tonnes de méthane par an.

¹⁵ Calculs effectués à partir des données d'émission de méthane publiées par Keppler *et al.* (2006) et des données de surfaces tirées par Riedacker (2004) du WGBU, Conseil consultatif scientifique allemand sur les changements écologiques globaux (WGBU)

A ce stade, il convient aussi de signaler que le puits de méthane dans les sols, s'il apparaît dans le bilan global repris par Lowe (2006), entre 10 et 44 MtCH₄/an, n'est mentionné ni par les auteurs, ni par les autres commentateurs. Or les quantités fixées ne sont pas négligeables et pourraient être du même ordre de grandeur que les émissions par la végétation, si la surestimation des évaluations globales de Keppler *et al.* se confirme. Deux études réalisées en forêt tropicale humide ont par exemple estimé la fixation de méthane à hauteur de 3,2 kg de méthane par hectare (Kiese *et al.*, 2003 ; Butterbach-Bahl *et al.*, 2004).

En ce qui concerne les recherches, on a déjà vu que des dispositifs de mesure du méthane devaient être envisagés dans un certain nombre de sites-ateliers où les flux de dioxyde de carbone sont déjà mesurés. Ces mesures permettraient non seulement de vérifier la réalité du phénomène mais également de le quantifier et d'obtenir les valeurs d'émissions pour quelques écosystèmes. A partir de là, il serait alors possible de préciser le bilan global de méthane. Par ailleurs, le risque de doubles comptes est évoqué par les auteurs et pourrait pousser à reconsidérer la nomenclature des différentes sources de méthane de manière à mieux distinguer les origines, anaérobies ou aérobies¹⁶.

3. Quelles conséquences pour la lutte contre l'effet de serre ?

3.1. Les réactions immédiates par rapport à l'effet de serre

Le méthane possède un fort pouvoir de réchauffement global. Evalué sur une période 100 ans, il est 21 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone¹⁷. Voilà pourquoi les nombreux commentaires de l'article de Keppler *et al.* se sont intéressés aux conséquences, sur l'effet de serre, de la découverte d'émissions de méthane par la végétation. Les spéculations qui se sont déroulées à partir de là provenaient de l'importance de la modification introduite par Keppler *et al.* dans le bilan de méthane. Mais elles sont généralement restées peu argumentées.

Lowe (2006), de l'institut néo-zélandais de physique et chimie troposphériques affirme abruptement, dans son commentaire sur l'article de Keppler *et al.*, que « *nous voyons à présent apparaître la possibilité que de nouvelles forêts accroissent l'effet de serre en émettant du méthane au lieu de le réduire en fixant du CO₂* ». Il ajoute que des moutons et les prairies qu'ils parcourent émettent peut-être moins de méthane que les forêts qui ont été défrichées au profit des prairies, suggérant finalement, dans l'esprit du lecteur, qu'il peut être écologiquement bon de défricher !

D'autres réactions, plus prudentes et moins catégoriques, conduisent à s'interroger sur les conséquences que ces émissions pourraient avoir en termes de réchauffement climatique compte tenu de l'augmentation, avec la température, de la productivité des écosystèmes comme des émissions elles-mêmes de méthane. C'est le cas de Johannes Lelieveld de l'institut Max-Planck pour la chimie à Mayence, cité par Schiermeier et Peplow (2006 a).

¹⁶ Suggestion faite notamment par Philippe Ciais et Philippe Bousquet (Cea) dans une déclaration publiée par *Le Monde* du 13 janvier

¹⁷ Sur 20 ans, ce pouvoir de réchauffement global passe à 62 fois celui du dioxyde de carbone ; mais c'est en général la référence sur 100 ans qui est utilisée. Source : rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat pour 2001.

Dès le 11 janvier, l'Agence France-Presse émettait un communiqué sous le titre « la végétation contribuerait au changement climatique ». Le même jour, le *Financial Times* titrait « Prenez-garde à la façon dont vous considérez le changement climatique »¹⁸. *Le Monde* du 13 janvier était plus prudent et remarquait surtout que « la végétation émet de grandes quantités de méthane, puissant gaz à effet de serre ».

3.2. La position des auteurs face à l'effet de serre

Les auteurs, quant à eux, avaient noté le rôle particulier du méthane vis-à-vis de l'effet de serre, mais, curieusement, avaient plutôt insisté sur l'importance de leur découverte vis-à-vis de l'évolution du climat passé que sur celle du climat futur. Dans leur conclusion, cependant, ils envisageaient eux aussi le risque d'emballement que le changement climatique pourrait faire craindre. Ils se sont en réalité trouvés rapidement dépassés par les commentaires sur ce sujet, notamment par ceux dénigrant les programmes de reboisement au motif que la végétation renforcerait l'effet de serre. C'est ainsi qu'ils ont été amenés à publier un communiqué intitulé « Réchauffement global : la végétation n'est pas à blâmer » (Röckmann *et al.*, 2006). Ils y insistent sur le fait que les émissions de méthane par la végétation sont un phénomène naturel qui était présent bien avant l'influence de l'homme. Ils y indiquent également que l'ampleur du processus qu'ils ont révélé modifie, certes, le bilan global de la forêt vis-à-vis de l'effet de serre, mais pas de manière suffisante pour le remettre en cause. Leur calcul est le suivant : l'assimilation nette de carbone par la végétation mondiale est de l'ordre de 62 milliards de tonnes par an, soit 227 milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an¹⁹. Mais sur cette masse, la moitié est perdue dans des phénomènes de court terme (décomposition des feuilles et des racines). Sont donc fixés à long terme environ 114 milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an. Les émissions de méthane par la végétation sont quant à elles estimées par Keppler *et al.* entre 62 et 236 millions de tonnes de méthane, dont le pouvoir de réchauffement global est équivalent à 1 à 5 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (après multiplication par le pouvoir de réchauffement global égal à 21 tCO₂/tCH₄). L'effet méthane ne serait donc que 1 à 4 % de la fixation de dioxyde de carbone.

3.3. Que faut-il penser des conséquences de cette découverte vis-à-vis de l'effet de serre ?

Au plan de l'effet de serre, les remarques faites par les auteurs vont dans le bon sens. Si elle est confirmée, l'émission de méthane par la végétation est un phénomène naturel qui participe sans doute de l'effet de serre mais pas de son renforcement du fait de l'homme, qui seul doit être combattu. On peut en effet considérer qu'en l'absence d'activités humaines néfastes, la planète évoluerait au gré des variations naturelles du climat, en relatif équilibre avec sa biosphère et son atmosphère. Ainsi, dans le domaine des polluants, le fait qu'il existe des sources naturelles n'est pas un réel problème et ne doit surtout pas être un prétexte à ne pas agir sur les sources anthropogènes. Par ailleurs, la même logique s'exerce aussi

¹⁸ Titre anglais : Beware how you meddle with climate change.

¹⁹ La masse atomique du carbone est de 12, celle de l'oxygène de 16. Avec 12 grammes de carbone, on peut donc obtenir 12 + 16 + 16 = 44 grammes de dioxyde de carbone. Pour passer d'une masse de carbone à une masse de dioxyde de carbone la contenant, il faut donc effectuer une multiplication par 44/12

bien en matière de puits que de source puisqu'on ne prend pas non plus en compte certains puits forestiers de gaz à effets de serre lorsqu'ils sont naturels.

L'intégration d'une nouvelle source modifie la donne mais ne change pas forcément le sens des résultats, pas plus que la respiration des végétaux ne vient empêcher la photosynthèse d'être le phénomène dominant. Pour y voir plus clair, il faut d'abord élargir le champ des investigations et prendre en compte toutes les composantes de l'effet de serre compte tenu de leur poids respectif, comme l'a bien fait remarquer Jean-François Soussana, directeur de recherches à l'INRA de Clermont-Ferrand, dans une déclaration publiée par *Le Monde* du 13 janvier. Il y a, dans cette affaire, de multiples effets dont certains s'enchaînent, d'autres se neutralisent. On ne peut donc conclure sans que des analyses approfondies et suffisamment globales soient conduites. En première approximation, retenons le calcul qui a été réalisé a posteriori par les auteurs eux-mêmes et qui montre que les émissions de méthane ne représenteraient qu'une faible fraction de la séquestration réalisée par ailleurs par la même végétation. Mais en outre, il faut d'une part garder en mémoire la possibilité d'une surestimation des émissions globales de méthane, d'autre part tenir compte aussi de la fixation de méthane par les sols, également mentionnée plus haut.

La possibilité d'un emballement de l'effet de serre du fait de ces émissions de méthane, évoquée par les auteurs mais aussi par Lelieveld (Schiermeier et Peplow, 2006), semble sujette à caution. En effet, en septembre dernier, Ciais et de nombreux collègues publiaient un article, également dans *Nature*, axé sur la réduction de productivité des écosystèmes à la suite de la sécheresse de 2003 en Europe et du risque de moindre captation nette future de carbone par la végétation dans un climat pour lequel les sécheresses seraient de plus en plus fréquentes (Ciais *et al.*, 2005). Dans cette hypothèse, le réchauffement du climat, du fait des événements extrêmes venant compenser les tendances, n'entraînerait pas forcément une poursuite de l'augmentation moyenne de la productivité qui finirait par stagner puis décroître. Selon les hypothèses de Keppler *et al.*, les émissions de méthane évolueraient alors de même sous réserve que la durée de la saison de végétation et celle de l'ensoleillement journalier, deux autres facteurs semblant intervenir dans la stimulation des émissions de méthane, ne soient pas trop largement modifiées par le réchauffement climatique.

Pour aborder plus complètement encore la question du rôle de la forêt dans la lutte contre l'effet de serre à la lumière de la situation nouvelle qui vient de se faire jour, il faut envisager l'ensemble des possibilités qui relèvent de quatre grandes raisons :

- le boisement ou reboisement de zones initialement non boisées fixe bel et bien du carbone ; la masse anhydre du bois est constituée pour moitié environ de carbone et la forêt favorise aussi l'accumulation du carbone dans les sols, sinon par rapport aux prairies ou friches dont elle est approximativement l'égale, du moins par rapport aux terres cultivées ; dans ces conditions, l'existence d'une source supplémentaire de méthane viendrait limiter quelque peu le caractère favorable du bilan, mais ne remettrait pas fondamentalement en cause le bien-fondé des boisements et reboisements, comme le montrent les indications chiffrées sommaires qui ont été réalisées par les auteurs et fournies ci-dessus ;

- la gestion forestière permet également d'accroître, au moins pendant un certain temps, le stock de carbone en forêt, par exemple en maintenant la récolte à un niveau inférieur à celui de la croissance ligneuse ou encore en renforçant la

résistance et la protection des peuplements vis-à-vis des aléas ; comme pour le boisement ou reboisement, l'existence d'une nouvelle source de méthane viendrait réduire le bénéfice escompté de ces mesures ; en outre, la défense des forêts contre l'incendie (DFCI) permet non seulement de limiter la libération de dioxyde de carbone mais encore d'éviter les émanations de méthane dues à la combustion de biomasse ;

- la prise en compte des produits forestiers dans la comptabilité du carbone est à l'ordre du jour et des discussions dans le cadre du protocole de Kyoto et de l'après 2012 ; en effet, dans bien des cas, la production d'un produit en bois consomme moins d'énergie fossile que le même produit réalisé dans un autre matériau ; de plus, l'utilisation énergétique du bois, directement ou, mieux encore, à partir de produits en fin de vie, fait également économiser des ressources fossiles ; au gain qui résulte d'une substitution entre énergie renouvelable et ressources fossiles, s'ajoute l'augmentation du temps de résidence du carbone dans le bois, sur pied ou récolté et mis en oeuvre ; à ce niveau, la considération du méthane inciterait essentiellement à vérifier que les émissions de ce gaz, lors des utilisations énergétiques du bois, sont soit négligeables, soit maîtrisées pour l'essentiel ;

- enfin, la temporalité des flux de gaz est importante dans l'analyse de l'effet de serre et de la lutte contre son renforcement ; les mesures précédentes n'ont un impact que tant qu'il apparaît possible de continuer à boiser ou reboiser, à améliorer la gestion forestière, à augmenter l'utilisation, la durée de vie et le recyclage des produits en bois ; cependant, il reste en ces domaines des marges considérables de progrès, pour plusieurs décennies, voire siècles ; durant cette période, et en attendant que la réduction des émissions d'origine anthropique soit effective, la forêt constitue un instrument intéressant de lutte contre l'effet de serre ; au-delà de cette période, la situation serait celle d'un long terme caractérisé par un stockage de carbone relativement stable dans le secteur forestier et plus aucune disponibilité de terrains à boiser : la fixation de carbone équilibrerait alors les émissions ; mais le résultat ne serait pas neutre pour autant : il resterait le gain obtenu en substituant du bois à des matériaux ou énergies dont la production épuise les ressources fossiles, si celles-ci sont encore en exploitation à cette époque...

Enfin, l'existence de cette source nouvelle de méthane ne remet pas cause, loin de là, la stratégie d'action élaborée jusque là dans le cadre d'un processus international qui a d'emblée été conçu de manière évolutive et qui, n'en doutons pas, intégrera dans ses analyses le nouvel état de la connaissance, s'il y a lieu. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) y aura sans doute un rôle important à jouer.

Conclusions

La découverte d'émissions de méthane par la végétation en croissance et, dans une moindre mesure, par les litières devra d'abord être confirmée. Si elle est bien avérée, ses conséquences sur le bilan planétaire du méthane devront être quantifiées avec soin, tant il semble que les premières estimations fournies par Kepler *et al.* soient sujettes à caution et vraisemblablement surestimées. Quant à ses conséquences vis-à-vis de la lutte contre l'effet de serre, il semble aujourd'hui clair qu'elles ont fait l'objet d'analyses bien trop rapides. Il existe bien un vrai bénéfice à stocker du carbone dans les arbres et les sols forestiers, ainsi qu'à utiliser des énergies renouvelables comme la biomasse plutôt que des combustibles fossiles.

Sur tous ces points, les travaux futurs devront être conduits dans l'esprit :

- d'élargir le champ des systèmes analysés en englobant les cycles du méthane et du gaz carbonique, voire d'autres composés carbonés, en associant la forêt à la filière-bois, voire à l'extraction et à la consommation d'énergies fossiles, en cherchant à apprécier des tendances corrigées des événements extrêmes ;

- de prendre des décisions sur la foi d'analyses globales et approfondies, ne se contentant pas d'opposer un phénomène à un autre mais tentant de mesurer chacun d'eux et d'en déterminer la résultante ;

- enfin de distinguer le court terme du long terme et d'apprécier le rôle de chacune de ces périodes au regard des objectifs poursuivis.

Cette analyse montre bien la difficulté des relations entre science, médias et politique. A partir de résultats expérimentaux classiques, des évaluations sont tentées au niveau planétaire, qui sont reprises par d'autres chercheurs et la presse comme des résultats scientifiques pour venir étayer, sans argumentation valable, des positions qui ressemblent fort à des a priori. Le message le plus vulgarisé apparaît alors erroné et oblige à faire des mises au point dont la portée risque cependant d'être moins grande, une fois passé l'effet de nouveauté. La réaction des auteurs de la découverte constitue l'une de ces mises au point. Cette note en tient également lieu.

Références bibliographiques

Butterbach-Bahl K, Kock M, Willibald G, et al.(2004). Temporal variations of fluxes of NO, NO₂, N₂O, CO₂, and CH₄ in a tropical rain forest ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles* 18: Art. No. GB3012.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann M., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., de Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Gründwald T., Heinesh B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E.D. Vesala T., Valentini R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, n°437, 22.09.2005, pp. 529-533.

FAO, 2006. Methane emissions from forest ecosystems enhance global warming ? Comments on Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions (*Nature* n°439 : 187-191). Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation, CKIM-FO-L No. 01/2006.

Garrec J.-P., 2000. Changement de concentration atmosphérique des gaz à effet de serre. *Revue forestière française*, n°sp. 2000, pp. 15-20.

IPCC, 2001. Climate change 2001: the scientific basis. International Panel of Experts on Climate Change [*Groupe International d'Experts sur les Changements Climatiques*] 881 p.

Keppler F., Hamilton J.T.G., Brass M., Röckmann T., 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, vol. 439, pp. 187-191.

Kiese R., Hewett B., Graham A., et al. (2003). Seasonal variability of N₂O emissions and CH₄ uptake by tropical rainforest soils of Queensland, Australia. *Global Biogeochemical Cycles* 17: Art. No. 1043.

- Lowe D.C., 2006. A green source of surprise. *Nature*, vol. 439, pp. 148-149.
- Riedacker A., 2004. Changements climatiques et forêts. SILVA RIAT.
- Röckmann T., Hamilton J., Keppler F., Brass M., 2006. Global warming; the blame is not with the plants. Mise au point des auteurs de l'article de Keppler *et al.* (2006) à la suite des réactions intervenues. Texte mis en ligne sur internet.
- Schiermeier Q., Peplow M., 2006 a. Methane finding baffles scientists. *Nature*, vol. 439, p. 128.
- Schiermeier Q., Peplow M., 2006 b. How could we have missed this?. *Nature*, vol. 439, p. 128.