

Académie des technologies

---

rapport

---

# Le méthane

d'où vient-il et quel est  
son impact sur le climat ?

---

La rédaction des chapitres 3, 4 et 5 du présent ouvrage doit beaucoup à messieurs Olivier Boucher, Philippe Bousquet et Jérôme Chappellaz.

L'Académie des technologies apprécie vivement leur contribution à ses travaux.

Rapport voté par l'Académie  
le 9 janvier 2013

Ce rapport est la finalisation d'une étude réalisée par un groupe de travail de l'Académie des technologies animé par Jean-Claude André et Bernard Tardieu (président de la commission « Énergies et changement climatique »)

Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-1014-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

## PRÉFACE

Le méthane est un puissant gaz à effet de serre. Malgré sa faible durée de vie dans l'atmosphère, il a une influence forte sur le climat et son évolution. Les sources de méthane sont nombreuses et variées. Elles sont parfois naturelles, parfois d'origine humaine avec de fortes et nombreuses interactions entre les deux. La compréhension du fonctionnement de ces sources et l'analyse de l'effet du méthane sur le climat dans le passé et maintenant mobilise des compétences scientifiques et technologiques extrêmement nombreuses.

Notre Académie a la mission et le goût d'entreprendre de telles synthèses particulièrement transversales par rapport au champ des connaissances. La variété des expériences et du savoir de ses membres et des éminents experts dont elle s'entoure le lui permettent.

Ce rapport est d'une grande qualité. Il a été voté à l'unanimité en séance plénière.

Je souhaite qu'il participe à apporter de l'information et de la clarté dans les débats qui vont préparer la prochaine Conférence sur le climat (Paris Climat), la COP 21 en décembre 2015 à Paris.

Que tous ceux qui ont pris l'initiative de ce rapport et ont participé à sa rédaction soient grandement remerciés.

**Gérard Roucairol,**  
Président de l'Académie des technologies

## SOMMAIRE

1	Remerciements
3	Résumé
7	Préambule
11	<b>Le méthane et l'effet de serre</b>
11	Quelques considérations générales sur le méthane atmosphérique et son évolution
18	Les propriétés radiatives du méthane et son importance vis-à-vis de l'effet de serre
20	Le méthane et le changement climatique à venir
23	Références
25	<b>Sources et puits de méthane</b>
25	Les sources de méthane
54	Les puits de méthane
57	Références
61	<b>Méthane : des observations atmosphériques aux flux de surface</b>
62	Les deux familles d'approches possibles pour l'estimation des flux de méthane
67	Mesurer le méthane atmosphérique
75	L'inversion atmosphérique : une approche pour convertir les observations atmosphériques en flux de méthane

77	Que nous ont appris les inversions atmosphériques sur les flux de méthane ?
83	Quelles sont les pistes actuelles et à venir pour améliorer notre connaissance des flux de méthane ?
86	Conclusions
88	Références
91	<b>Évolution passée, présente et future du méthane dans l'atmosphère</b>
91	Reconstruction et interprétation des variations paléoclimatiques
94	Variations pendant l'Holocène
95	Variations depuis la période industrielle
96	Rétroactions climatiques sur le cycle du méthane et évolution future
103	Conclusions
105	Références
107	<b>Équivalence « carbone » du méthane</b>
107	Protocole de Kyoto et politiques de changement climatique
109	Pouvoir de réchauffement global
110	Quel poids attribuer au méthane ?
112	Pouvoir de réchauffement global, pouvoir de température global et autres métriques
116	Réduction ponctuelle et réduction pérenne des émissions
116	Conclusions
119	Références

121	Évolutions perceptibles en cours, recommandations de type méthodologique et mesures « sans regret »
122	Les évolutions en cours au sein des sources et puits de méthane
132	Les zones arctiques et leurs évolutions à long terme
132	Recommandations de type méthodologique
134	Actions à mettre en œuvre à court terme « sans regret »
135	Conclusions
137	Références
139	Annexes
139	Annexe A : Les prairies comme puits de carbone
142	Annexe B : Agir sur l'alimentation des ruminants
145	Annexe C : Méthanisation et hydrogénisation à la ferme
146	Étude de l'Inra sur la production d'hydrogène par des écosystèmes microbiens
149	Membres du groupe de travail
151	Dictionnaire
157	Sigles utilisés
159	Bibliographie
159	Publications et communications de l'Académie des technologies
160	Autres
163	Publications de l'Académie

## REMERCIEMENTS

Cet ouvrage doit beaucoup à Jean DENÈGRE qui, tout au long de la préparation du plan général et des différents chapitres, a accompagné les réflexions et a activement contribué à les mettre en forme. La relecture et les remarques de Muriel BEAUVAIS et de François LEFAUDEUX ont permis d'améliorer la présentation générale et de préparer la publication de façon très efficace. Que tous trois trouvent ici l'expression de notre très grande gratitude.

Nous souhaitons tout autant remercier les collègues qui ont contribué à éclaircir et à approfondir certains des points abordés dans cet ouvrage, et qui, par leurs relectures attentives, ont permis d'en améliorer tant le fond que la forme : nous remercions ainsi très chaleureusement MM. Olivier APPERT, Patrice DESMAREST, Pierre FEILLET, Bruno JARRY, Jean-François MINSTER.

Nous sommes enfin très redevables à Mme Valérie MASSON-DELMOTTE et à MM. Benjamin DESSUS et Hervé LE TREUT d'avoir accepté de relire la totalité de la pénultième version de l'ouvrage et d'avoir permis d'en corriger et améliorer certains points ; nous les en remercions bien sincèrement.

Nous gardons bien entendu sous notre seule responsabilité les erreurs et les oublis qui peuvent subsister dans l'ouvrage.

Les auteurs :

Jean-Claude ANDRE, Olivier BOUCHER, Philippe BOUSQUET,  
Marie-Lise CHANIN, Jérôme CHAPPELLAZ et Bernard TARDIEU

### **AVERTISSEMENT**

Ce document utilise un certain nombre de mots techniques n'appartenant pas au vocabulaire courant, ainsi que des sigles spécialisés. Le lecteur trouvera en fin d'ouvrage un dictionnaire de mots techniques et un glossaire de sigles.

## RÉSUMÉ

Le méthane est un puissant gaz à effet de serre – dont les variations dans le passé ont accompagné les grandes fluctuations entre cycles glaciaires et périodes interglaciaires. Sa concentration actuelle, et plus encore future, influe de façon déterminante sur le calendrier et l'amplitude du changement climatique en cours et à venir.

Les sources du méthane atmosphérique sont multiples, associées aux zones humides – que celles-ci soient naturelles ou cultivées, à l'élevage des animaux, à la production d'énergie à partir des carburants – fossiles et renouvelables – et à divers autres phénomènes naturels (émissions géologiques) ou pratiques humaines (gestion des décharges). L'inconnue qui pèse actuellement le plus lourdement sur le futur de ces sources est relative à de possibles émissions massives à partir du pergélisol des zones humides arctiques et des hydrates de méthane marins (clathrates). Le méthane poursuit son cycle en étant partiellement absorbé par les sols via des processus d'oxydation bactérienne et/ou détruit dans l'atmosphère via une chimie radicalaire mettant en jeu le radical hydroxyle OH. Ces sources et puits sont encore trop imparfaitement quantifiés.

Les flux d'échange de méthane entre ses principaux réservoirs et l'atmosphère peuvent être mesurés directement, mais avec une représentativité locale, ou bien être estimés à partir de mesures de concentrations de méthane dans l'air. Les mesures de concentration reposent depuis trente ans sur les réseaux au sol, par spectroscopie (infrarouge ou optique) ou par chromatographie en phase gazeuse.

Il est maintenant possible de mesurer depuis l'espace la concentration atmosphérique intégrée du méthane et d'en déduire ses flux de surface par utilisation conjointe de capteurs radiométriques embarqués et de méthodes mathématiques d'inversion du transport et de la chimie dans l'atmosphère. L'ensemble de ces méthodes permet de mieux comprendre les évolutions actuelles de la concentration atmosphérique et l'évolution des principaux puits et sources. Le renforcement des réseaux de mesure reste toutefois une priorité, notamment par l'adjonction de mesures isotopiques, de même que l'amélioration des modèles du cycle du méthane, avec une intégration plus complète des observations dans les modèles.

Un examen plus détaillé de l'évolution passée et présente de la concentration du méthane dans l'atmosphère, en particulier au cours de l'Holocène et, plus récemment, depuis le début de l'ère industrielle, permet de mieux comprendre les rétroactions climatiques mises en jeu dans le cycle du méthane. Les rétroactions les plus puissantes, associées à la déstabilisation des clathrates, sont à la fois les plus incertaines et celles qui opèrent sur les échelles de temps les plus longues. Les rétroactions associées au dégel du pergélisol pourraient intervenir sur l'échelle du siècle. Si la fonte du pergélisol est relativement certaine au-dessus d'un seuil de réchauffement climatique dont tout laisse à penser qu'il risque d'être atteint, sa vitesse et la quantité de carbone qui sera émise, en particulier sous forme de méthane, restent très difficiles à évaluer. D'autres rétroactions impliquant les zones humides et des modifications de la chimie atmosphérique pourront contribuer, dans une mesure modeste, à amplifier le réchauffement climatique.

L'équivalence carbone du méthane, en termes d'efficacité vis-à-vis de l'effet de serre, est une question complexe, dont la réponse dépend de la métrique utilisée. Quelle que soit celle-ci, le poids du méthane reste tributaire d'un choix sur l'échelle de temps associée au problème du changement climatique (choix de l'horizon temporel pour le pouvoir de réchauffement global – PRG –, valeur du taux d'actualisation pour le pouvoir de dommage global – PDG). Des résultats récents suggèrent toutefois que le PRG du méthane doit être réévalué en raison d'effets indirects qui n'avaient pas été considérés jusque-là.

Les évolutions en cours des sources et puits de méthane sont en partie liées à l'exploitation des énergies fossiles. Les prochaines décennies verront très probablement la poursuite de l'augmentation de la consommation de ces combustibles. Les émissions de méthane peuvent toutefois être en très grande partie évitées à un coût compatible avec leurs équations économiques. L'autre contrôle

des sources et puits de méthane est lié aux zones humides et, plus globalement, aux sols, en fort lien avec les variations du climat. Ces rétroactions sont difficiles à contrôler et il est en particulier nécessaire de suivre avec attention les zones boréales, spécialement en lien avec de possibles mesures d'exploitation du méthane stocké dans les pergélisols et les clathrates marins. Au-delà, et en complément aux recommandations relatives au renforcement des réseaux de mesure, au développement de la modélisation et à l'intensification des recherches relatives aux zones humides ainsi qu'à la physiologie des animaux d'élevage, de nombreuses autres recommandations, du type « sans regret », peuvent être faites dans un grand nombre de domaines : pratiques agricoles, gestion des déchets et des décharges, combustion de la biomasse, exploitation du charbon, du gaz naturel et du pétrole.



## PRÉAMBULE

*Pourquoi s'intéresser spécifiquement au méthane atmosphérique ? Pourquoi l'Académie des technologies a-t-elle décidé de confier à un groupe de travail la rédaction d'un document de synthèse sur ce gaz ? Comment cet ouvrage a-t-il été conçu et organisé ?*

Le méthane est un sujet important pour le climat de notre planète : il est impératif de fournir à nos concitoyens et à nos décideurs des connaissances de base solides pour guider leurs réflexions et l'élaboration de leurs convictions et de leurs actions. Plusieurs remarques permettent d'étoffer cette réponse à la *première question* :

- ▶ le méthane est un gaz à effet de serre dont l'efficacité radiative est beaucoup plus grande que celle du dioxyde de carbone pour piéger l'énergie rayonnée par la Terre et contribuer ainsi au changement climatique ;
- ▶ le méthane est un gaz chimiquement actif qui joue un rôle important pour la production d'ozone, le bilan de vapeur d'eau dans la stratosphère, et la capacité qu'a l'atmosphère d'oxyder les constituants qu'elle contient ;
- ▶ la concentration atmosphérique du méthane est en augmentation, certes parfois irrégulière, mais nette sur longue période depuis plusieurs siècles, ce qui en fait un des acteurs très importants de la question climatique ;
- ▶ le méthane offre des possibilités intéressantes de réduction de ses émissions d'origine anthropique, qui sont pour beaucoup d'entre elles « sans regret », c'est-à-dire demandant moins de changements dans nos modes

de vie que pour le dioxyde de carbone, tout en présentant des effets secondaires eux aussi bénéfiques ;

- ▶ le méthane est, en grande partie, produit et absorbé par des processus à petite échelle mettant en jeu de multiples interactions avec le monde du vivant, tant végétal (terrestre et marin) qu'animal, ce qui donne à ses puits et sources une variabilité très complexe ;
- ▶ les complexités de la dynamique du climat et des cycles biogéochimiques rendent possibles quelques (mauvaises) surprises quant à l'évolution des sources naturelles de méthane, évolutions qui ont suivi les cycles glaciaires-interglaciaires passés et qui pourraient en retour rétroagir positivement avec le changement climatique pour en accentuer l'amplitude.

Répondre à la *seconde question* équivaut à souligner que la compréhension de tous ces phénomènes, que la recherche de leurs causes, que l'évaluation de leurs amplitudes et de leurs effets, que la recherche de solutions aux problèmes posés, supposent que soient réunis pour un échange approfondi climatologues, hydrologues, géographes, agronomes, géologues, chimistes (minéraux et organiques), pétroliers et gaziers... Chaque discipline doit comprendre et prendre en compte les apports et la problématique des autres, et contribuer en apportant les siens propres. Ceci est d'autant plus important que, dans bien des cas, les émissions de méthane ne sont pas au centre des préoccupations de nombre de ces activités, qu'elles n'en sont seulement qu'une des conséquences. Cette transversalité, cette capacité à l'échange raisonné, cette recherche du nécessaire recul dans les hypothèses émises par chaque discipline, sont le propre de l'Académie des technologies.

La réponse à la *troisième question* découle assez naturellement des quelques remarques précédentes : la complexité des liens entre méthane, monde vivant et changement climatique rend nécessaire une mise au point permettant d'apprécier l'état des connaissances scientifiques et techniques relatives aux différents aspects de ces relations.

Cette mise au point devrait aussi permettre d'échapper à la formulation d'idées trop simples, voire simplistes, sur nombre d'aspects relatifs au méthane. Nous n'avons pas souhaité dans cet ouvrage aller beaucoup au-delà de cet « état des lieux » rassemblant un ensemble d'éléments clés pour éclairer de possibles recommandations ou de futures décisions. D'autres institutions et d'autres initiatives, en effet, se sont penchées, et se pencheront encore dans le futur, sur la proposition

de recommandations et de réglementations pour réduire l'impact climatique lié au méthane. Au-delà de réflexions sur des mesures « sans regret », notre ambition est de rassembler ici les éléments scientifiques et techniques permettant d'apprécier la pertinence de telles recommandations, que celles-ci soient destinées à structurer des actions au niveau national ou au niveau européen et international. C'est l'ambition de ce rapport, dont nous pensons qu'il pourra constituer une synthèse utile et originale. Nous espérons ainsi avoir réussi à surmonter la plus grande part des difficultés liées à la dispersion, à travers de nombreuses disciplines scientifiques et de nombreuses activités économiques, des informations permettant de cerner l'importance et la complexité du « problème méthane » .

Rapport de l'Académie des technologies

**Le méthane : d'où vient-il et quel son impact sur le climat ?**

---

## Chapitre 1

# LE MÉTHANE ET L'EFFET DE SERRE

## QUELQUES CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LE MÉTHANE ATMOSPHÉRIQUE ET SON ÉVOLUTION

### Le méthane dans le système Terre

Le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est le plus simple des hydrocarbures de la famille des alcanes. Il est présent dans l'atmosphère terrestre avec des concentrations variables, tant dans l'espace que dans le temps : sa concentration en 2010 était de l'ordre de 1800 ppb (ppb = parties par milliard en volume ; 1 ppb représente 1 molécule de méthane pour  $10^9$  molécules présentes dans l'air), soit environ 200 fois moins que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Cette concentration a pu varier à l'échelle géologique, mais sans que l'on n'en ait d'enregistrement direct. Par exemple, il y a 2,5 milliards d'années, sa concentration de surface a pu être plusieurs centaines de fois supérieure en raison de l'activité d'organismes unicellulaires appelés archées (parmi les premières formes de vie apparues sur une Terre sans oxygène atmosphérique) et de l'absence d'oxydants dans l'atmosphère. Seules les carottes de glace extraites des calottes polaires offrent un enregistrement précis des concentrations de méthane au cours des derniers 800 000 ans (ère quaternaire), avec des variations sensibles et des oscillations entre 350 et 750 ppb. Cette concentration a subi une forte augmentation depuis

la révolution industrielle (+150%). Il est intéressant de noter que la masse totale de  $\text{CH}_4$  présente dans l'atmosphère est aujourd'hui de l'ordre de 5 milliards ( $5 \times 10^9$ ) de tonnes.

La quantité totale de  $\text{CH}_4$  présente dans l'atmosphère reste cependant très faible devant la quantité stockée dans d'autres milieux. L'accumulation principale se produit ainsi dans les grands réservoirs de gaz naturel (constitué en majorité de méthane ; réserves mondiales évaluées à plus de 100 milliards de tonnes), le sous-sol des régions gelées (pergélisol) et les sédiments et alluvions des fonds océaniques. Dans ces deux derniers stocks, le méthane est en grande partie sous forme d'hydrates, que l'on appelle aussi des clathrates. Ces clathrates sont des substances solides formées par des cages de molécules d'eau solide, avec une structure différente de celle de la glace, qui contiennent une ou plusieurs molécules hydrophobes. Dans le cas des hydrates de méthane, ce sont 6 à 8 molécules d'eau qui enserrant une seule molécule de  $\text{CH}_4$ . Les hydrates de méthane, qui contiennent 13 % de  $\text{CH}_4$  en masse, se présentent sous la forme de cristaux blancs qui, s'ils fondent, perdent leur eau et relâchent ainsi le  $\text{CH}_4$  emprisonné. On estime que la fonte d'un litre de clathrates de méthane entraîne la libération de 168 litres de méthane à pression atmosphérique. Les clathrates sont stables à basse température et sous forte pression, des conditions qui se rencontrent dans ces fonds océaniques, et leur point de fusion est souvent supérieur à 0 °C. Leur fonte est endothermique : il faut 390 MJ pour en fondre 1 m<sup>3</sup>. Bien que les stocks globaux soient difficiles à quantifier, il est désormais estimé que le pergélisol contient de l'ordre de 500 milliards ( $0,5 \times 10^{12}$ ) de tonnes de  $\text{CH}_4$ , tandis que les sédiments océaniques en contiennent plus, soit entre 500 et 2 500 milliards ( $0,5$  à  $2,5 \times 10^{12}$ ) de tonnes. Il faut enfin noter que la matière organique piégée dans le pergélisol peut, en cas de fonte et de conditions anaérobies, conduire à l'émission de méthane par développement d'une activité bactérienne.

En dehors des périodes de perturbation climatique majeure, il y a relativement peu d'échanges de méthane entre ces 4 principaux réservoirs. Les réservoirs de gaz naturel se forment en raison de l'étanchéité de la roche couverture ; leur échange avec l'atmosphère est donc supposé stable dans le temps. Les réservoirs de clathrates de méthane se forment très lentement (sur des échelles de temps géologiques), mais peuvent cependant être déstabilisés beaucoup plus rapidement. Nous centrerons donc la suite de nos descriptions sur la partie

atmosphérique du cycle du méthane et ses liens avec ses sources et ses puits, en évoquant toutefois la possibilité d'un déstockage, ne serait-ce que partiel, des réservoirs de clathrates : le pergélisol et le sous-sol océanique peu profond pourraient en effet fondre à des horizons temporels relativement proches (de l'ordre de quelques décennies ou siècles) en cas de réchauffement climatique important<sup>1</sup>. Dans la longue histoire de la Terre, de tels épisodes de relargages massifs de méthane ont pu exister ; ils sont discutés par la communauté scientifique des paléoclimatologues, sans toutefois qu'un consensus soit encore atteint sur l'amplitude ou même sur l'existence de telles perturbations du cycle du méthane.

### Sources vers l'atmosphère

Le méthane est émis dans l'atmosphère à partir de trois types de sources :

- ▶ la source biogénique constituée par des archées en milieu anaérobie, que ce milieu soit végétal (zones humides), animal (ruminants, termites) ou anthropisé (décharges) ;
- ▶ la source pyrogénique que constitue une combustion organique incomplète, par exemple pendant les brûlis agricoles ou les feux de forêt ;
- ▶ la source thermogénique qui est celle du craquage de molécules organiques complexes qui a conduit, sur des temps géologiques, aux réserves de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), avec notamment des poches de méthane dans le sous-sol. Les émissions induites par cette source peuvent être naturelles (fuites des bassins sédimentaires marins ou terrestres, volcanisme et géothermie) ou anthropiques (exploitation, traitement, transport et utilisation des combustibles fossiles).

Il est à noter que certaines de ces sources peuvent avoir une origine mixte, thermogénique et biogénique, comme c'est le cas de certaines fuites des bassins sédimentaires.

*Ces différentes sources sont présentées et discutées plus en détail au chapitre 2.*

<sup>1</sup> Voir chapitre 4.

## Puits dans l'atmosphère

Le méthane est extrait de l'atmosphère via deux mécanismes principaux :

- ▶ d'une part par réaction chimique, se produisant dans l'atmosphère, avec le radical OH (lui-même produit par réaction à partir d'oxygène monoatomique issu de l'ozone), pour donner *in fine* du monoxyde de carbone (CO), puis du CO<sub>2</sub> :



Le radical méthyle CH<sub>3</sub> se combine avec l'oxygène pour donner du CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> qui, par réaction catalytique avec les oxydes d'azotes NO et NO<sub>2</sub>, conduit à la formation de formaldéhyde CH<sub>2</sub>O. C'est le formaldéhyde qui est ensuite oxydé pour donner du monoxyde de carbone CO, puis du gaz carbonique CO<sub>2</sub>. Cette chaîne d'oxydation conduit aussi à la formation d'ozone dans les conditions habituellement rencontrées sur Terre. Ces réactions se produisent majoritairement dans la troposphère (pour environ 85 %), zone comprise entre la surface et 11 km d'altitude en moyenne, mais elles se produisent aussi, de façon plus minoritaire, dans la stratosphère (11 à 50 km d'altitude), en interaction avec le cycle de l'ozone et l'oxygène moléculaire. Une petite contribution au puits de méthane due au chlore dans la couche limite marine est toujours débattue dans la communauté scientifique. La transformation par OH représente au total 90 % du puits total de méthane, soit environ 450 à 500 millions (0,45-0,5 × 10<sup>9</sup>) de tonnes par an. L'estimation de l'amplitude de ce puits est rendue compliquée par le fait que la concentration atmosphérique de radical OH varie beaucoup dans le temps et l'espace, avec un temps de résidence très court (de l'ordre de la seconde) : ceci en fait donc une espèce chimique dont l'évolution globale à grande échelle reste très difficile à estimer directement, bien qu'il soit possible de la mesurer ponctuellement à petite échelle. On estime néanmoins qu'en l'absence de toute source, le puits lié à OH conduirait, si le taux d'oxydant restait constant, à une diminution du méthane atmosphérique d'un facteur (~ 2,72) en une douzaine d'années. Malgré ces estimations, le puits de méthane lié à OH reste difficile à évaluer précisément, comme l'est d'ailleurs la somme des sources ;

- ▶ d'autre part, un peu moins de 10 % diffusent dans les sols puis sont oxydés par des bactéries méthanotrophes, à un taux variant entre 0,08 et 1,3 gm<sup>-2</sup>an<sup>-1</sup>. Ce puits est modulé par la présence d'humidité (ce taux diminue si l'humidité augmente) et par la présence d'azote.

*Ces différents puits sont présentés et discutés plus en détail au chapitre 2.*

## Mesure et modélisation du méthane atmosphérique

Le cycle du méthane est connu de façon inégale. Pour les trente dernières années, le réservoir atmosphérique, et surtout son évolution temporelle, sont bien connus en raison :

- ▶ d'une métrologie bien maîtrisée et à un réseau de mesures de surface et aéroportées en constant développement grâce au soutien d'organismes nationaux et à des projets internationaux, sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale<sup>2</sup> ;
- ▶ de l'apparition de reconstructions de la colonne atmosphérique de méthane, avec une couverture planétaire liée à l'utilisation d'instruments spatiaux.

Les sources et puits annuels entre les surfaces continentales et océaniques et l'atmosphère restent encore très incertains, même pour les trente dernières années, pour lesquelles l'accroissement du nombre d'observations et le développement de modèles du cycle du méthane et des méthodes d'assimilation de données atmosphériques ont apporté des améliorations notables.

Le temps de résidence du méthane dans l'atmosphère (déterminé comme le rapport entre la valeur du réservoir atmosphérique et celle de la somme des puits) est estimé pour les conditions climatiques actuelles entre 8 et 10 ans. Ce temps dépend essentiellement de la quantité de radicaux OH disponible et, indirectement, du climat lui-même. Son évolution dans un climat changeant est importante à connaître pour affiner les scénarios climatiques futurs.

*Les aspects de métrologie, de modélisation du cycle du méthane, et d'estimation de ses sources et puits sont développés au chapitre 3.*

Les évolutions de la concentration du CH<sub>4</sub> atmosphérique qui ont pu être mesurées ou reconstruites au cours du temps restent un moyen fondamental pour comprendre les divers aspects de son cycle.

<sup>2</sup> On notera toutefois que ce réseau était développé initialement pour la métrologie du CO<sub>2</sub> et que de vastes domaines continentaux sont insuffisamment couverts pour une bonne métrologie du méthane.

## Évolution des concentrations atmosphériques

La concentration atmosphérique moyenne du méthane a varié :

- ▶ aux échelles de temps géologiques, elle dépassait probablement 1000 ppm (parties par million en volume) à l'Archéen, puis a largement diminué avec l'accroissement de la concentration atmosphérique en oxygène il y a environ 2,5 milliards d'années ;
- ▶ au cours des dernières alternances de cycles glaciaires et de périodes interglaciaires, parallèlement aux cycles de la température globale et de la concentration en dioxyde de carbone. Au cours des dernières 800 000 années (figure 1.1), cette concentration a ainsi oscillé entre 350 et 750 ppb ;
- ▶ au cours des 200 dernières années, soit environ depuis le début de l'ère industrielle, période au cours de laquelle la concentration est rapidement passée de 750 ppb à 1800 ppb (voir figure 4.2) ;

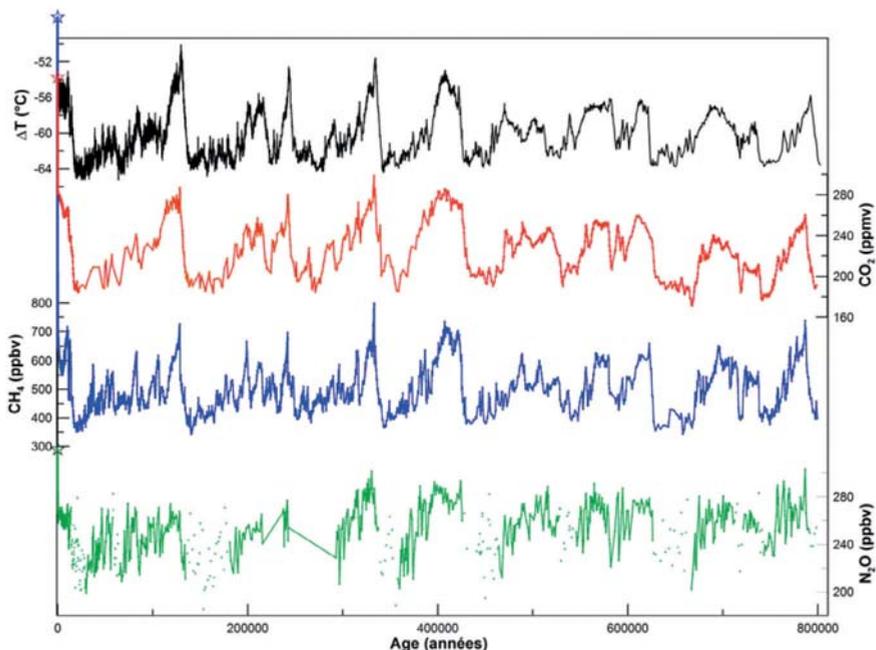


Figure 1.1 : 800 000 ans d'évolution de la température antarctique (en noir), de la concentration en CO<sub>2</sub> (en rouge), du CH<sub>4</sub> (en bleu) et du N<sub>2</sub>O (en vert) confirmant le fort couplage entre la concentration des gaz à effet de serre et le climat. D'après Jouzel *et al.* [2007], Lüthi *et al.* [2008], Louergue *et al.* [2008] et Schilt *et al.* [2010].

- ▶ au cours des trois dernières décennies (figure 1.2), toutefois avec des accélérations et des ralentissements du taux d'augmentation. C'est ainsi, par exemple, que l'éruption du Pinatubo aux Philippines en juin 1991 semble avoir provoqué un déficit de destruction du méthane du fait d'une diminution temporaire de radical OH, tandis que la diminution observée en 1992 a été imputée à une réduction des émissions par les zones inondées à cause du refroidissement causé par l'éruption.

Depuis 2007, et après près d'une décennie de stabilité, la concentration globale a recommencé à augmenter à un taux compris entre 4 et 8 ppb/an selon les années. La compréhension de cette augmentation n'est pas encore complète ; elle implique les sources anthropiques, les zones inondées tropicales, mais aussi celles des hautes latitudes.

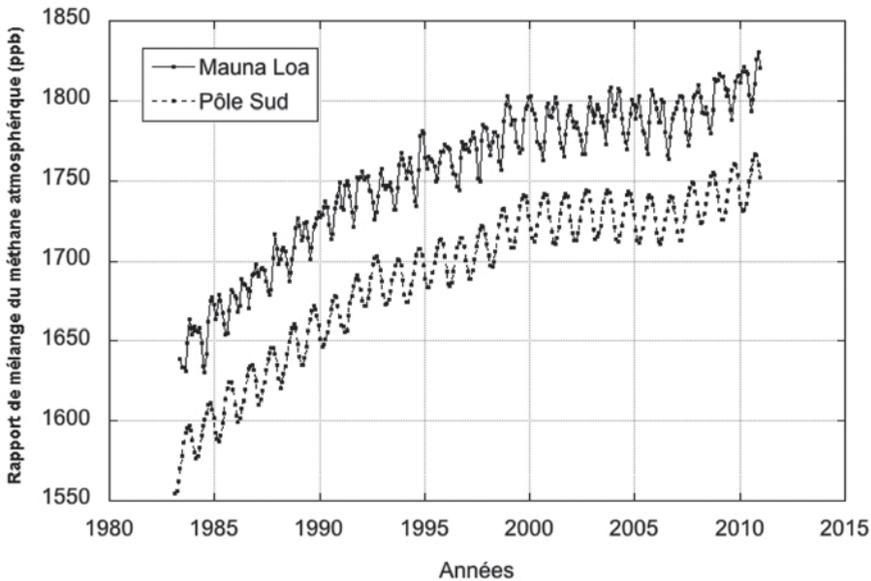


Figure 1.2: Rapport de mélange du méthane dans l'atmosphère (ppb) entre 1983 et 2010, mesuré à Mauna Loa [courbe du haut, 19°N dans l'océan Pacifique] et au pôle sud [courbe du bas], par le réseau d'observations de la NOAA. Source des données : NOAA/ESRL (<http://www.noaa.gov/>).

*Le chapitre 4 aborde tous ces points plus en profondeur.*

## LES PROPRIÉTÉS RADIATIVES DU MÉTHANE ET SON IMPORTANCE VIS-À-VIS DE L'EFFET DE SERRE

### Contribution radiative globale du méthane

L'importance climatique du méthane provient de sa grande capacité à absorber le rayonnement infrarouge émis par le système terre-océan-atmosphère. La figure 1.3 montre, selon l'étude de synthèse du GIEC, la contribution planétaire des différents gaz à effet de serre à la modification anthropique du bilan radiatif imposée à l'atmosphère.

On voit sur cette figure que l'augmentation de la concentration atmosphérique de  $\text{CH}_4$  a conduit, depuis le début de l'ère industrielle, à un forçage radiatif<sup>3</sup> d'environ  $0,5 \text{ Wm}^{-2}$ , soit environ trois fois moins que le forçage radiatif lié à l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. En effet, bien que la concentration de  $\text{CH}_4$  soit 200 fois inférieure à la concentration de  $\text{CO}_2$ , le méthane est environ 25 fois plus efficace pour piéger le rayonnement infrarouge que ne l'est le dioxyde de carbone lui-même (pour un horizon de 100 ans) : si l'effet radiatif du  $\text{CO}_2$  est estimé à  $0,015 \text{ Wm}^{-2}\text{ppm}^{-1}$ , celui du  $\text{CH}_4$  est en effet de  $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{ppm}^{-1}$ . Par ailleurs, le méthane contribue indirectement au forçage radiatif anthropique par la production de vapeur d'eau dans la stratosphère ( $0,07 \text{ Wm}^{-2}$ ) et pour une part via la production d'ozone dans la troposphère (une fraction des  $0,35 \text{ Wm}^{-2}$  indiqués dans la figure 1.3).

### Le potentiel de réchauffement global

On mesure le plus souvent l'effet radiatif des différents gaz à effet de serre via leur potentiel de réchauffement global (PRG, ou GWP pour *Global Warming Potential*). Le PRG est défini comme le rapport de la valeur moyenne, sur un intervalle de temps donné (25, 50 ou 100 ans), du forçage radiatif résultant de l'émission ponctuelle à l'instant 0 d'une masse de ce gaz à effet de serre par rapport à l'émission au même

<sup>3</sup> Le forçage radiatif de l'atmosphère, relatif à un processus particulier, est défini comme la modification, apportée par ce processus, à l'un des flux radiatifs (visible ou infrarouge) affectant l'atmosphère.

moment de la même masse de  $\text{CO}_2$ . Si l'on suppose que la température répond linéairement au forçage radiatif, on montre que dans ce cas le PRG peut alors être considéré comme représentant le rapport des réchauffements moyens, sur cette période donnée, résultant de l'émission ponctuelle d'une même masse du gaz considéré et de  $\text{CO}_2$  à l'instant 0. Dans le cas du méthane, le PRG (à 100 ans) vaut ainsi 25, c'est-à-dire que l'émission dans l'atmosphère d'aujourd'hui de 1 kg de  $\text{CH}_4$  aura le même effet radiatif intégré dans un siècle que l'émission de 25 kg de gaz carbonique<sup>4</sup>.

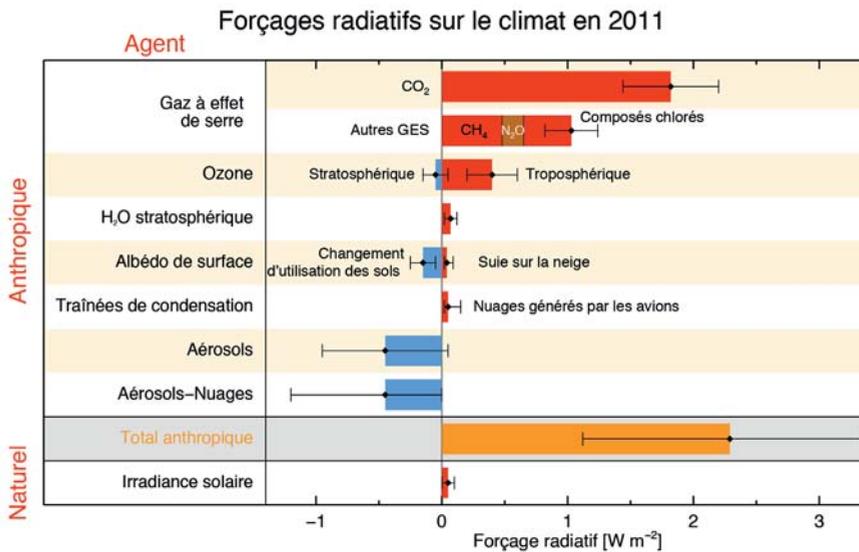


Figure 1.3: Contribution des différents gaz à effet de serre et des autres mécanismes au forçage radiatif d'origine anthropique du climat (IPCC, 2013).

Cette notion de PRG, *a priori* très attractive, souffre toutefois de plusieurs limitations, comme cela sera décrit en détail au chapitre 5. La plus importante de ces limitations concerne le choix quelque peu arbitraire d'un horizon temporel. La définition

<sup>4</sup> Le pouvoir de réchauffement global à 100 ans pour le méthane a été estimé à 21 dans le second rapport d'évaluation du GIEC (valeur utilisée par le protocole de Kyoto), puis réévalué à 23 dans le troisième rapport d'évaluation et à 25 dans le quatrième rapport d'évaluation (Forster *et al.*, 2007).

habituelle du PRG s'appuie sur l'estimation du réchauffement à l'horizon centenaire, mais le PRG ne sera pas le même si l'on se base pour l'estimer sur le réchauffement à 25 ans, en particulier pour un gaz comme le méthane qui n'a qu'environ 9 ans de temps de résidence dans l'atmosphère. Ainsi, pour avoir un effet équivalent sur 25 ans de l'émission d'une même masse de  $\text{CH}_4$  ou de  $\text{CO}_2$ , c'est 80 fois plus de  $\text{CO}_2$  qu'il faudrait considérer.

## LE MÉTHANE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE À VENIR

Les scénarios d'émission de méthane (dits SRES) répertoriés dans le dernier rapport publié du GIEC évoquent des taux variant dans une fourchette comprise entre une quasi-stabilisation des émissions au taux actuel et un doublement de ces émissions. Les nouveaux scénarios (dits RCP) proposent une gamme encore plus large de futurs possibles entre un scénario ambitieux qui limite fortement les émissions anthropiques et un scénario sans contrainte où celles-ci continuent d'augmenter. Une hypothèse relativement favorable, où les émissions se poursuivent au taux actuel, permet à relativement court terme de stabiliser la concentration atmosphérique de  $\text{CH}_4$ , mais n'exploite pas le potentiel de réduction des émissions anthropiques. Les scénarios inquiétants d'augmentation des émissions anthropiques le sont d'autant plus que les émissions planétaires de  $\text{CH}_4$  ne sont pas accompagnées, comme dans le cas de l'émission de  $\text{CO}_2$  par utilisation de combustibles fossiles, de l'émission de fines particules d'aérosols jouant un rôle d'écran partiel au rayonnement solaire, et donc régionalement modérateur du réchauffement<sup>5</sup>. Par ailleurs, des processus comme la dynamique du pergélisol ou des hydrates marins ne sont pas encore pleinement intégrés dans les modèles de climat, ce qui rend difficile aujourd'hui l'étude de la rétroaction positive qu'entraînerait une déstabilisation de ces milieux riches (ou potentiellement riches après méthanogénèse) en méthane.

<sup>5</sup> L'action des aérosols atmosphériques ne se limite pas à leur rôle radiatif, ils ont aussi d'autres conséquences moins favorables vis-à-vis de la qualité de l'air et de la santé. Il faut aussi noter le rôle réchauffant d'un aérosol particulier, le « carbone-suie ».

En complément de cette spécificité « effet de serre » du CH<sub>4</sub> par rapport au CO<sub>2</sub>, le méthane, gaz à courte durée de vie par rapport à celle du dioxyde de carbone, conduit assez naturellement à des appréciations différentes de l'importance comparée des actions pour réduire les émissions respectives de ces deux gaz dans la perspective de la maîtrise de l'effet de serre d'origine anthropique, et donc de la limitation du réchauffement climatique aux horizons temporels plus rapprochés (milieu du XXI<sup>e</sup> siècle par exemple).

*Le chapitre 6 donne ainsi quelques pistes pour la nécessaire réduction des émissions de méthane*, la plupart correspondant à des procédures dites « sans regret », c'est-à-dire soit conduisant à des effets secondaires eux aussi bénéfiques, soit ne présentant pas de difficulté technologique ou sociétale particulière (bien que nécessitant tout de même une volonté et des moyens *a minima* incitatifs de mise en œuvre).

### **Pour faciliter la lecture de la suite de l'ouvrage**

**Le chapitre 1** est une introduction générale aux différents points traités dans le reste de l'ouvrage. Il est volontairement rédigé de façon succincte.

**Le chapitre 2** présente un panorama complet des différents puits et sources de méthane, permettant de bien apprécier l'ensemble des milieux et processus via lesquels ce gaz transite dans le système.

**Le chapitre 3** est relatif aux différentes méthodes de mesure actuellement ou bientôt disponibles pour caractériser la distribution globale et régionale, ainsi que les flux de méthane.

**Le chapitre 4** traite des évolutions de la distribution du méthane depuis les ères glaciaires et interglaciaires jusqu'aux périodes historiques, et présente quelques projections quant aux évolutions futures. Ces évolutions sont mises en regard, autant qu'il est possible, avec les mécanismes sous-jacents.

**Le chapitre 5** aborde la difficile question de l'équivalence des différents gaz à effet de serre et présente les différentes métriques qu'il est possible d'adopter pour juger de l'importance particulière du méthane, selon le point de vue que l'on adopte (court ou long terme, régulateur ou investisseur).

**Le chapitre 6** récapitule les principales évolutions attendues et les plus importantes recommandations, qu'elles soient d'ordre méthodologique pour faire progresser les connaissances ou qu'elles concernent des mesures dites « sans regret » pour mieux maîtriser l'influence climatique du méthane.

## RÉFÉRENCES

1. Forster P.M. de F., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R.A., Fahey D. W., Haywood J. A., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M. and Van Dorland R., *Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing*, in : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, pp. 129-234, 2007.
2. IPCC. *Working Group I Climate change 2013, The physical science basis, contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker T.F., Qin D., Platt G.K., Tignar M.M.B., Allen S.K., Boschung J., Nanelis A., Xia Y., Bex V. et Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
3. Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S., Hoffmann G., Minster B., Nouet J., Barnola J.M., Chappellaz J., Fischer H., Gallet J.C., Johnsen S., Leuenberger M., Loulergue L., Luethi D., Oerter H., Parrenin F., Raisbeck G., Raynaud D., Schilt A., Schwander J., Selmo E., Souchez R., Spahni R., Stauffer B., Steffensen J.P., Stenni B., Stocker T., Tison J.L., Werner M. and Wolff E.: *Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years*, *Science* 317, 793-797, 2007.
4. Loulergue L., Schilt A., Spahni R., Masson-Delmotte V., Blunier T., Lemieux B., Barnola J.-M., Raynaud D., Stocker T.F. and Chappellaz J., *Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the last 800,000 years*, *Nature* 453, 383-386, 2008.
5. Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K. and Stocker T.F., *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present*, *Nature* 453: 379-382, 2008.
6. Schilt A., Baumgartner M., Blunier T., Schwander J., Spahni R., Fischer H. and Stocker T.F., *Glacial-interglacial and millennial-scale variations in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 800,000 years*, *Quaternary Science Reviews* 29, 182-192, 2010.

Rapport de l'Académie des technologies

**Le méthane : d'où vient-il et quel son impact sur le climat ?**

---

## Chapitre 2

# SOURCES ET PUIITS DE MÉTHANE

## LES SOURCES DE MÉTHANE

Trois processus expliquent principalement la production de méthane sur notre planète (voir, entre autres, Boone, 2000 ; Khalil et Shearer, 2000 ; Whiticar, 2000).

Le plus important est de beaucoup la fermentation anaérobie qui conduit à une formation d'origine **biogénique** du méthane. Cette fermentation est développée par des microorganismes méthanogènes de la famille des archées (différente des bactéries) qui sont sensibles à la température et qui présentent en général une activité maximale lorsque la température est entre 35° et 40 °C (toutefois certaines archées se sont adaptées pour une activité optimale à de plus basses températures). Cette fermentation se produit à la fois en relation avec le monde végétal (zones humides), le monde animal (pour l'essentiel dans la panse des ruminants), et le monde « anthropisé » (décharges, déchets agricoles, eaux usées).

Le second processus est associé à la combustion incomplète de la biomasse, lors notamment des feux de forêts et des brûlis agricoles. On parle d'une source **pyrogénique** de méthane.

Le troisième processus, appelé **thermogénique**, est lié à la formation des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) au cours des ères géologiques passées, par décomposition bactérienne puis craquage thermique (pyrolyse) et

migration depuis les profondeurs de la Terre vers la surface. On parle de méthane fossile (non limité *stricto sensu* au méthane d'origine thermogénique) quand il est dépourvu de carbone 14, c'est-à-dire que sa production s'est faite il y a plus de 50 000 ans environ. Ce méthane fossile peut être d'origine anthropogénique (exploitation des mines de charbon, exploitation du gaz naturel, qui est pour l'essentiel du méthane, et du pétrole) ou naturel (décomposition spontanée de clathrates ou hydrates de méthane piégés dans les océans ou les sols). Dans le futur, la décomposition anaérobie de substrats organiques enfouis dans les pergélisols depuis des millénaires sera aussi appauvrie en carbone 14 et contribuera au méthane dit « fossile ». Certaines sources actuelles comme les sources géothermales marines ou terrestres peuvent combiner des processus biogéniques et thermogéniques.

Le tableau 2.1 présente les ordres de grandeur des quantités de méthane émises ou absorbées en téragrammes ( $\text{Tg CH}_4/\text{an}$ , ou million de tonnes  $\text{CH}_4/\text{an}$ ) ainsi que la gamme de valeurs retenue dans la littérature scientifique pour chaque type d'émission ou de puits (Reay *et al.*, 2010)<sup>6</sup>.

Ce tableau montre bien la grande variété des sources ainsi que les incertitudes existant encore aujourd'hui sur les sources individuelles, certaines évaluations différant du simple au double. La source totale paraît ainsi très incertaine, mais les observations de méthane dans l'atmosphère permettent de restreindre cette forte incertitude à l'échelle planétaire, comme il sera montré *infra*. Les différentes sources sont discutées dans les paragraphes qui suivent, dans un ordre parfois différent de celui du tableau et avec certaines révisions (comme par exemple pour les animaux sauvages dont les émissions semblent plus proches de 2  $\text{Tg}/\text{an}$  que de 15  $\text{Tg}/\text{an}$ , cf. *infra*). Pour fixer les idées sur l'importance relative de chaque source, figure entre parenthèses dans son intitulé le pourcentage de méthane émis (tiré de ce tableau) par rapport au total émis dans le monde aujourd'hui.

<sup>6</sup> On pourra consulter le chapitre 6 du 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2013) qui vient d'être publié, où sont présentées de nouvelles évaluations des différents flux de méthane entre la plupart des réservoirs décrits ici, ainsi que de nouvelles évaluations de fourchettes d'incertitude.

	Flux de méthane (Tg/an)	Gamme
<b>Sources naturelles</b>		
Zones humides	174	100-231
Termites	22	20-29
Océans	10	4-15
Hydrates	5	4-5
Sources géologiques	9	4-14
Animaux sauvages	15	15
Feux naturels	3	2-5
Total naturel	<b>238</b>	<b>149-319</b>
<b>Sources anthropiques</b>		
Mines de charbon	36	30-46
Gaz, Pétrole, Industries	61	52-68
Décharges	54	35-69
Ruminants	84	76-92
Riziculture	54	31-83
Total anthropique	336	238-446
Total, toutes sources (selon IPCC AR4)	574 (582)	387-765
<b>Puits</b>		
Sols	30	26-34
OH troposphérique	467	428-507
Stratosphère	39	30-45
Total des puits	536 (581)	484-586
<b>Déséquilibre</b>		
	38	-199-281

**Tableau 2.1 :** Sources et puits de méthane (tiré de Reay *et al.*, 2010). (a) les valeurs de ce tableau représentent la moyenne des valeurs proposées par Denman *et al.* (2007) dans leur table 7.6, arrondies au chiffre entier le plus proche. Elles sont basées sur huit études différentes utilisant des données réparties sur la période 1983-2001 ; (b) les plages pour ces valeurs sont déduites de celles données par Denman *et al.* (2007) dans leur table 7.6. Les données de Chen et Prinn (2006) pour les sources anthropogènes ne sont pas incluses ici à cause de recouvrements dans leurs secteurs ; (c) les données entre parenthèses sont celles données dans le 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC à titre de « meilleure estimation » pour la période 2000-2004.

## Les zones humides (~ 30 %)

### Définition et étendue

Les zones humides sont définies comme les zones géographiques où le sol est saturé d'eau et où la profondeur de l'eau est inférieure à un mètre [Coe, 1998]. On peut aussi définir les zones humides comme l'interface entre les écosystèmes terrestres et les écosystèmes aquatiques, que l'eau soit douce, saumâtre ou salée.

Les zones humides constituent la source naturelle la plus importante de méthane<sup>7</sup> [Chappellaz *et al.*, 1993]. Matthews and Fung [1987], Aselman and Crutzen [1989], et Bartlett *et al.* [1990] avaient proposé une valeur d'environ 100 Tg/an en supposant une surface totale des zones humides de 5 à 6 millions de km<sup>2</sup>. La valeur la plus récente se situe autour de 170 Tg CH<sub>4</sub> / an. Toutefois Bousquet *et al.* [2006] ont proposé plus récemment une estimation à 147 ± 15 Tg CH<sub>4</sub>/an pour les années 1984-2003. Ces émissions sont très variables dans le temps et dans l'espace (changements saisonniers, interannuels, etc.), d'où la grande incertitude reportée dans le tableau 2.1<sup>8</sup>.

Dans les zones inondées, la production de méthane par des archées méthanogènes recyclant la matière organique en milieu anaérobie dépend principalement de la température, de l'hydrologie, de la quantité de matière organique accumulée, du type de végétation et de la chimie des matériaux organiques. Une grande partie de cette production est oxydée en CO<sub>2</sub> avant d'atteindre l'atmosphère. Cependant, une fraction du méthane produit peut être émise dans l'air par diffusion (si la zone aérobie en surface reste peu profonde), par bullage, ou par transport dans le système vasculaire de certaines plantes. L'émission de bulles décroît rapidement quand l'épaisseur d'eau augmente et elle est augmentée par le vent et les courants.

<sup>7</sup> Ainsi tout le monde connaît les feux follets des marais qui sont des émanations de méthane provenant de la décomposition des plantes et de formes chimiques du phosphore (diphosphine P<sub>2</sub>H<sub>4</sub> et hydrogène phosphoré PH<sub>3</sub>) émis par la décomposition de cadavres d'animaux qui provoquent l'inflammation spontanée à l'air libre.

<sup>8</sup> Incertitude attestée par Matthews (2000) : "The largest uncertainties in the role of wetlands and their methane emission in the global methane cycle are variations in inundation periods, seasonal changes in wetland habitat areas, interannual variations in inundation extent" ainsi que par Marani et Alvala (2006).

Ceci a été montré par des mesures faites par exemple au lac Gatun, qui constitue la partie centrale du canal de Panama (Keller et Stallard, 1994; Joyce et Jewell, 2003) et au lac Calado dans la plaine amazonienne (Engel et Melack, 2010). Très récemment, l'extension temporelle des observations directes de flux de  $\text{CH}_4$  depuis des marécages de haute latitude a permis de révéler un phénomène non encore appréhendé : le regel des marécages en surface au cours de l'automne conduit à des émissions très importantes vers l'atmosphère, probablement par simple effet de pressurisation et de dégazage des sédiments sous-jacents (Mastepanov *et al.*, 2008). Ceci n'était pas pris en compte dans les estimations d'émissions de  $\text{CH}_4$  par les marécages à l'échelle globale, telles que listées ci-dessus.

D'autres grandes sources d'incertitude sont liées, d'une part, à la mauvaise connaissance, malgré des reconstructions grâce à des mesures satellitaires, de la surface totale des zones humides, estimée à  $5,3 \times 10^6 \text{ km}^2$  et, d'autre part, à la variabilité hydrologique des surfaces humides, qu'elle soit saisonnière, annuelle ou pluriannuelle. Ces  $5,3 \times 10^6 \text{ km}^2$  de zones humides couvrent environ 4% des surfaces émergées. Ils se décomposent en  $2 \times 10^6 \text{ km}^2$  pour les zones humides tropicales,  $0,6 \times 10^6 \text{ km}^2$  pour les zones tempérées et  $2,7 \times 10^6 \text{ km}^2$  pour les zones boréales. Les zones humides tropicales sont les principaux émetteurs ( $\sim 90 \text{ Tg CH}_4 / \text{an}$ ). Les zones humides boréales participent au bilan global, mais leurs émissions restent encore mal connues (voir par exemple le phénomène de dégazage automnal tout juste révélé) car elles ne sont que peu, et non continûment, observées dans des régions au climat rude où les effets du réchauffement sont encore mal appréhendés. En effet, un sol gelé blanc ou clair a un fort albédo et est inerte. La même zone dégelée se couvre de végétation, a un albédo moins fort et peut se réchauffer en été lorsque l'épaisseur d'eau est faible. Si le sol se dessèche parce que la nappe phréatique s'enfonce, alors le sol devient un puits de carbone entre la surface et la zone de production en profondeur.

La définition même de zones humides est une source d'erreurs : marais, marécages, tourbières, vasières, zones d'inondation, dombes, auxquels ont été ajoutées les lagunes<sup>9</sup> (Matthews et Fung, 1987 ; Aselmann et Crutzen, 1989), ne sont pas précisément définis. En général, ce sont les étendues d'eau de moins de 5 mètres (Keller et Stallard, 1994), c'est-à-dire au-delà de notre définition.

<sup>9</sup> En anglais : shallow lakes.

Cette surface des zones humides est à comparer à la surface des lacs :  $1 \times 10^6$  km<sup>2</sup> en eau douce et  $1,5 \times 10^6$  km<sup>2</sup> en eau saumâtre. Les lacs d'eau douce, notamment boréaux, ont aussi reçu une attention particulière au cours des dernières années. Leur profondeur limite fortement les émissions par diffusion, mais ils pourraient contribuer aux émissions de méthane dans l'atmosphère à hauteur de 15 à 35 Mt CH<sub>4</sub> / an (Walter *et al.*, 2007) par le phénomène de bullage. Par ailleurs, l'augmentation des températures aux hautes latitudes conduit à la fonte localisée de pergélisols qui, en s'effondrant, donnent naissance à de petits lacs appelés lacs thermokarstiques. Avec des profondeurs d'eau relativement faibles, ces nouveaux lacs contribuent à augmenter les émissions des zones humides en régions boréales. Enfin les plaines fluviales inondées saisonnièrement jouent probablement aussi un rôle, encore mal estimé, dans les émissions de méthane<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> La question des émissions associées à la production d'énergie hydroélectrique est parfois évoquée. Les lacs artificiels diffèrent des lacs naturels durant leur période de remplissage ; ensuite ils se comportent de la même manière. Des mesures nombreuses ont montré que la transition dure quelques années, durant lesquelles les émissions de méthane et de H<sub>2</sub>S peuvent être plus élevées avant que le lac artificiel ne s'intègre (exemple du lac Gatun qui existe depuis un siècle). Plus précisément, l'émission de méthane est proportionnelle à la quantité de biomasse immergée, à la température de l'eau et au temps de résidence de l'eau dans le lac. Les émissions par diffusion disparaissent après 3 ans à cause du développement de bactéries méthanotrophes qui oxydent le méthane. Les émissions par bullage diminuent progressivement en fonction de la profondeur de l'eau. La seule spécificité des usines hydroélectriques est que l'eau de la retenue se détend dans l'aspirateur de la turbine après avoir transmis son énergie à la roue de turbine. S'il existe des gaz dissous dans l'eau, à la profondeur des prises d'eau de l'usine, ceux-ci sont libérés. Cela peut être du méthane inodore ou du H<sub>2</sub>S qui ne l'est pas. Ce méthane pourrait être récupéré et utilisé comme biogaz, cf. L.A.W. Bambace *et al.*, 2007, qui proposent une analyse de la possibilité de récupérer le méthane à l'usine hydroélectrique de Serra de Mesa (deuxième plus grand lac du Brésil 1 784 km<sup>2</sup>).

### Exemples

Quelques exemples sont donnés ci-après des zones inondées fluviales ou lacustres, afin d'illustrer la variété géographique de ces étendues d'eau.



Figure 2.2a: Le Pantanal (Brésil, Mato Grosso) est la plus grande zone humide de la planète (classée au patrimoine mondial de l'Unesco) et que l'Amazone inonde chaque année sur 140.000 km<sup>2</sup>. Elle abrite une faune d'une richesse exceptionnelle. [source Wikipedia photo Patricia YO].



Fig 2.2b: La forêt amazonienne vue du sol à proximité du confluent du Rio Negro et de l'Amazone (François Lefaudeux – Académie des technologies).

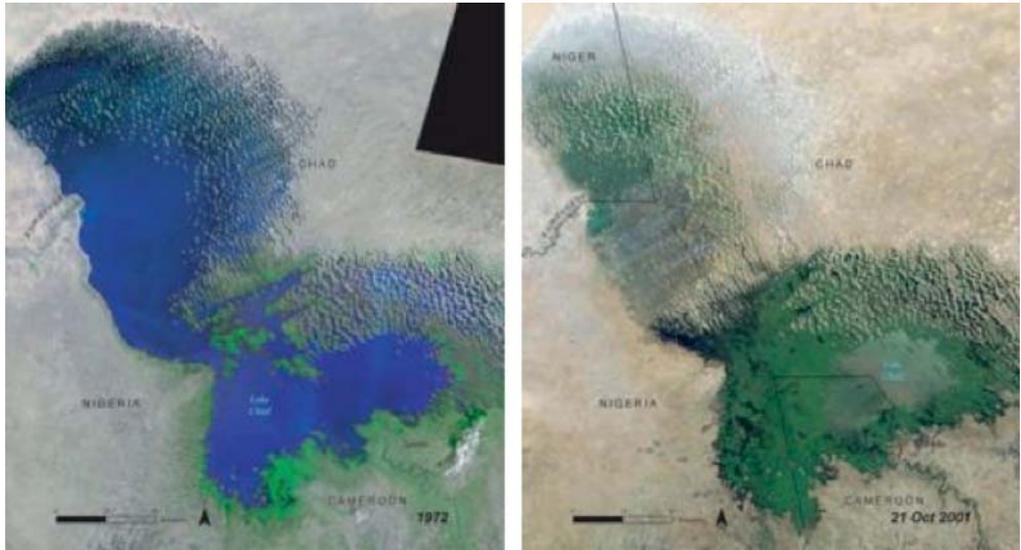


Figure 2.2c: Deux images satellitaires du lac Tchad à presque 30 ans d'intervalle : à gauche en 1972, à droite en 2001. Le lac Tchad avait une surface de 300 000 km<sup>2</sup> il y a 2 000 ans, 26 000 km<sup>2</sup> en 1950 et 1 350 km<sup>2</sup> aujourd'hui. En fait, il a été totalement transformé en simple zone humide (de couleur verte) lors de sécheresses prolongées comme en 1983 (et il est aussi quasi asséché en octobre 2001) (photos NASA).

Un autre exemple de zone humide de très grande dimension est la grande plaine de Sibérie, entre l'Oural à l'ouest et le fleuve Lénilisseï à l'est. Elle couvre 2,7 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, dont 50 % sont à une altitude inférieure à 100 mètres. Les fleuves Lénilisseï et Ob font d'innombrables méandres dont beaucoup sont abandonnés. C'est dans cette région que se trouve le marais de Vassiougan (figure 2.2d) qui couvre de 50 000 à 60 000 km<sup>2</sup> (Shakova *et al.*, 2008).

### Classement des zones humides dans le monde

On peut diviser les zones humides en zones tropicales ou subtropicales et en zones boréales et tempérées. Les premières sont caractérisées par des températures élevées, par des précipitations importantes et par des cycles de crues avec inondations longues. Les secondes sont caractérisées par des températures variables plutôt basses et par une interaction saisonnière entre la température et le cycle hydrologique. L'activité des archées méthanogènes dépendant fortement de la température, celle-ci et le contenu variable en carbone organique des sols sont des facteurs importants pour évaluer les émissions de méthane de ces deux zones.



Figure 2.2d : Marais de Vassiougan (Wikipedia).

Notons que les zones humides sont protégées par la Convention de Ramsar<sup>11</sup> (2 février 1971 entrée en vigueur le 21 décembre 1975). Ces accords protègent les zones humides à cause de leur richesse biologique et, donc, de leur contribution à la biodiversité et de leur impact sur le cycle de l'eau et de l'azote. Ceci inverse la tendance depuis l'antiquité romaine à réduire les zones humides pour lutter contre les maladies (la malaria, le « mauvais air » de la plaine de Rome) et augmenter les zones cultivables. Aujourd'hui  $1,61 \times 10^6$  km<sup>2</sup> de zones humides sont déclarés d'intérêt remarquable.

<sup>11</sup> La Convention sur les zones humides de Ramsar (Iran, 1971) est un traité intergouvernemental qui définit les engagements de ses États membres à maintenir les caractéristiques écologiques de leurs zones humides d'importance internationale et à planifier l'utilisation « durable » de celles-ci.

## La culture du riz (~ 9%)

Rappelons tout d'abord que le riz est une culture qui peut survivre en milieu totalement saturé d'eau. C'est d'ailleurs la seule céréale qui survive dans ces conditions. On peut donc considérer que la culture du riz dans les zones naturellement inondées durant les périodes de pluie est une adaptation au milieu « zone humide ». C'est une manière d'utiliser la zone humide qui ne modifie que peu les émissions de méthane de celle-ci<sup>12</sup>. Ainsi les premières cultures du riz en Chine il y a environ 5 000 ans étaient souvent établies sur des zones humides existantes, l'irrigation n'apparaissant que plus tard (Fuller *et al.*, 2011).

La culture en rizière (figure 2.3) est une pratique culturelle caractéristique des zones de moussons où 90 % de la récolte de riz est effectuée. Le riz est une culture qui peut s'adapter à de nombreux environnements de croissance : zones inondées permanentes ou intermittentes, zones simplement arrosées par les pluies, zones sans ennoiment avec ou sans nappe phréatique affleurant. Une proportion croissante du riz est produite en milieu sec « upland », sans ennoiment, avec l'intérêt de ne pas émettre de méthane. Par contre la culture en rizière ennoyée facilite la préparation du sol et le repiquage, élimine les mauvaises herbes et, dans les zones de forte pluviométrie, permet d'écrêter les pluies d'orage et de diminuer les crues.

<sup>12</sup> La plante favorisant néanmoins le transfert de CH<sub>4</sub> vers l'atmosphère, il faut donc comparer avec le type de végétation établie dans la zone humide avant anthropisation. Les zones humides sont souvent saisonnières en fonction des variations hydrologiques (et/ou thermiques dans les zones froides qu'elles soient en permafrost ou pas). La végétation se développe dans ces zones humides de façon très variée. Il ne semble pas qu'il existe d'études analysant les émissions de méthane en fonction de la végétation qui s'y développe. À Madagascar, par exemple, il existe de grandes zones humides couvertes de nombreux types de roseaux. Sur les franges de ces zones humides, des populations plantent du riz aux dépens des roseaux. Il n'y pas de raison de supposer *a priori* que ces plantations de riz soient plus émettrices de méthane que les étendues de roseaux qui les entourent. Dans les zones humides du Mali ou du Burkina, les bourgoutières entrent en compétition avec des plantations de riz. Là aussi, il n'y pas de raison *a priori* pour dire que les bourgoutières émettent moins de méthane que le riz. Parmi les nombreuses espèces végétales qui se développent dans les zones humides, il n'y a pas de raison de supposer que le riz est le plus fort émetteur de méthane alors qu'il ne semble pas exister de mesure d'émissions de méthane de toutes ces espèces.



Figure 2.3 : Rizière en phase ennoyée [B. Tardieu – Académie des technologies].

Il est fréquent que le riz soit cultivé, au cours de l'année, en alternance avec des légumes ou des pommes de terre, en sec, comme à Madagascar par exemple. Même lorsque la méthode par ennoisement est utilisée, la phase d'immersion dure de 1 à 2 mois, et le sol redevient sec ensuite.

En général, la profondeur d'eau est de quelques dizaines de centimètres (jusqu'à 60 cm). Le remplissage se fait par l'eau de pluie avec, fréquemment, des systèmes de vannage d'une parcelle à l'autre. Pendant la période d'ennoisement, les archées méthanogènes en condition anaérobie produisent du méthane (Neue et Roger, 2000 ; Shearer et Khalil, 2000). Comme dans les zones humides, dont les rizières font partie, la production de méthane dépend de la quantité de matière organique contenue dans le sol. Elle est maximale lorsque les racines atteignent leur extension maximale.

La production de méthane commence quelques jours à quelques semaines après la mise en eau de la rizière. Le méthane est produit dans le sol profond. Le méthane s'échappe par les plantes elles-mêmes – aéréncyme (89 %), par bullage (10 %), ou par diffusion (1 %). La plante développe le système aéréncyme pour transporter l'oxygène vers les racines à partir desquelles l'oxygène diffuse dans le sol, tandis que le méthane fait le chemin inverse. Dans la rhizosphère (épaisseur

superficielle décimétrique du sol influencée par les racines et les microorganismes associés], le méthane produit par les archées méthanogènes dans le sol est plus ou moins oxydé par les bactéries méthanotrophes en présence d'oxygène et transformé en acide formique ou en méthanol.

Ce n'est pas le riz en soi qui émet plus de méthane qu'une autre plante, c'est le mode cultural dominant qui consiste à noyer la zone de culture et à la transformer en zone humide. Les principes de génération du méthane sont donc les mêmes que dans les zones humides naturelles. Si une zone humide naturelle est transformée en rizière, il n'y a guère de modification majeure du processus d'émission (cf. note 11 *supra*). On peut alors dire dans ce cas précis que l'impact anthropique net de la culture du riz est très faible, sauf si l'irrigation conduit à ennoyer les parcelles concernées plus longtemps qu'en état naturel. Si le riz est cultivé « en sec », comme c'est de plus en plus souvent le cas en Afrique et dans certaines régions d'Asie à cause de tensions sur la ressource en eau, il n'y pas de différence significative par rapport à d'autres céréales et pas ou très peu de méthane est émis par la culture. La modification des pratiques culturales peut conduire à une augmentation de la production de riz tout en réduisant les émissions de méthane (Conen *et al.*, 2010). Par exemple un drainage de l'eau une ou plusieurs fois au cours de la saison de croissance aère le milieu et peut entraîner une réduction de 10 à 80 % des émissions de méthane, tout en renforçant les rendements et en limitant la capacité de développement de vecteurs de maladies tropicales comme le paludisme. En moyenne, on estime qu'une rizière drainée plusieurs fois émet 50 % de méthane de moins qu'une rizière inondée en permanence, mais encore deux fois plus qu'une rizière simplement arrosée par les pluies (Conen *et al.*, 2010).

Les émissions mondiales de méthane liées aux rizières sont estimées autour de 50 Mt CH<sub>4</sub>/an, mais avec une incertitude importante, notamment due au manque de connaissances quantitatives de l'impact de l'évolution des pratiques culturales. Les estimations ont tendance à baisser avec le temps, étant plutôt autour de 80 Mt/an dans les années 1980 et autour de 30Mt/an pour les années 2000. Quelle évolution attendre ? L'amélioration des rendements conduit à diminuer la production de méthane, puisque celle-ci consomme de l'énergie qui est prélevée sur les ressources de la plante. Dans le même temps, les incertitudes sur les émissions ont aussi évolué et l'estimation de l'émission par surface unitaire s'est affinée. Les recherches sur la culture du riz portent principalement sur la capacité du riz à tolérer des sécheresses plus longues afin de limiter les variations de production

et les variations de prix, et non sur le but précis de faire baisser les émissions de méthane ! Mais il se trouve que la recherche de pratiques culturales économes en eau conduit aussi à une diminution de la quantité de méthane émise par tonne de riz produit.

Le riz joue un rôle fondamental dans l'alimentation humaine. Un cultivateur, dans un milieu donné, optimise sa production en fonction de la surface et de la morphologie du terrain dont il dispose, de la quantité d'eau disponible, du coût des intrants. La culture par ennoisement est la seule solution en zones naturellement noyées temporairement, c'est aussi une solution pour faciliter le repiquage manuel et éviter les mauvaises herbes. Ce n'est pas le riz comme céréale qui est en cause dans les émissions de méthane, c'est un type de mode cultural par ennoisement qui est passé d'une nécessité d'adaptation au milieu zone humide à un choix cultural économique dans certaines régions. On peut travailler à mettre au point des pratiques culturales qui réduisent les surfaces cultivées en ennoisement artificiel, mais le riz comme céréale ne doit pas être mis en cause.

### Animaux d'élevage et animaux sauvages (~ 17 %)

Les animaux (Johnson *et al.*, 2000) produisent du méthane par la digestion microbienne anaérobie dans leur système digestif et par la dégradation microbienne de leurs excréments notamment dans les fumiers, lisiers, etc. On notera à titre anecdotique qu'environ un tiers des humains émettent également du méthane, leur métabolisme impliquant des archées méthanogènes dans le colon (Levitt *et al.*, 2006). Les émissions mondiales de méthane dues aux animaux d'élevage sont estimées à 84 MtCH<sub>4</sub>/an (tableau 2.1). Par contre un simple argument de proportionnalité entre le nombre de ruminants sauvages (75 millions environ) et d'animaux d'élevage (1,4 milliards de bovins, 1 milliard d'ovins, presque autant de porcs et un peu moins de chèvres) conduit à estimer les émissions des premiers à environ 2 Tg/an, plutôt qu'à 15 Tg/an comme indiqué dans le tableau 1.2<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Cette estimation simple devrait être corrigée pour tenir compte du type d'alimentation : un bovin sauvage mange de l'herbe, plus humide et potentiellement plus émettrice de méthane que du fourrage sec.

Néanmoins, les ruminants sauvages contribuaient probablement plus au bilan naturel du méthane avant la période pré-industrielle, compte-tenu depuis de l'effondrement des populations de bisons en Amérique du Nord et de l'anthropisation des territoires [Chappellaz *et al.*, 1993]. Au total, les émissions des animaux représentent aujourd'hui environ 17 % du total des émissions.

La majorité des mammifères (et les hommes) dits monogastriques ne digère pas les chaînes carbonées complexes comme la lignine et la cellulose. Dans l'herbe, la lignine est difficile à digérer. C'est surtout la dégradation de la cellulose qui permet l'assimilation des chaînes carbonées produites par les végétaux grâce à la photosynthèse. Les herbivores se sont spécialisés dans la digestion de la cellulose des végétaux de façon à transformer celle-ci en nutriment grâce à la présence de la panse ou rumen. La panse et la capacité de ruminer sont les éléments essentiels de cette stratégie. Des microorganismes au métabolisme anaérobie se développent et font fermenter les végétaux. Une température très stable (39 °C), un pH stable (6,5-6,8) et le flux constant de végétaux (les bovins broutent de nombreuses heures par jour) favorisent le bon fonctionnement de ce système qui produit de l'hydrogène métabolique. Les archées méthanogènes utilisent cet hydrogène avec le CO<sub>2</sub> et produisent du méthane. Ce méthane, ainsi que le dioxyde de carbone, sont relâchés de la panse principalement par la bouche des ruminants (éructation) et absorbés par le sang. Le méthane produit dans les intestins et qui est partiellement émis par le rectum ne représente que 13 % du total. Les émissions des ruminants sauvages sont très variables, sans que l'on en connaisse la cause : nourriture, mode de vie ou autres facteurs ; par exemple les chevreuils et les lamas émettent peu. Certains primates comme les colobes, mais aussi les gorilles et les orangs-outangs, sont capables d'assimiler les feuilles.

Les très nombreux animaux qui utilisent la fermentation intestinale pour leur digestion émettent du méthane. La réduction des émissions de méthane est associée à l'amélioration de l'efficacité nutritionnelle des animaux et des pratiques d'élevage, notamment pour les animaux élevés hors-sol, en batterie. Lorsque les animaux sont élevés en prairie naturelle, c'est l'ensemble du système animal-prairie qu'il faut analyser. Les émissions d'un bœuf sont à comparer avec les émissions et les puits de l'hectare de prairie qu'il occupe. La prairie peut être puits ou source selon son degré de saturation en eau, sa température et sa concentration en azote. Le bœuf qui broute n'est qu'un des acteurs du système, il faut en analyser les intrants et les sortants : si la prairie est fauchée, le foin est exporté avec son carbone ; si la

prairie est pâturée, la viande et le lait sont exportés, mais les déjections restent ; si la prairie est naturelle, la matière végétale se dégrade en fin de saison et peut émettre du méthane, surtout si la fin de saison est humide. On n'a pas trouvé mieux qu'un ruminant en prairie naturelle, et *a fortiori* dans les grands espaces herbacés, pour transformer des matières végétales non digérées par l'homme en protéines assimilables par l'homme. Par ailleurs, on ne peut attribuer la totalité des émissions de  $\text{CH}_4$  à la seule production de viande. Une partie importante du cheptel bovin et ovin est dédiée à la production de lait et alimente l'ensemble de l'industrie lait, fromage, yaourt, produits laitiers divers. Plus de 50 % de la viande consommée en France provient des vaches laitières réformées. Le fait de consommer cette viande ne modifie pas les émissions de méthane. C'est pourquoi on rapporte parfois les émissions de méthane et leur réduction au nombre de litres de lait produit. Cependant, la production de lait est extrêmement variable selon les races et il ne faudrait pas que de tels indices conduisent à réduire le nombre de races laitières en France et dans le monde au profit des seules races ultra-spécialisées dans la production de lait<sup>14</sup>.

Les fumiers, les lisiers et l'ensemble des déchets provenant des excréments d'animaux produisent du méthane au cours de leur fermentation. Ces produits sont décomposés par les microorganismes. Si le fumier est entassé, la décomposition est anaérobie, c'est-à-dire qu'elle se déroule dans un milieu pauvre en oxygène. Il y a alors une forte production de méthane. Lorsque le fumier est épandu sur le sol, la décomposition s'effectue au contact de l'air et la plus grande partie du carbone de la matière organique est décomposée en  $\text{CO}_2$  (INRA, 2011).

<sup>14</sup> Le ruminant broute et rumine pour assimiler la cellulose. Plus la quantité de cellulose transformée en méthane est importante, plus le carbone est réémis sans participer à la croissance de la vache (ou à sa production de lait). L'ingestion et la rumination consomment de l'énergie. Si cette dépense énergétique produit du méthane, c'est au dépend de la production animale. Si la vache est nourrie non pas avec de l'herbe, mais avec des tourteaux de soja ou des résidus de poissons par exemple, donc pratiquement sans cellulose, elle émet beaucoup moins de méthane (ou pas du tout, mais il ne semble pas exister d'études publiées). Ce choix alimentaire permet de favoriser la croissance rapide de l'animal grâce à une digestion plus rapide puisque le temps pendant lequel l'herbe est transformée dans la panse est économisé.

## Les termites (4 %)

Les termites (Brockberg, 1996) représentent une source significative de méthane (jusqu'à 22 Tg/an). Les premières estimations datant du début des années 80 leur attribuaient même jusqu'à 50 Tg/an (Rasmussen et Khalil, 1983). Ils sont apparentés aux blattes ou aux cafards. Il y aurait 3 tonnes de termites par humain (un termite pèse de 3 à 5 grammes !). Ils vivent en colonies de millions d'individus organisées en castes physiquement différenciées. Ils servent de nourriture à de nombreux animaux (oiseaux, amphibiens, reptiles...). Les termites se développent préférentiellement en l'absence de rayonnement solaire, en atmosphère immobile, dans des matériaux saturés ou très humides, avec des températures élevées et stables et des concentrations de CO<sub>2</sub> élevées. Les émissions augmentent rapidement si la température augmente par rapport à la température moyenne. Fraser *et al.* (1983) estiment que les termites préfèrent habituellement une température de 10 °C supérieure à la température moyenne ambiante. Ils estiment la production à 3,2 mg CH<sub>4</sub> par gramme de bois consommé. Bien que l'action des termites soit notable dans les pays tempérés (attaque des boiseries et charpentes du bâtiment), 80 % des émissions se situent dans les zones tropicales, dans les forêts, les prairies, et les savanes, arborées ou non.

Le méthane est produit durant la digestion du fait de la dégradation de la cellulose par les microorganismes symbiotiques. Les émissions sont très variables selon les espèces et dépendent du taux d'humidité, de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>. Seiler *et al.* (1983) montrent aussi que les émissions dépendent de la taille de la termitière, de la densité de la population de termites, de leur activité et des espèces. Des travaux récents montrent que la densité de population de termites constituerait le facteur prépondérant de contrôle (Jamali *et al.*, 2011). Des variations diurnes ont été constatées. L'émission varie durant la journée avec un minimum au petit matin et un maximum en fin d'après-midi. Les mesures faites entre 1 m et 20 m du centre de la termitière montrent une décroissance de la concentration de méthane qui est interprétée comme la preuve que le méthane est décomposé par les microorganismes du sol. Le méthane atteignant l'atmosphère ne constitue en fait qu'une petite partie du méthane produit par les termites dans la termitière. Il a été montré par des analyses isotopiques que la majeure partie était oxydée par des bactéries méthanotrophes au sein même de la termitière (Sugimoto *et al.*, 1998).

## Les décharges (~ 9%)

Les décharges contrôlées ou sauvages où sont déversées toute sorte de déchets peuvent émettre des quantités importantes de méthane. Les matériaux organiques qui fermentent en milieu anaérobie sont source de méthane (Thorneloe *et al.*, 2000). Les émissions mondiales de méthane produites par les décharges sont estimées autour de 47 Tg CH<sub>4</sub>/an (tableau 2.1).

Ces décharges, outre leur laideur, polluent les eaux superficielles et souterraines, génèrent des odeurs et de la pollution de l'air. Ces raisons, en plus de leur capacité d'émission de méthane, ont conduit à leur interdiction. La circulaire européenne 1999/31/CE impose la disparition des décharges dites sauvages dans les pays de l'UE. La date de limite de mise en conformité était le 16 juillet 2009. En France, l'ADEME estime que le taux de décharges conformes est passé de 40% en 1980 à 100% en 2000. Les décharges contrôlées (ou centres d'enfouissement technique) prévoient d'isoler le dépôt vers le bas par de l'argile et/ou des géomembranes pour éviter la pollution des nappes par les lixiviats et vers le haut pour éviter la pollution de l'air et les émissions de méthane. Le méthane est collecté (ou devrait l'être); il est alors soit brûlé par des torches et ainsi transformé en CO<sub>2</sub>, soit utilisé comme combustible. En général, le méthane n'est pas assez pur pour être utilisé directement dans un réseau. Sa concentration doit être supérieure à 30% des gaz émis pour qu'il soit utilisable ainsi. Il est aussi possible de recouvrir les décharges par une couverture de terre où des colonies de bactéries méthanotrophes consomment le méthane émis dans la décharge (Bogner *et al.*, 2007).

La récupération du méthane issu des décharges est développée au Royaume-Uni, en Italie, au Canada. En France, les bus de la communauté urbaine de Lille sont alimentés par le méthane issu de la fermentation des déchets urbains. Les déchets agricoles fermentés dans des cuves étanches constituent également une source de méthane qui est, cette fois-ci, récupérée en totalité comme ressource énergétique (biogaz utilisé pour le chauffage d'installations agricoles par exemple) et donc transformée *in fine* en CO<sub>2</sub>. Aux États-Unis et au Canada, le nombre de décharges est encore élevé, mais la tendance est aussi à récupérer le méthane et à le torcher ou à l'utiliser. De nombreuses torchères insuffisamment alimentées en air laissent échapper une quantité importante de méthane.

Dans les pays émergents, les décharges ont souvent des dimensions gigantesques. Des familles en vivent, faisant un tri sélectif élaboré pour recycler tout ce qui peut avoir une valeur marchande. Le système de tri est en général très hiérarchisé. Dans le dépôt, les déchets organiques et végétaux non récupérables sont entassés et ce sont eux qui, en fermentant, peuvent produire du méthane.

Si les dépôts sont non compactés et fréquemment retournés, la fermentation est aérobie et produit de l'eau et du  $\text{CO}_2$ . Si les dépôts sont compactés et recouverts rapidement, l'oxygène est rapidement consommé dans la masse et la fermentation est anaérobie : elle produit du  $\text{CO}_2$  et du méthane<sup>15</sup>. Cependant, le méthane en s'échappant traverse la partie superficielle du dépôt et est partiellement oxydé en  $\text{CO}_2$ .

La production de méthane dépend du pH, du taux d'humidité et de la température. Le pH favorable est situé entre 6,8 et 7,4. Le développement d'acides carboxyliques provoque des pH bas qui limitent les émissions de méthane. Notons que la récupération industrielle du méthane valorise sa production. En effet, un

<sup>15</sup> Tout le monde connaît la fermentation du glucose en alcool avec émission de  $\text{CO}_2$  (les bulles du champagne, du cidre...), puis en acide acétique, le vinaigre. Le processus est beaucoup plus complexe pour la cellulose et pour les protéines. Pour que la fermentation se produise, il faut la présence de trois groupes trophiques de procaryotes anaérobies :

- ▶ un premier groupe provoque l'hydrolyse des polymères biologiques initiaux pour produire des sucres solubles, des aminoacides, des chaînes longues d'acides carboxyliques, des glycérols. Il s'agit du début de la décomposition qui conduit à des chaînes courtes d'acides carboxyliques, de l'alcool, du  $\text{CO}_2$ , de l'hydrogène et des acétates, précurseurs du méthane ;
- ▶ le deuxième groupe convertit ce qui est produit par le premier groupe en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , acide acétique et des intermédiaires de fermentation : butyrates, propionates, éthanol. Cette partie de la fermentation est thermodynamiquement favorable à très faible concentration d'hydrogène, donc en association synthrope avec des consommateurs d'hydrogène comme le méthane ;
- ▶ le troisième groupe inclut les archées méthanogènes. Les substrats sont l'acétate, le formate, le méthanol, les méthylamines,  $\text{H}_2$  et  $\text{CO}_2$ .

L'établissement de la population microbiologique peut prendre des mois.

industriel qui a investi pour récupérer le méthane et le valoriser cherche à produire le maximum de méthane avec son installation puisque c'est ainsi qu'il en tire de la valeur. Les déchets alimentaires ou organiques, les feuilles, le gazon coupé fermentent assez facilement, comme en témoigne la valorisation du biogaz dans les exploitations agricoles. Le bois et la lignine en général fermentent lentement. La cellulose et l'hémicellulose entourées de lignines fermentent très lentement. C'est le cas du bois.

L'évaluation des émissions de méthane est très imprécise. À partir du contenu d'une décharge (à supposer qu'on le connaisse), on peut évaluer le potentiel de production de méthane. Cependant, comme cela a déjà été dit, les conditions de production de méthane peuvent ne pas être réunies. Notons enfin que les grandes décharges brûlent souvent. Il peut s'agir de la combustion du méthane spontanément allumé comme le sont les feux-follets. La combustion lente qui suit peut également émettre du méthane comme cela est montré au paragraphe relatif aux feux de forêts et à la culture sur brûlis.

### Combustion de la biomasse (~ 8 %)

Lorsque la combustion est complète, le fait de brûler de la biomasse a un impact climatique sur une échelle de temps qui n'est pas comparable à celle de la croissance de la biomasse de remplacement. Le carbone piégé par assimilation chlorophyllienne durant la croissance de la plante est restitué sous forme de dioxyde de carbone selon la réaction (cf. Levine *et al.*, 2000) :



C'est pourquoi l'usage de la biomasse comme combustible est considéré comme neutre pour des plantes à croissance rapide et en l'absence de phénomènes de déplacement de l'utilisation des sols. Cependant, la combustion est rarement complète et parfaite. La combustion incomplète produit du monoxyde de carbone CO, du méthane, des hydrocarbures, des particules de carbone, des composés soufrés... Par exemple, la fabrication (traditionnelle ou moderne) du charbon de bois consiste à chauffer le bois à l'abri de l'oxygène, ce qui produit du méthane.

Les émissions mondiales de méthane dues à la combustion incomplète de la biomasse sont estimées à 47 Mt CH<sub>4</sub>/an avec une grande incertitude (14-88 Tg/an,

tableau 2.1), soit 8 % du total des émissions<sup>16</sup>. Cette estimation résulte d'une combinaison de modèles de végétation, de facteurs d'émission souvent déterminés en laboratoire et de données spatiales de zones de feux et de surfaces brûlées. L'évolution du monoxyde de carbone (un autre gaz-trace produit par la combustion incomplète de la biomasse) dans l'atmosphère australe au cours des derniers siècles suggère des émissions beaucoup plus importantes au XIX<sup>e</sup> siècle, en raison probablement des pratiques agricoles et de l'usage anthropique dominant du combustible végétal (Wang *et al.*, 2010). À l'échelle interannuelle, certaines variations dans le taux d'augmentation du méthane atmosphérique ont été attribuées à celles de l'étendue et de l'intensité des feux de biomasse, comme les pics d'émissions des années 1998 et de 2002-2003 (Simmonds *et al.*, 2005 ; Simpson *et al.*, 2006).

La combustion incomplète de la biomasse est présente dans deux situations fréquentes : la culture sur brûlis et les incendies de forêts. Une autre source à prendre en compte est l'utilisation des biofuels.

L'agriculture itinérante sur brûlis (essartage et écobuage) est encore pratiquée par un demi-milliard de paysans. Cette technique consiste soit à brûler les broussailles (notamment celles qui résultent de la mise en jachère) pour obtenir la pousse de prairies comestibles par le bétail, soit à restaurer la fertilité des sols grâce à la combustion lente de matériaux organiques (CIRAD, 2008), soit à défricher avant mise en culture. Durant la période de jachère, les herbes et broussailles poussent. Le feu nettoie la parcelle et permet de la remettre en culture. Durant la phase de brûlage à haute température avec flammes, la combustion est quasi complète. Durant la phase de combustion lente qui suit, la combustion est incomplète et du méthane est émis. La phase avec flammes dure quelques minutes tandis que la phase de combustion lente dure jusqu'à une heure et plus selon le type de végétation brûlé. Ce modèle agraire a été souvent critiqué depuis le sommet de Rio (1992). Des recommandations de modification des pratiques culturales et d'introduction d'engrais ont été émises sans que des financements soient associés à ces recommandations. La pratique de la culture sur brûlis est fréquente en Afrique, en Asie, en Amérique dans des systèmes agricoles et des biotopes très différents.

<sup>16</sup> Ces chiffres incluent aussi l'utilisation de biofuels incomplètement brûlés pour la cuisine, notamment en Afrique et en Asie (estimation : 10 à 15 Tg/an).

Toutefois, des études récentes effectuées au nord du Laos sur des parcelles de riz pluvial conduisent à la conclusion inverse. L'agriculture itinérante sur brûlis pratiquée sur les versants de forts dénivelés favoriserait le stockage du carbone par le sol (Chaplot *et al.*, 2008). Par ailleurs, lors du brûlage, les souches sont laissées en place et les racines limitent l'érosion des sols superficiels riches en matériaux fins et en matières organiques, qui ainsi restent dans le sol au lieu de migrer vers les rivières, puis vers la mer. Il ne faut pas oublier que le sol sec est un puits de méthane. La savane africaine sèche est vraisemblablement un puits de méthane, même si elle est brûlée tous les 3 ou 4 ans. Dans certaines régions, le brûlis est réalisé sous futaie pour conserver l'ombre.

Les incendies de forêt fonctionnent de la même façon. La période de flamme à haute température est une combustion complète, elle dure de l'ordre d'une heure. La combustion lente dure ensuite une journée ou plus. Parfois un vent violent fait redémarrer le feu après plusieurs jours. La forêt méditerranéenne, en particulier, a développé des espèces adaptées aux incendies qui surviennent plusieurs fois durant la vie de l'arbre. Les forêts tempérées et boréales ont toujours brûlé, cependant l'analyse des 50 dernières années montre une augmentation des feux de forêts notamment dans la zone boréale (Canada, Alaska, Scandinavie, Sibérie ; cf. Goldammer, 2001). En Sibérie, premier exportateur mondial de bois, la modification des pratiques d'exploitation et un manque de soin associé à la fin du système soviétique pourraient avoir autant d'impact sur les incendies que la température d'été ou le raccourcissement de la période d'enneigement. Il y a aussi des forêts qui sont brûlées délibérément afin de convertir le sol ainsi libéré en zones de cultures. L'évaluation de la différence entre les émissions de méthane de la zone forestière et les émissions après modification de l'usage ne peut être faite qu'au cas par cas.

Les raisons qui conduisent à protéger la forêt ressortissent plus à la protection de la biodiversité et à la protection de la qualité des eaux qu'à la modification des émissions de méthane. Il ne faut pas non plus négliger l'aspect économique : le charbon de bois est utilisé à la fois comme combustible et comme carbone dans la fabrication de l'acier et de la fonte de qualité, avec l'intérêt qu'il ne contient pas de soufre. Le Brésil est le premier producteur mondial de charbon de bois, dont la production est souvent artisanale.

## Les sources géologiques (entre 2 % et 10 %)

Du méthane peut être émis par suintement ou dégazage (*seepage*) dans les bassins sédimentaires marins ou terrestres et par émissions de type volcanique et géothermal. Une partie de ce méthane émis est fossile (au sens où il est dépourvu de carbone 14 et a donc été formé il y a plus de 50 000 ans) mais une autre partie peut être contemporaine et se former biologiquement dans les sédiments avant possible relargage dans l'atmosphère par bullage au travers de la colonne d'eau. On l'appelle toutefois « géologique » car son transfert vers l'atmosphère implique un processus géologique.

Les suintements dans les bassins sédimentaires sont généralement composés par du méthane (80-99 %) à basse température. Ces émissions se manifestent par différents phénomènes : volcans de boues continentaux, suintements à grande échelle dans certaines plaines (*onshore seeps*), micro-fuites continentales, ou bien macro-fuites des fonds océaniques et des volcans de boues sous-marins (figure 2.4).

Les émissions volcaniques et géothermales sont caractérisées par des gaz chauds comportant essentiellement du CO<sub>2</sub> et de l'eau, dans lesquelles le méthane produit est soit thermogénique soit inorganique. En présence de zones magmatiques, on parlera d'émissions volcaniques, alors qu'en l'absence de zones magmatiques récentes, on parlera d'émissions géothermales.

L'estimation de ces sources reste très incertaine. Le tableau 2.1 donne le chiffre de 9 Tg/an (soit 2 % des émissions totales), mais un effort de synthèse au cours des dernières années a revalorisé les émissions moyennes entre 20 et 60 Tg/an (figure 2.4) soit entre 3 % et 10 %. Les grandes réserves d'hydrates de méthane des marges continentales peuvent être en partie regroupées dans cette famille des sources géologiques, mais contribuent très peu pour le moment dans les nouvelles estimations. L'existence de courants de turbidité sur les talus continentaux ou la déstabilisation d'hydrates par un tremblement de terre constituent en effet des origines géologiques de méthane (lui-même le plus souvent d'origine biologique) susceptible d'atteindre l'atmosphère. Ces phénomènes sont très mal quantifiés, mais pourraient aussi contribuer à hauteur de quelques Tg/an aux émissions atmosphériques. Les modalités d'une possible libération de méthane à partir de ce réservoir important ne font pas l'unanimité à ce jour au sein de la communauté scientifique. Il intéresse désormais les compagnies pétrolières à la recherche de nouvelles ressources énergétiques.

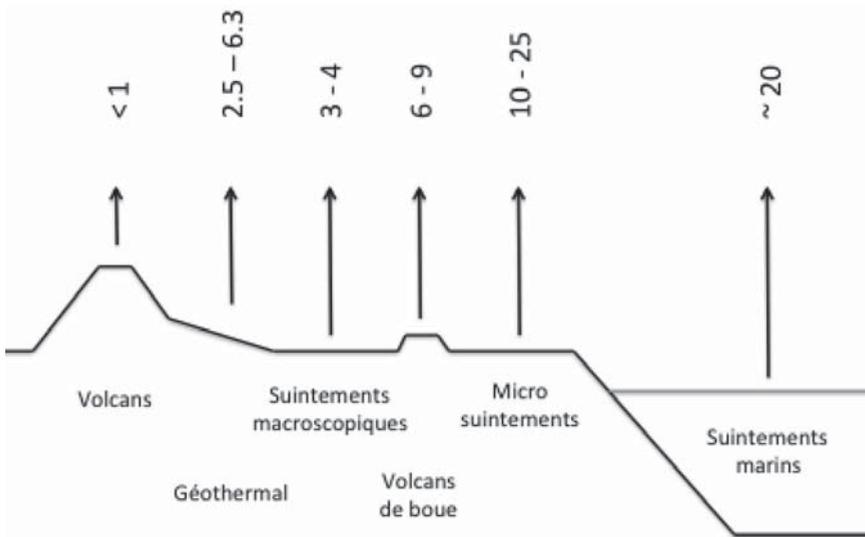


Figure 2.4: Estimation des émissions de méthane à partir de diverses sources de nature géologique [tiré de Reay *et al.*, 2010].

## Les combustibles fossiles (~ 17 %)

Du méthane est émis par l'exploitation du charbon, du pétrole et du gaz, ainsi que pendant le transport et l'utilisation du gaz naturel. C'est une émission de type géologique et fossile mais due à l'activité humaine. Les émissions mondiales de méthane produit par les combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole) et par l'industrie sont estimées autour de 97 Mt/an [tableau 2.1].

### Le charbon (~ 6 %)

Les mines de charbon sont exploitées depuis des siècles. Près de la moitié (44 % en 2010) de l'électricité mondiale est produite grâce à la combustion du charbon et la croissance a été de 7 % en 2010. Les coups de grisou meurtriers, c'est-à-dire l'auto-inflammation accidentelle du méthane en forte concentration (il forme un mélange explosif avec l'air à des teneurs comprises entre 5 et 15 %), sont inscrits dans la culture des mineurs de charbon du monde entier.

Le méthane est produit durant le processus de constitution du charbon en fonction de la composition de la matière organique initiale et des conditions d'enfouissement de cette matière organique (Kirchgessner, 2000). On retrouve au départ les règles déjà décrites de la fermentation anaérobie, suivie d'une pyrolyse à haute température et d'une migration au travers des roches jusqu'à des couches imperméables. Le méthane ainsi généré ne peut trouver d'espace dans les filons de charbon et migre dans le massif rocheux. Lors du creusement de la mine, la pression de confinement dans le massif baisse et le méthane diffuse dans les fissures qui s'élargissent ; il s'échappe alors dans la mine ou dans l'atmosphère. Le relâchement des pressions de confinement peut aussi être provoqué par l'action de la tectonique (par exemple au Chili dans la zone de subduction). Le méthane sort par les puits de ventilation : de grandes quantités d'air sont introduites dans la mine pour maintenir le méthane à un taux inférieur à 0,5 %. Malgré le faible taux de méthane, les quantités relâchées sont importantes. Pour en éviter la diffusion, des forages de drainage sont réalisés dans le massif. En Europe, ce méthane drainé est très généralement utilisé comme combustible. Aux États-Unis, le méthane est très généralement relâché dans l'atmosphère. Les Britanniques ont évalué que 40 % du méthane est relâché après avoir quitté la mine, par désorption, durant l'ensemble du processus industriel.

Il n'y a que très peu de mesures permettant de chiffrer les émissions. Globalement, il n'y a pas de mesures pour les mines à ciel ouvert. Dans les mines, les mesures sont orientées vers la sécurité et non vers la réduction des émissions. Or l'usage du charbon est croissant et va continuer à croître longtemps car c'est le combustible fossile avec les plus grosses réserves et le mieux réparti entre les continents. Il joue durablement un rôle majeur dans le paysage énergétique planétaire. La consommation mondiale de charbon a été en 2005 de 6 483 millions de tonnes par an, et elle a crû de 23 % depuis 1990. Les principaux consommateurs de charbon sont (en Tg ou millions de tonnes par an, et en variation entre 1990 et 2005) :

- ▶ Chine : 2 333 Tg/an ; + 108 %
- ▶ États-Unis : 1 125 Tg/an ; + 24 %
- ▶ Inde : 507 Tg/an ; + 105 %
- ▶ Allemagne : 273 Tg/an ; -33 %
- ▶ Russie : 258 Tg/an ; -36 %

D'une façon très approximative, les émissions de méthane correspondantes ont été évaluées par pays en 1990 :

- ▶ Chine : 8 à 16 Tg/an
- ▶ Ex URSS : 5 à 8 Tg/an
- ▶ États-Unis : 3 à 6 Tg/an
- ▶ Allemagne : 1 Tg/an
- ▶ Pologne : 1 à 3 Tg/an
- ▶ Royaume-Uni : 1 Tg/an

Globalement, l'émission des mines de charbon de la planète représenterait de l'ordre de 36 Tg CH<sub>4</sub>/an (tableau 2.1), soit 6 % du total des émissions. Elle a probablement augmenté depuis dix ans, mais le manque d'information sur l'exploitation du charbon dans certains pays émergents rend difficile la réduction des incertitudes.

### **Le gaz naturel (~ 11 % , chiffre commun avec le pétrole et l'industrie)**

Le gaz naturel est essentiellement du méthane, donc toutes les fuites au cours du creusement des puits, de l'exploitation, du transport, du stockage, de la distribution contribuent aux émissions.

On distingue les émissions fugitives (vannes, soupapes...) et les émissions intermittentes provoquées par l'entretien et la maintenance (ce qui suppose en général de purger et vider les tuyaux). Des fuites peuvent apparaître durant les opérations de forage des puits lorsque les bonnes pratiques ne sont pas appliquées, ainsi que durant l'extraction et les procédures de déshydratation, de séparation liquide/gaz, etc. Durant le transport, des fuites apparaissent dans les gazoducs, du fait de la corrosion ou de défauts de fabrication, de soudage, ou de matériaux. Les mouvements de sol (glissements de terrains, séismes, mouvements tectoniques) provoquent également des fuites. L'industrie a développé des technologies et des pratiques visant à minimiser ces fuites, étant donné que la valorisation du méthane est l'essence de son métier.

Très approximativement, les émissions de l'industrie du gaz seraient comprises entre 30 et 60 Tg/an, du même ordre de grandeur que pour le charbon, et pour des parts équivalentes dans la consommation mondiale d'énergie (approximativement  $120 \times 10^{12}$  MJ/an pour le gaz et  $130 \times 10^{12}$  MJ/an pour le charbon). Aujourd'hui la part des fuites serait faible, de l'ordre de quelques Tg/an. Il n'en a pas toujours été de même. En ex-Union soviétique, on estime que dans les années 80, les fuites depuis le vieux réseau de gazoducs pouvaient atteindre 31 à 45 Mt/an (Reshetnikov *et al.*, 2000).

Récemment, les exploitations de gaz de roche-mère ont modifié de façon importante l'exploitation mondiale du méthane. Elles ont pu être associées à des émissions supplémentaires de méthane à l'occasion de l'ensemble des phases d'exploration, d'exploitation et de transport de ce gaz. Les fuites de transport et d'exploitation sont *a priori* de même nature que les fuites traditionnelles de l'industrie du méthane. Le cas des émissions en phase d'exploration et de développement est mal connu, mais fait l'objet de diverses publications scientifiques (voir par exemple Tollefson, 2013) encore contradictoires<sup>17</sup>. Il convient en outre de ne pas confondre les émissions induites par l'exploitation de ces réservoirs avec les émissions naturelles de gaz en provenance de réservoirs d'hydrocarbure. Ainsi, en 2012, des études géochimiques ont montré, dans la situation géologique particulière du « Marcellus », aux USA, que des échanges naturels avec les nappes phréatiques de faible profondeur pouvaient se faire à partir des réservoirs de roche-mère, qui sont ceux que l'on exploite pour la production de ces gaz.

Actuellement au niveau mondial, la partie *vented and flared*, c'est-à-dire torchée et émise dans l'atmosphère, serait de 15 à 30 Tg/an. En 2004, par exemple, les quantités émises directement dans l'atmosphère et les quantités torchées ne sont pas distinguées. Or le méthane torché est transformé en CO<sub>2</sub> (ce qui évite l'effet de serre intense du méthane durant les 8 à 10 ans qui précèdent sa transformation atmosphérique en CO<sub>2</sub>). Il existe un effort d'observation par satellite du gaz torché dans le monde, assuré par la NOAA, dont les chiffres sont aussi utilisés par le « Partenariat mondial pour la réduction des gaz torchés » appelé GGFR. La Banque mondiale, sur la base des chiffres de la NOAA, indique que la quantité de gaz torché a diminué en tendance de 20 % depuis 2005.

Dans le cas du gaz naturel liquéfié (GNL), l'opération industrielle dans les sites de liquéfaction ou de gazéification et lors du transport est bien contrôlée ; le méthane dégagé est généralement torché ou récupéré.

Les accidents comme celui du gisement de méthane Elgin en mer du Nord début 2012 produisent des émissions temporaires de grandes quantités de méthane, mais qui ne modifient cependant pas sensiblement le bilan mondial des émissions

<sup>17</sup> Il est à noter que l'Académie des sciences et l'Académie des technologies ont entamé un travail d'évaluation spécifique sur les gaz de schistes, travail qui permettra, entre autres, de faire le point sur cette question des fuites de méthane.

industrielles. L'accident d'Elgin a été réparé en un temps record (accident le 25 mars, obturation du puits le 16 mai) : durant cette période, les émissions étaient estimées à 200 000 m<sup>3</sup> par jour<sup>18</sup>, en diminution sensible avec le temps.

### **Le pétrole (~ 11 % chiffre commun avec le gaz et l'industrie)**

Il n'y a peu de données concernant les émissions de méthane de l'industrie pétrolière. On les estime toutefois à quelques Mt/an au maximum dans les inventaires d'émission<sup>19</sup>. Les torchères qui brûlent sur les champs pétroliers, sur les raffineries, sur les plates-formes offshore et les navires FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) sont la preuve qu'il y a du méthane émis et qu'il est transformé pour l'essentiel en CO<sub>2</sub>. Les pétroliers se préoccupent de façon croissante de ce méthane, soit pour le réinjecter dans les puits et pallier la déplétion du gisement, ou pour l'exploiter soit dans les turbines à gaz du site, soit dans des installations voisines.

### *Deux sources potentielles de méthane : le pergélisol des zones humides arctiques et les hydrates de méthane marins*

Le pergélisol (*permafrost* en anglais) désigne un sol dont la température est en permanence en dessous de 0 °C au moins deux années de suite. Le pergélisol couvre 25×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, soit un quart des surfaces émergées dans l'hémisphère nord. Cette surface a atteint un maximum il y a environ 18 000 ans à l'époque du dernier maximum glaciaire et son minimum il y a 6 000 ans. Un minimum relatif est apparu durant le Moyen-Âge (« optimum climatique médiéval » aux x<sup>e</sup>-xiv<sup>e</sup> siècles). Les zones frontières du pergélisol, généralement vers le sud et l'ouest, ont donc déjà expérimenté des cycles longs de gel et dégel.

Le sol des régions de hautes latitudes, en particulier lorsque le climat est continental, subit des cycles thermiques annuels présentant des écarts importants. En cas de réchauffement par rapport à l'état climatique moyen, le pergélisol superficiel peut dégeler chaque année sur une épaisseur de quelques centimètres à quelques décimètres. L'eau superficielle est alors liquide et l'activité biologique et végétale se développe. La couche qui gèle et dégèle chaque année est appelée couche active ou mollisol. Dans les zones humides boréales, les émissions de méthane

<sup>18</sup> Soit de l'ordre de 130 tonnes par jour.

<sup>19</sup> Cf. [www.edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42](http://www.edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=42).

se produisent comme dans les autres zones humides. La production de méthane augmente lorsque la température superficielle augmente du fait de l'insolation et de la diminution de l'albédo du sol lorsque le couvert neigeux laisse place au sol sombre. Ceci est également vrai des sols dont la température moyenne est légèrement supérieure à 0 °C, mais qui de la même façon gèlent profondément en hiver et dégèlent en été. Les cartes 2.5 et 2.6 montrent les limites du pergélisol respectivement en Russie et pour l'ensemble de l'Arctique. Notons qu'il y a des pergélisols isolés dans les Alpes au-dessus de 2 500 m à l'ubac.



Figure 2.5 : Répartition du pergélisol en Russie.

Une augmentation progressive des durées de dégel et des températures du pergélisol le transformant en mollisol et potentiellement en zone humide conduirait à un accroissement des émissions de méthane provenant des zones humides en général.

À ce phénomène progressif peut s'ajouter un autre phénomène : on peut s'attendre à ce que le réchauffement conduise à une déstabilisation des hydrates de méthane présents à grande profondeur (plusieurs centaines de mètres en milieu terrestre) dans le pergélisol. Cependant, il règne une grande incertitude sur la constante du temps que prendra cette déstabilisation. Les premières zones susceptibles d'être affectées sont les plateaux continentaux en marge de l'océan arctique, envahis par

l'océan il y a environ 10 000 ans lors de la dernière déglaciation. La surface du plateau continental, alors constituée de pergélisol, a subi un réchauffement important (probablement supérieur à 20 °C). Mais l'effet du réchauffement sur la stabilité des hydrates se trouve contrecarré par l'augmentation de pression due à la montée du niveau de l'océan (Romanovskii *et al.*, 2005). On a récemment observé localement des émissions massives de méthane provenant de larges zones de débullages, de l'ordre du kilomètre de diamètre, dans les eaux du plateau sibérien oriental (Mason, 2012). Les concentrations locales de méthane y étaient multipliées par 100, laissant à penser que ce phénomène prendrait place aujourd'hui. Cependant ces zones d'émissions n'apparaissent pas sur les cartes de concentration globale de méthane obtenues par satellites et il semblerait que c'est plutôt le réchauffement progressif des sédiments depuis le dernier âge glaciaire qui provoque ces émissions plutôt que le réchauffement anthropique récent. L'ensemble des mécanismes d'émission de méthane à partir du pergélisol continental est analysé en détail au chapitre 4.



Figure 2.6 : Répartition du pergélisol sur l'ensemble des zones arctiques.

Une autre source potentielle d'émissions de méthane, cette fois-ci uniquement en milieu océanique, est susceptible de contribuer au bilan du méthane : les hydrates de méthane trouvés généralement sous des profondeurs d'eau excédant 500 m, c'est-à-dire là où la pression est suffisamment élevée pour qu'ils soient thermodynamiquement stables. Ils sont analysés plus en détail au chapitre 4.

## LES PUIITS DE MÉTHANE

Les chiffres entre parenthèses font toujours référence au tableau 2.1 mais cette fois en matière de destruction de méthane (total mondial estimé à 536 Tg CH<sub>4</sub>/an).

### Les sols (~ 6 %)

Les sols sont la surface des terres émergées, soit 149,4×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> (29,3 %). Si on en retire les 14,1×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> de l'Antarctique, on obtient les 135×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> parfois qualifiés de surface habitable. Cette surface est très approximativement divisée en 1/3 pour les forêts, 1/3 pour les zones désertiques et 1/3 pour la culture et l'élevage. Le GIEC estime que, à l'échelle planétaire, les sols constituent un puits de méthane de 30 millions de tonnes par an (30 Tg/an, à environ 15 % près, tableau 2.1). Cela représente environ 6 % du puits total de méthane.

Les sols contiennent des microorganismes qui peuvent soit produire du méthane (méthanogénèse), soit en consommer (méthanotrophie) et le transformer en composés organiques secondaires (dont le CO<sub>2</sub>). La part relative de ces deux transformations dépend au premier ordre de la teneur en eau du sol. Dans un sol saturé en eau (zones humides, rizières), c'est la méthanogénèse qui l'emporte. Lorsque les matières organiques se décomposent dans les sols submergés ou détremés, l'eau limite la circulation d'oxygène, ce qui permet l'apparition de zones anoxiques et provoque la libération de méthane. Que ce soit dans les forêts, les prairies ou les cultures, la clé du système est bien la teneur en eau du sol et secondairement sa température.

Contrairement aux zones humides et aux rizières qui émettent des quantités importantes de méthane, les sols sont en moyenne considérés comme des puits de méthane, soit qu'ils oxydent en CO<sub>2</sub> le méthane produit dans une couche inférieure, diminuant ainsi son émission, soit qu'ils réagissent avec le méthane atmosphérique et l'absorbent.

Cependant l'usage des sols peut avoir un fort impact sur le comportement du sol lui-même, qui peut agir comme puits ou comme émetteur. Le fait de transformer une forêt en zone agricole tend à augmenter la concentration en azote qui inhibe l'oxydation du méthane dans le sol, réduit le puits du méthane et peut même favoriser son émission. Ces changements sont non symétriques :

transformer une terre arable en forêt ou en prairie permet de stocker 25 tonnes de carbone par hectare en 100 ans ; à l'inverse, transformer une prairie en sol arable déstocke 25 tonnes par hectare en 100 ans. Dans le cas d'une forêt, c'est environ 30 t/ha par an. Une bonne part de ce déstockage se fait par émission de méthane.

Comme cela a été dit dans le cas des rizières, le drainage des sols a aussi un fort impact sur le comportement des sols. Par l'action des zooplanctons et des phytoplanctons, le carbone organique apporté par le délavage des sols organiques, par les feuilles et les branches, est piégé dans les sédiments (la masse des sédiments lacustres serait ainsi supérieure à la masse organique de la totalité des forêts). Dans les forêts, le sol est fréquemment un puits de méthane car les racines, par leur aspiration, rabattent la nappe et désaturent le sol superficiel, ce qui est favorable au développement de bactéries méthanotrophes et à l'oxygénation du sol. Par contre, lors des périodes de pluies ou de crues, le sol se sature, les archées méthanogènes se développent et le sol émet du méthane. Si l'épaisseur d'eau augmente, le méthane n'est plus émis en totalité, car tout ou partie du méthane produit est oxydé au cours de sa remontée vers la surface.

### L'atmosphère (94 %)

Le méthane est détruit dans l'atmosphère par plusieurs processus. Le principal puits de  $\text{CH}_4$  est dû à sa réaction avec le radical hydroxyle OH dans la troposphère (450 à 550 Mt/an) et dans la stratosphère (10 à 50 Tg/an). Ce puits détruit environ 90 % du méthane émis chaque année. Le radical OH détermine la capacité oxydante de l'atmosphère et est connu pour être l'agent nettoyant de la basse atmosphère et plus précisément de ses polluants gazeux ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  et les différents composés organiques volatils).

OH est essentiellement produit par photolyse de l'ozone puis par réaction de l'oxygène atomique produit dans un état excité avec la vapeur d'eau. La concentration moyenne globale du radical OH est d'environ  $10^6$  molécules/cm<sup>3</sup>, avec des fluctuations de plusieurs ordres de grandeurs autour de cette valeur moyenne à cause du rayonnement disponible, de l'ozone, de la vapeur d'eau, des composés carbonés, du rapport  $\text{NO}_x / \text{CO}$ ... On trouve les plus fortes concentrations du radical OH dans la troposphère tropicale, le jour en été, et les plus faibles aux

hautes latitudes la nuit en hiver. Le méthane est ainsi surtout détruit aux altitudes moyennes de la troposphère entre les deux tropiques. S'il est possible de mesurer directement les concentrations de OH, la représentativité de ces observations reste très faible à cause de sa courte durée de vie, de l'ordre de la seconde.

Pourtant la connaissance de la concentration en OH est essentielle pour calculer le puits de nombreux gaz de l'atmosphère, dont le méthane, et ainsi équilibrer leurs cycles. D'une part, l'utilisation de composés dont on connaît bien les émissions et qui n'ont qu'une seule réaction de destruction avec OH (comme par exemple le méthyl-chloroforme, MCF,  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ) permet d'estimer les concentrations du radical OH et leur évolution à grande échelle (Bousquet *et al.*, 2005). D'autre part, l'utilisation de modèles de chimie atmosphérique permet de calculer les concentrations du radical OH qui est au cœur des chaînes réactionnelles de l'atmosphère. Ces deux approches sont complémentaires et s'accordent maintenant assez bien pour représenter la variabilité interannuelle de OH (<3%) pour les années 2000, mais pas pour les décennies précédentes pour lesquelles la méthode utilisant le MCF surestime la variabilité de OH à cause d'une trop grande sensibilité aux émissions de MCF (Montzka *et al.*, 2011). La valeur moyenne de OH est encore assez incertaine (connue à  $\pm 30\%$ , Lawrence *et al.*, 2001), difficile à atteindre au regard de la courte durée de vie de ce radical.

Il semble que OH ait augmenté de 60% au cours du dernier siècle (Lelieveld *et al.*, 2002). Les prévisions pour le futur dans un climat plus chaud et plus humide devraient conduire à une croissance des concentrations de OH (Lamarque *et al.*, 2005). L'évolution de la concentration de méthane dépendra des sources et des puits qui, les uns comme les autres, dépendent du changement climatique, mais les différents modèles conduisent plutôt à une diminution de la durée de vie du méthane au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

D'autres processus que ceux décrits ci-dessus peuvent aussi intervenir, comme entre autres ceux liés à la présence de radicaux chlorés dans la couche limite de l'atmosphère (Allan *et al.*, 2007).

## RÉFÉRENCES

1. Allan W.H. Struthers and Lowe D.C. : *Methane carbon isotope effects caused by atomic chlorine in the marine boundary layer: Global model results compared with Southern Hemisphere measurements*, *J. Geophys. Res.-atmos.* **112**, 2007.
2. Aselman, I., et Crutzen, P.J., *Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions*, *J. Atmos. Chemistry* **8**, 307-358, 1989.
3. Bambace, L.A.W., Ramos, F.M., Lima I.B.T., and Rosa, R.R., *Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams*, *Energy* **32**, 1038-1046, 2007.
4. Bartlett, K.B., Crill, P.M., Bonassi, J.A., Richey, J.J., et Harris, R.C., *Methane flux from the Amazon River floodplain: Emissions during rising waters*, *J. Geophys. Res.* **95**, 16,773-16,788, 1990
5. Bogner *et al.*, Chapter 10, IPCC WGIII, 2007.
6. Boone D.R., *Biological formation and consumption of methane, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane: its role in global environment*, 2000.
7. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustaine D.A., Prigent C., Van der Werf G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathiere J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C. and White J. : *Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability*, *Nature* **443**, 439-443, 10.1038/nature05132, 2006.
8. Bousquet P., Hauglustaine D.A., Peylin P., Carouge C. and Ciais P., 2005, *Two decades of OH variability as inferred by an inversion of atmospheric transport and chemistry of methyl chloroform*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **5**, 2635-2656.
9. Brockberg G., *Termites as a source of atmospheric methane*, disponible sur [www.iitap.iastate.edu](http://www.iitap.iastate.edu) 1996.
10. Chappellaz, J.A., Fung I.Y., et Thompson, A.M., *The atmospheric CH<sub>4</sub> increase since the last glacial maximum*, *Tellus* **45B**, 226-241, 1993
11. Chaplot V., Podwojewski P., Phachomphon K. and Valentin C., *Spatial variability and controlling factors of soil organic carbon under steep slopes of the tropics*, *Soil Science Society of America Journal*, 2008.
12. Chen, Y.H., et Prinn, R.G., *Estimation of atmospheric methane emissions between 1996 and 2001 using a three-dimensional global chemical transport model*, *J. Geophys. Res.* **111**, D10307, 2006 (doi: 10.1029/2005JD006058)
13. CIRAD, Symposium « Soil Carbon Sequestration » , 2008.

14. Coe, 1998, *A linked global model of terrestrial hydrologic processes : Simulation of modern rivers, lakes and wetlands*, *J. of Geophys. Res.* 103, 8885-8899, 1998, cité by Matthews in Khalil [ED].
15. Conen F., Smith K.A. and Yagi K., 2010, *Methane from rice cultivation*, in : Reay D. et al. (eds.), *Methane and Climate Change*, Earthscan, London, UK, pp. 115-135.
16. Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, Ph., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P.L., Wofsy, S. C., and Zhang, X., *Couplings between changes in the Climate system and biogeochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2007.
17. Engle D. and Melack J.M., 2000, *Methane emissions from an Amazon floodplain lake : Enhanced release during episodic mixing and during falling water*, *Biogeochemistry* 51, 71-90.
18. Fraser et al., *Termites and global methane - Another assessment*, *Journal of Atmospheric Chemistry* 4 (1986) 295-310 by Reidel D. Publishing Company.
19. Fuller D.Q., van Etten J., Manning K., Castillo C., Kingwell-Banham E., Weisskopf A., Qin L., Sato Y.I. and Hijmans R.J., *The contribution of rice agriculture and livestock pastoralism to prehistoric methane levels : An archaeological assessment*, *Holocene* 21 (5), 743-759, 2011.
20. Goldammer J.G., *Politiques nationales ayant une incidence sur les incendies de forêt en Europe et en Asie boréale et tempérée*, Centre mondial de surveillance des incendies rapport FAO 2001.
21. INRA Rencontres INRA 25 février 2011 au Salon international de l'Agriculture.
22. IPCC, *Climate change 2013, The physical science basis, Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M.M.B., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. et Midgley P.M. (eds. ), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
23. Jamali H., Livesley S.J., Dawes T.Z., Hutley L.B. and Arndt S.K., *Termite mound emissions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> are primarily determined by seasonal changes in termite biomass and behavior*, *Oecologia* 167 (2), 525-534, 2011.
24. Johnson D.E., Johnson K.A., Ward G.M. and Branine M.E., *Ruminants and other Animals*, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
25. Joyce J. and Jewell P.W., *Physical Controls on Methane Ebullition from Reservoirs and Lakes*, *Environmental & Engineering Geoscience*, May 2003, v. 9, p. 167-178.
26. Keller M. and Stallard R.F., 1994, *Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama*, *Journal of Geophysical Research* 99, no. D4, p. 8307-8319.
27. Khalil, M.A.K. and Shearer M.J., *Sources of methane*, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.

28. Kirchgessner D.A., *Fossil Fuel Industries*, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
29. Lamarque J.F., Hess P., Emmons L., Buja L., Washington W. and Granier C., 2005, *Tropospheric ozone evolution between 1890 and 1990*, *Journal of Geophysical Research* **110**, D08304. doi: 10.1029/2004JD005537.
30. Lawrence M.G., Jöckel P. and von Kuhlmann R., *What does the global mean OH concentration tell us ? Atmospheric Chemistry and Physics* **1**, 37-49, 2001.
31. Lelieveld J., Peters W., Dentener F. and Krol M.C., 2002, *Stability of tropospheric hydroxyl chemistry*, *Journal of Geophysical Research* **107** [D23], 4715.
32. Levine J.S., Cofer III W.R. and Pinto J.P., *Biomass Burning*, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
33. Levitt MD., Furne J.K., Kuskowski M. and Ruddy J., *Stability of human methanogenic flora over 35 years and a review of insights obtained from breath methane measurements*, *Clinical Gastroenterology and Hepatology* **4** (2), 123-129, 2006.
34. Marani L. and Alvala P.C., *Methane emissions from lakes and flood plains in Pantanal, Brazil*, *Atmospheric Environment* **41** (2007) 1627-1633 Elsevier.
35. Mason J., *Arctic methane outgassing on the E Siberian shelf*, part I, Science, posted on 15 january 2012.
36. Mastepanov M., Sigsgaard C., Dlugokencky E.J., Houweling S., Strom L., Tamstorf M.P. and Christensen T.R., *Large tundra methane burst during onset of freezing*, *Nature* **456**, 628-631, 2008.
37. Matthews, E., et Fung, I., *Methane emissions from natural wetlands: global distribution, area and environment of characteristics of sources*, *Global Biogeochemical Cycles* **1**, 61-86, 1987
38. Matthews E. Wetlands, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
39. Montzka S.A., Krol M., Dlugokencky E., Hall B., Jockel P. and Lelieveld J.: *Small Interannual Variability of Global Atmospheric Hydroxyl*, *Science* **331**, 67-69, doi: 10.1126/science.1197640, 2011.
40. Neue H.U. and Roger P.A., *Ice Agriculture: Factors controlling emissions*, in Khalil, M.A.K. Ed., Atmospheric methane : its role in global environment, 2000.
41. Rasmussen R.A. and M.A.K. Khalil, *Global production of methane by termites*, *Nature* **301**, 700-702, 1983.
42. Reay D., Smith P., Van Amstel A. et al., *Methane and climate change*, Earthscan Ltd, ISBN 978-1-84407-823-3, 261p, 2010.

43. Reshetnikov A.I., Paramonova N.N. and Shashkov A.A., *An evaluation of historical methane emissions from the Soviet gas industry*, *Journal of Geophysical Research* 105 (D3), 3517-3529, 2000.
44. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrillov A.V., Eliseeva A.A. and Tipenko G.S., *Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas*, *Geo-Marine Letters* 25 (2-3), 167-182, 2005.
45. Seiler et al., *Field studies of Methane Emissions From Termite Nests Into The Atmosphere and Measurements of Methane Uptake By Tropic Soils*, *Journal of Atmospheric Chemistry* 1 : 171-186, 1984.
46. Shakova N., Semiletov I., Salyuk A., Kosmach D. and Belheva N., 2007, *Methane release on the Arctic East Siberian shelf*, *Geophysical Research Abstracts* 9, 01071.
47. Shakova N., Semiletov I., Salyuk A. and Kosmach D., 2008, *Anomalies of methane in the atmosphere over the East Siberian shelf: Is there any sign of methane leakage from shallow shelf hydrates ?* EGU General Assembly 2008, *Geophysical Research Abstracts* 10, EGU2008-A-01526.
48. Shearer M.J. and M.A.K. Khalil, *Rice Agriculture : Emissions*, in. Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
49. Simmonds P.G., Manning A.J., Derwent R.G., Ciais P., Ramonet M., Kazan V. and Ryall D., *A burning question. Can recent growth rate anomalies in the greenhouse gases be attributed to large-scale biomass burning events ?* *Atmospheric Environment* 39 (14), 2513-2517, 2005.
50. Simpson I.J., Rowland F.S., Meinardi S. and Blake D.R., *Influence of biomass burning during recent fluctuations in the slow growth of global tropospheric methane*, *Geophysical Research Letters* 33 (22), L22808, doi 10.1029/2006GL027330, 2006.
51. Sugimoto A., Inoue T., Kirtibutr N. and Abe T., *Methane oxidation by termite mounds estimated by the carbon isotopic composition of methane*, *Global Biogeochemical Cycles* 12 (4), 595-605, 1998.
52. Thorneloe S.A., Barlaz M.A., Peer R., Huff L.C., Davis L. and Mangino J., *Waste Management*, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.
53. Tollefson, J., *Methane leaks erode green credentials of natural gas*, *Nature* 493, 12, 2013.
54. Walter, K.M., Smith, L.C., Chapin III, F.S., *Methane bubbling from northern lakes : Present and future contributions to the global methane budget*, *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 1657-1676, 2007
55. Wang Z., Chappellaz J., Park K. and Mak J.E., *Large variations in southern hemisphere biomass burning during the last 650 years*, *Science* 330, 1663-1666, 2010.
56. Whiticar M.J., *Methane fluxes*, in Khalil, M.A.K. Ed., *Atmospheric methane : its role in global environment*, 2000.

### *Chapitre 3*

## MÉTHANE : DES OBSERVATIONS ATMOSPHÉRIQUES AUX FLUX DE SURFACE

Comme l'ont montré les deux premiers chapitres, le méthane est un gaz à effet de serre majeur, qui agit sur la capacité oxydante de l'atmosphère via sa réaction avec le radical OH. Ses émissions de surface sont variables dans le temps et l'espace et sont encore assez mal connues, même à l'échelle planétaire. Il y a donc deux motivations (au moins !) pour étudier de plus près les sources et puits de méthane : l'amélioration des connaissances sur les cycles biogéochimiques actuels et la volonté de mieux quantifier l'impact présent et futur du méthane sur le climat et sur la capacité oxydante de l'atmosphère. Dans ce chapitre, nous allons voir comment on peut estimer les flux d'échanges de méthane entre les surfaces, terrestres et maritimes, et l'atmosphère en insistant plus particulièrement sur l'intégration d'observations atmosphériques de méthane dans des modèles inverses.

Une grande part des incertitudes restantes dans l'étude des cycles biogéochimiques actuels provient de la méconnaissance des flux d'échange des composés atmosphériques avec les réservoirs continentaux et marins. De nombreux processus à l'œuvre ne sont pas toujours identifiés ou quantifiés avec précision. Par exemple, les incertitudes associées aux différents processus émettant du méthane à l'échelle mondiale (chapitre 2) sont comprises entre  $\pm 30\%$  et  $\pm 100\%$ . Pour les scénarios futurs, des incertitudes supplémentaires apparaissent, concernant

l'évolution de la population et des techniques agricoles, l'utilisation des réserves de combustibles fossiles et le développement d'énergies nouvelles (renouvelables ou non), l'évolution des conditions climatiques qui gouvernent certaines sources naturelles, et l'évolution des puits de méthane. Par ailleurs, les non-linéarités induites par les rétroactions et les réactions photochimiques sont nombreuses dans l'atmosphère. À titre d'exemple, les feux de biomasse contribuent à émettre des  $\text{NO}_x$  qui induisent une augmentation du radical OH. Mais les feux émettent aussi du monoxyde de carbone (CO) et du méthane dont l'augmentation de concentration est d'autant plus limitée que les concentrations de OH sont fortes.

Il apparaît donc essentiel de mieux connaître les flux d'échanges positifs (émissions de surface) ou négatifs (puits atmosphérique ou de surface) afin d'améliorer notre connaissance de la composition chimique de l'atmosphère qui conditionne en grande partie le climat de la Terre et son évolution dans les décennies à venir.

## LES DEUX FAMILLES D'APPROCHES POSSIBLES POUR L'ESTIMATION DES FLUX DE MÉTHANE

### Approches montantes

Deux grandes familles d'approches ont été développées pour estimer les sources et puits de composés atmosphériques. La mesure directe des flux de méthane est l'approche qui paraît la plus naturelle pour les estimer. Cependant, la grande variété des sources de méthane et leur inégale répartition sur la surface du globe font que les mesures directes des flux de méthane restent de signification très locale : la zone sur laquelle une mesure directe de flux peut être considérée comme significative a ainsi été estimée à environ  $1 \text{ km}^2$  (Schmid, 1994). L'extrapolation de mesures directes de flux est une voie possible pour étendre les données à des échelles régionales ou même mondiales, en s'appuyant sur des données satellitaires ou sur d'autres mesures (les climatologues emploient très souvent le terme « proxy » pour de telles mesures) comme la température ou les précipitations. De telles extrapolations restent toutefois entachées de grandes incertitudes. L'intégration de mesures ponctuelles de flux de méthane dans des modèles biogéochimiques basés sur une représentation des processus à l'œuvre est une voie suivie pour utiliser au mieux ces données.

Sur terre, l'utilisation des mesures directes de flux sur les continents pour valider des modèles biogéochimiques représentant le fonctionnement de la végétation et des sols, comme le modèle ORCHIDEE développé à l'IPSL (Krinner *et al.*, 2005), peut contribuer à améliorer la représentation des flux de méthane (et de CO<sub>2</sub>) dans ces modèles. L'utilisation conjointe récente de mesures directes de flux, de données satellitaires représentant les zones inondées et du modèle ORCHIDEE a, par exemple, permis de calculer les flux de méthane dus aux zones inondées naturelles (marécages, tourbières, mangroves...) à l'échelle mondiale pour la période 1990-2008 (Ringeval *et al.*, 2010, figure 3.1). Une limite évidente à ce type d'approche tient au fait que les zones humides représentent un écosystème « sous-maillé » dans un modèle comme ORCHIDEE, ce qui implique nécessairement l'utilisation de paramétrisations en lieu et place d'une représentation mécanistique complète de l'hydrologie du sol et donc des zones humides. Toutefois cette approche peut révéler des structures générales en lien avec le climat et l'hydrologie à grande échelle. Ainsi, outre les zones tropicales qui dominent (~ 65%) les émissions mondiales dues aux zones inondées naturelles, on observe aussi des émissions significatives aux moyennes (~ 14%), mais surtout aux hautes (~ 21%) latitudes en Amérique du Nord et en Eurasie. Saisonnièrement (figure 3.2), les émissions de méthane dues aux zones inondées naturelles montrent des variations de plus en plus prononcées à mesure qu'on monte en latitude avec des maxima en juillet-août dans l'hémisphère nord et en janvier-février dans l'hémisphère sud.

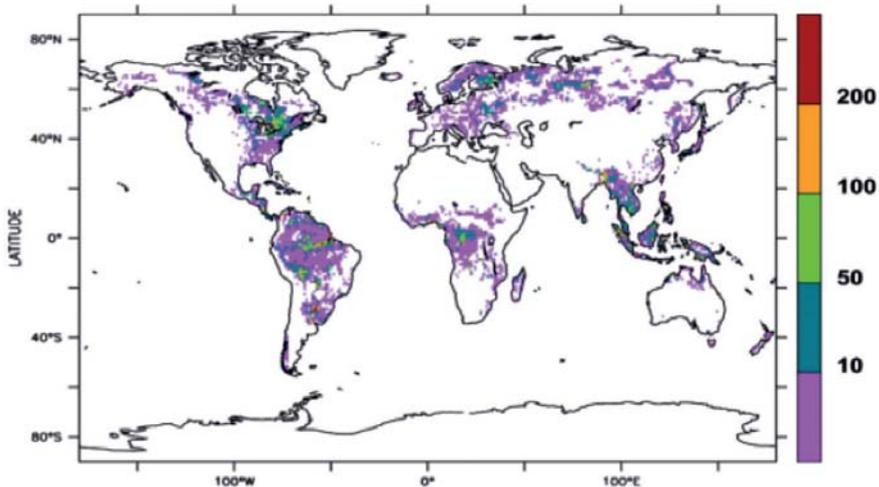


Figure 3.1 : Flux annuel moyen de méthane dû aux zones inondées naturelles [en  $\text{mg m}^{-2} \text{j}^{-1}$ ] calculé par Ringeval *et al.* (2010).

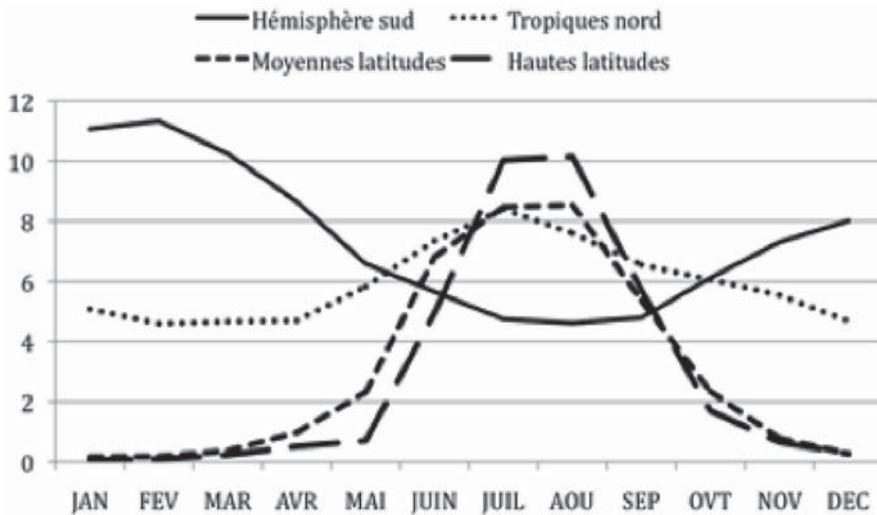


Figure 3.2: Flux mensuel de méthane pour l'année 2005 dû aux zones naturelles pour quatre bandes de latitudes [Hémisphère sud : 90°S-0°, Tropiques Nord : 0°-30°N, Moyennes latitudes : 30°-50°N, Hautes latitudes : >50°N, en Mt/an] calculé par Ringeval *et al.* (2010). Les émissions totales sont de 200 Mt CH<sub>4</sub>/an.

Pour les émissions anthropogéniques, des inventaires d'émissions peuvent être établis sur une base annuelle pour chaque pays et pour les différentes catégories de sources (exemple : EDGAR4) ; elles sont répertoriées par le GIEC (qui a établi des procédures d'évaluation précises). L'établissement d'une émission annuelle par pays et par catégorie se fait en employant une formulation par facteurs d'émission qui sont renseignés grâce à l'inventaire annuel du pays à la CCNUCC dans le cadre des traités internationaux, complété par toute information disponible (rapports industriels, inventaires régionaux, littérature scientifique...). Une spatialisation des émissions annuelles par pays peut être réalisée en s'appuyant sur des cartes à haute résolution (typiquement 0,1°) sur lesquelles figurent les sources potentielles d'émissions comme les usines productrices d'énergie, les usines de fabrication de produits manufacturés, les réseaux routiers, les voies maritimes et aériennes, les densités de population animales et humaine, l'utilisation des sols... Une fois calculées, les émissions peuvent être représentées sur des cartes (figure 3.3). On observe de fortes émissions en Asie du sud-est (~ 40%), devant celles d'Amérique du Nord (~ 11%) et d'Europe (~ 14%), avec l'émergence de pays d'Amérique du Sud et d'Afrique centrale. Hormis la culture du riz (2 à 3 récoltes par an) et les feux

de biomasse d'origine humaine, les autres sources anthropogéniques montrent assez peu de variations saisonnières. Les inventaires d'émissions fournissent parfois un historique sur plusieurs décennies selon les pays, permettant un calcul évolutif du bilan global de méthane. Ainsi, concernant les feux anthropiques de biomasse, ces inventaires indiquent une contribution inférieure de 80 % au XIX<sup>e</sup> siècle par rapport à aujourd'hui.

L'utilisation d'un modèle biogéochimique validé sur des observations directes et parfois aussi sur des reconstructions satellitaires, de même que la production d'inventaires pour les émissions anthropogéniques, est appelée approche montante. Cette approche fut notamment utilisée par Fung *et al.* [1991] pour produire la première évaluation exhaustive et planétaire du cycle du méthane.

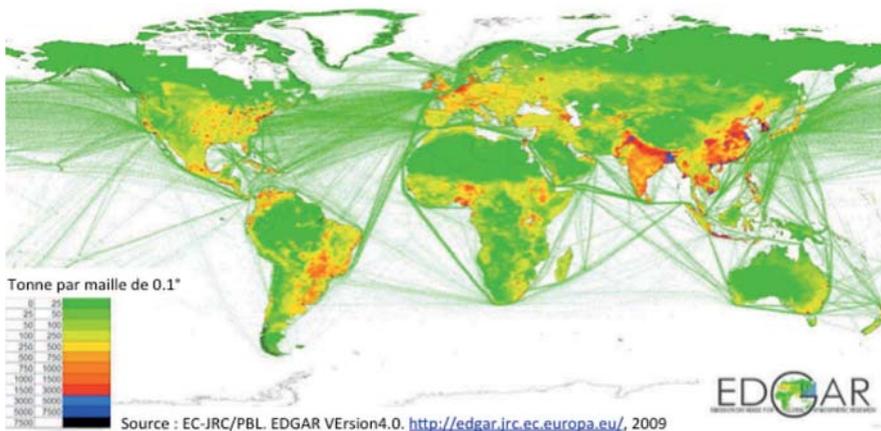


Figure 3.3 : Inventaire d'émissions anthropogéniques annuelles du méthane fourni par EDGAR sur une grille de 0,1°.

## Approches descendantes

Les approches descendantes utilisent les concentrations de méthane mesurées en différents points de l'atmosphère pour estimer et optimiser les flux de surface. Ce sont les inversions atmosphériques, qui entrent dans la famille plus large des problèmes inverses [Rodgers, 2000 ; Tarantola, 1987], eux-mêmes intégrés dans la problématique de l'assimilation de données. Le principe de ces

méthodes est qu'un échantillon d'air prélevé à un endroit donné à un moment donné reflète le mélange de différentes sources par le transport dans l'atmosphère, éventuellement modifié par des réactions chimiques sur le trajet entre la source et le prélèvement d'air. Si on peut modéliser le mélange et la chimie atmosphérique, il est alors possible de remonter aux sources responsables et de les quantifier (figure 3.4). Les échelles spatiales représentées dépendent de la densité du réseau de mesures et vont généralement de l'échelle mondiale à l'échelle régionale. Un modèle de chimie-transport est nécessaire pour relier les flux de surface aux concentrations. Les observations des concentrations atmosphériques de méthane sont les principales contraintes des inversions atmosphériques. Une connaissance *a priori* de la répartition spatio-temporelle des sources et puits (inventaires, modèles de végétation) est aussi souvent utilisée comme forçage dans les inversions atmosphériques. Dans ces conditions, l'approche descendante n'est plus indépendante de l'approche montante. On peut en principe augmenter le nombre de contraintes dans l'approche descendante de deux façons. En inversant les mesures atmosphériques et en utilisant les flux d'autres gaz-traces de l'atmosphère ayant des sources communes avec le méthane – c'est le cas par exemple du monoxyde de carbone (points communs : feux de biomasse, oxydation par OH). Ou, deuxième méthode, en utilisant un traceur propre au méthane produit ou détruit ; c'est le cas de deux isotopologues minoritaires et stables du méthane,  $^{13}\text{CH}_4$  et  $\text{CH}_3\text{D}$ , ou encore de l'isotopologue minoritaire radioactif  $^{14}\text{CH}_4$ . L'utilisation de mesures du  $^{13}\text{CH}_4$  permet de séparer les processus anaérobies de production de méthane des processus de combustion ou des processus industriels. Le  $\text{CH}_3\text{D}$  permet en principe de distinguer la contribution des hydrates d'origine océanique de celles liées à d'autres sources ; un fort fractionnement par rapport à  $^{12}\text{CH}_4$  se produit aussi lors de l'oxydation atmosphérique avec OH. Enfin le  $^{14}\text{CH}_4$  est absent des sources fossiles. Utilisées comme contraintes additionnelles dans la modélisation inverse, ces données isotopiques permettent parfois d'affiner la partition des flux entre processus. Il faut toutefois que les incertitudes liées aux cycles de ces données isotopiques ne soient pas elles-mêmes trop importantes.

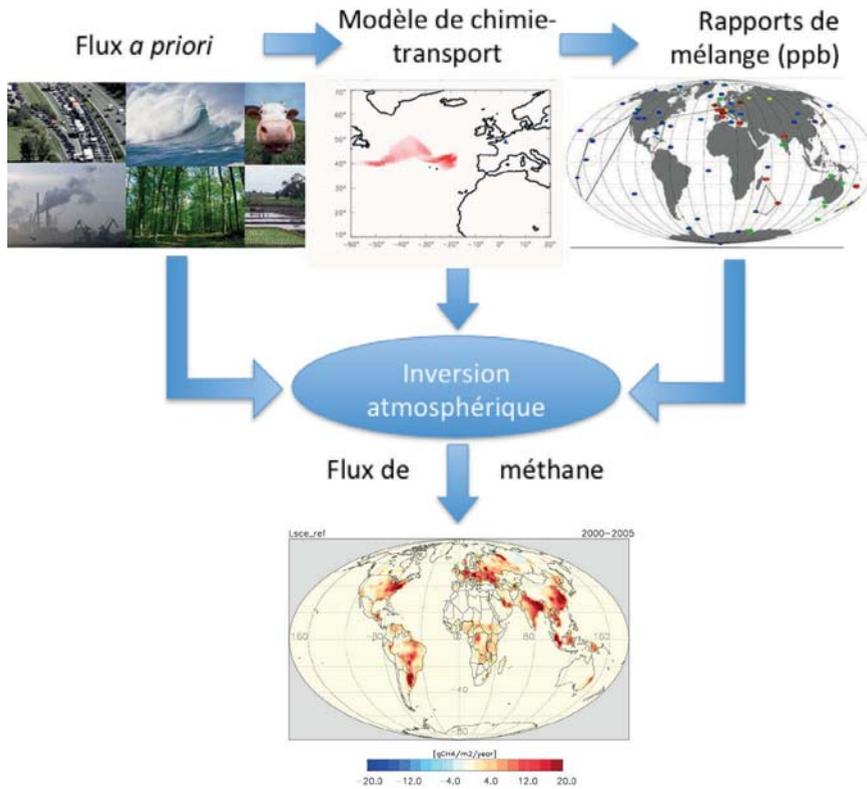


Figure 3.4 : Schéma conceptuel de l'inversion atmosphérique. Une connaissance des flux *a priori* permet de calculer les concentrations à l'aide d'un modèle de chimie-transport. Ces trois ingrédients entrent dans la procédure d'inversion atmosphérique qui produit une estimation des flux de surface et des incertitudes associées [d'après la plate-forme de comparaison de flux de gaz à effet de serre CARBOSCOPE — [www.carboscope.eu](http://www.carboscope.eu)].

## MESURER LE MÉTHANE ATMOSPHÉRIQUE

### Techniques de mesures

Trois techniques de mesures sont employées actuellement pour la mesure du méthane atmosphérique. Les deux premières techniques s'appuient sur la propriété physique faisant du méthane un gaz à effet de serre : sa capacité à absorber le

rayonnement infrarouge (loi de Beer-Lambert). Dans la spectrométrie infrarouge non dispersive, le rayonnement émis par une lampe est absorbé par le méthane le long d'un chemin optique dans une chambre de mesure et détecté électro-optiquement. Un filtre optique situé à l'entrée du système de mesure sélectionne généralement la longueur d'onde utile à la mesure. Récemment, une nouvelle approche optique a été développée, basée sur la spectroscopie à cavité laser résonnante. Un laser illumine une cavité optique essentiellement constituée de deux (voire trois) miroirs très réfléchissants. Après avoir obtenu la résonance dans la cavité, le laser est éteint pour permettre la mesure du temps de décroissance exponentielle de l'intensité lumineuse sortant de la cavité qui renseigne sur la concentration du gaz à mesurer. Une variante très sensible de cette technique consiste à ne pas éteindre le laser mais à mesurer l'intensité lumineuse incidente et sortante de part et d'autre de la cavité optique, après avoir intensifié le signal laser aux bonnes longueurs d'onde par rétroaction optique depuis la cavité (technique dite OF-CEAS, Romanini *et al.*, 2006). Étant donnée la grande réflectivité des miroirs, la lumière peut avoir parcouru plusieurs kilomètres en réflexions multiples avant de sortir de la cavité, ce qui permet de détecter de très faibles concentrations.

La troisième technique employée pour mesurer le méthane est la chromatographie en phase gazeuse. Cette technique d'analyse chimique permet de séparer les gaz d'un mélange. Un échantillon d'air est introduit à l'entrée d'une colonne renfermant une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire, puis il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz vecteur. Les différentes molécules du mélange sortent plus ou moins vite de la colonne en fonction de leur affinité avec la phase stationnaire. Un détecteur, par exemple à ionisation de flamme pour le méthane, mesure alors la quantité de chaque gaz séparé par la colonne. La chromatographie en phase gazeuse est un peu plus complexe à mettre en œuvre et à maintenir que les techniques optiques (notamment elle n'est pas absolue et demande des calibrations régulières), mais elle permet de mesurer simultanément plusieurs gaz. Il existe par exemple des chromatographes  $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}/\text{SF}_6$  et  $\text{CO}/\text{H}_2$ . La spectroscopie à cavité laser résonnante permet aussi de mesurer simultanément différents gaz, mais les combinaisons sont réduites par la nécessité que des bandes d'absorption soient présentes dans la même gamme de longueur d'onde. Ainsi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2\text{O}$  peuvent être mesurés simultanément, de même que  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ , ou encore  $\text{CH}_4$  et  $\text{CO}$ .

Dans tous les cas, l'appareil de mesure est complété par un dispositif de calibration constitué de bouteilles contenant du méthane à concentration connue dans de l'air synthétique et d'un système d'électro-vannes commandées par ordinateur. Les

techniques optiques sont moins exigeantes que la chromatographie car la mesure est par essence absolue (loi de Beer-Lambert). Les dérives possibles associées aux instruments optiques portent sur la température de la cavité optique, ou encore sur la mesure de la quantité de gaz présente dans cette cavité. De la fréquence de l'étalonnage et de la qualité des gaz étalons utilisés dépend la précision de mesure. Pour pouvoir représenter les gradients de méthane dans l'atmosphère, l'OMM préconise une précision de 2 ppb (répétabilité) pour les mesures de méthane, soit moins de 0,1 %. Ce niveau de précision exceptionnel demande que les instruments fonctionnent dans un environnement contrôlé (et régulé pour les instruments optiques) en ce qui concerne pression, température et humidité. À titre d'exemple, les étalonnages pour la mesure du méthane par chromatographie faite au LSCE se font plusieurs fois par heure (figure 3.5).



Figure 3.5 : Laboratoire de mesure des gaz à effet de serre du LSCE.

À gauche : support pour la mesure de flacons pressurisés prélevés partout dans le monde ;  
au centre : système de chromatographie en phase gazeuse ;  
à l'arrière-plan : bouteilles d'étalonnage. Crédit photographique : C. Yver.

La chromatographie en phase gazeuse est couramment utilisée pour quantifier le méthane piégé dans les bulles d'air de la glace polaire (cf. chapitre 4) afin de reconstituer son évolution temporelle préalablement à la période instrumentale. Les précisions atteintes sont alors de l'ordre de  $\pm 2$  à  $\pm 10$  ppbv en raison de la faible taille des échantillons disponibles. Depuis peu, les techniques optiques sont également adaptées à cette application. Non-destructives et offrant des fréquences de mesure très élevées (jusqu'à 5 Hz), elles peuvent par exemple être couplées à un système de fusion en continu de carottes de glace.

## Mesures de surface et dans la troposphère

Depuis 1957, des flacons d'air sont prélevés à Mauna Loa (île de Hawaï) et la concentration en  $\text{CO}_2$  est mesurée en laboratoire. Le réseau dit « flacons » s'est régulièrement développé depuis et a été étendu aux autres gaz à effet de serre, dont le méthane à partir de 1983 (figure 1.2). Le méthane est aujourd'hui mesuré dans l'atmosphère de façon régulière par de nombreux réseaux en plus de 150 points répartis sur la surface du globe (figure 3.6).

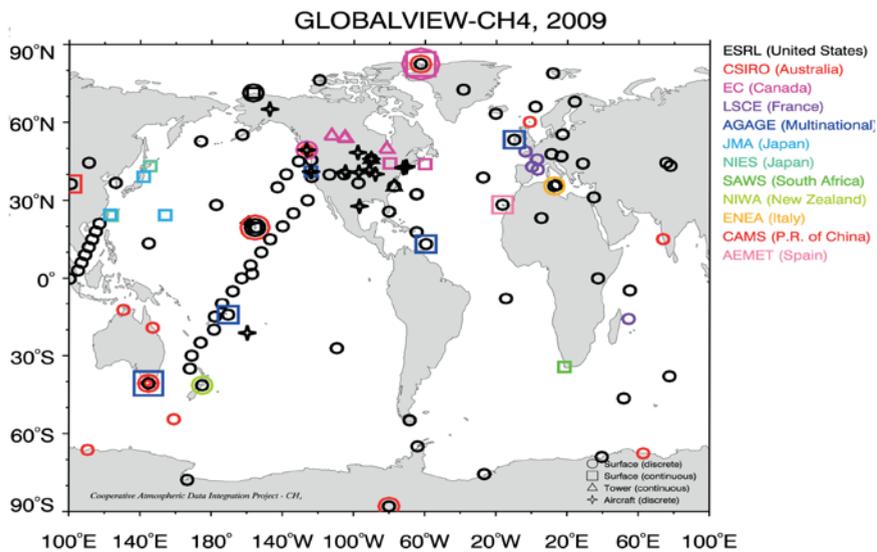


Figure 3.6: Réseau de mesures international du  $\text{CH}_4$  en 2009 synthétisé dans la base de données Globalview. D'après [www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov).

Depuis le milieu des années 2000, un réseau de mesures en continu du méthane se développe, permettant de suivre l'évolution de ce gaz heure par heure et plus régionalement qu'auparavant (avec notamment une meilleure couverture du domaine continental en Amérique du Nord et en Europe). Des mesures aéroportées effectuées à partir de petits avions privés ou bien sur des lignes commerciales sont aussi réalisées, soit à l'aide d'instruments adaptés pour la mesure en avion, soit par prélèvement de flacons. Enfin, la liaison entre les mesures de surface et les mesures aéroportées est faite à l'aide de mesures de méthane depuis de hautes tours (supérieures à 200 m de hauteur), notamment en Europe (projet européen CHIOTTO). Deux exemples

d'observations de méthane atmosphérique sont donnés en figure 3.7 avec les variations de concentration du méthane mesurées au sommet du Puy-de-Dôme depuis 2001 et le profil vertical moyen de méthane mesuré au-dessus de la forêt d'Orléans entre 1996 et 2006. Les observations continues au Puy-de-Dôme montrent une variabilité qui reflète les sources et puits régionaux et le transport atmosphérique du méthane. Les variations avec l'altitude mesurées au-dessus de la forêt d'Orléans permettent de quantifier la baisse des concentrations de méthane avec l'altitude.

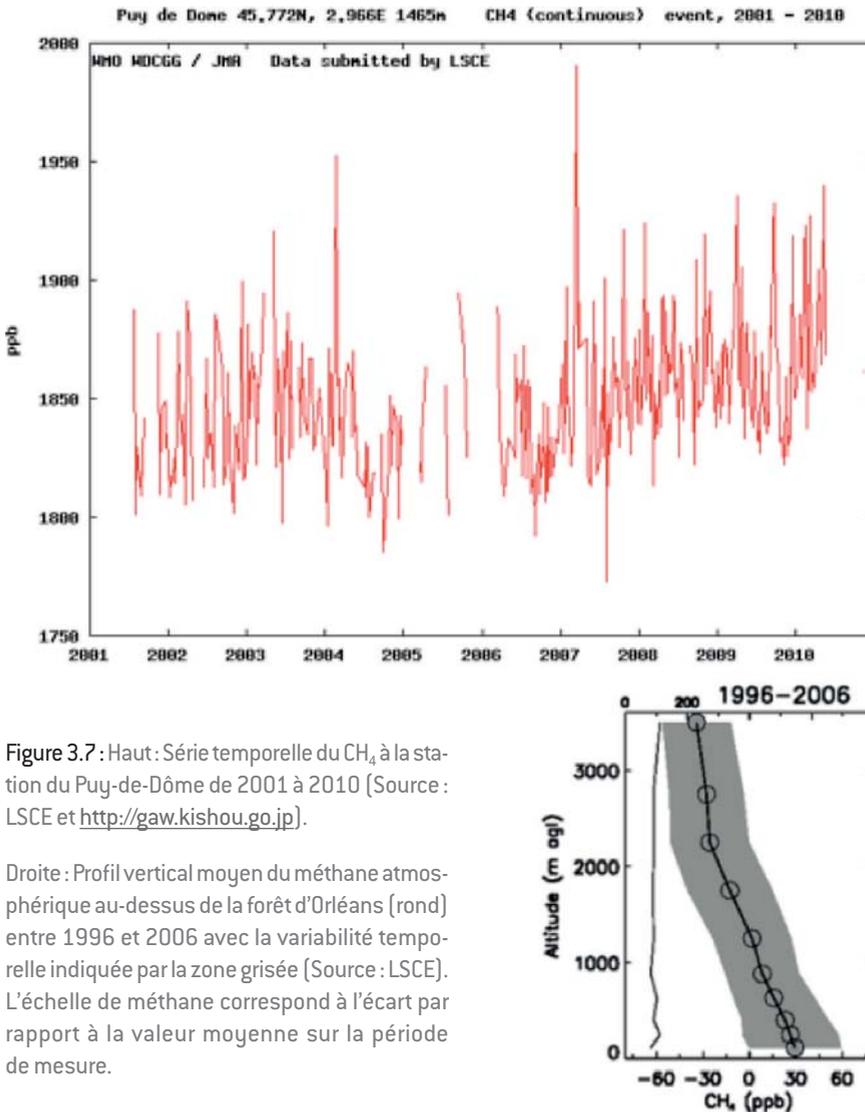


Figure 3.7 : Haut : Série temporelle du CH<sub>4</sub> à la station du Puy-de-Dôme de 2001 à 2010 [Source : LSCE et <http://gaw.kishou.go.jp>].

Droite : Profil vertical moyen du méthane atmosphérique au-dessus de la forêt d'Orléans (rond) entre 1996 et 2006 avec la variabilité temporelle indiquée par la zone grisée [Source : LSCE]. L'échelle de méthane correspond à l'écart par rapport à la valeur moyenne sur la période de mesure.

Les réseaux de mesures en surface et dans la couche limite de l'atmosphère sont très importants car ils fournissent des données à très haute précision et de plus en plus fréquentes à mesure que le réseau continu remplace le réseau dit « flacons ». Un problème apparent sur la figure 3.6 est que de larges zones, pourtant très importantes pour les gaz à effet de serre, dont le méthane, restent non échantillonnées. C'est le cas, d'une façon générale, des régions tropicales (Amérique du Sud, Afrique surtout), de la Sibérie et des océans de l'hémisphère sud. Cette inégale répartition reflète généralement le faible niveau des ressources disponibles pour les recherches sur le climat dans ces différents pays et n'est que partiellement compensée malgré les nombreuses collaborations visant à installer des instruments dans des zones sous-échantillonnées comme l'Inde, la Chine, la Sibérie ou l'Amérique du Sud.

## Mesures de méthane par télédétection spatiale ou de surface

Une révolution dans la mesure du méthane atmosphérique est apparue en 2005 avec les premières reconstructions de colonnes intégrées (quantité de méthane cumulée sur toute la hauteur de l'atmosphère) à partir d'une mesure de rayonnement par satellite (Buchwitz *et al.*, 2005a ; Buchwitz *et al.*, 2005b ; Frankenberg *et al.*, 2005 ; Frankenberg *et al.*, 2008). Le spectromètre passif SCIAMACHY, à bord de la plate-forme ENVISAT lancée en 2002, mesure le rayonnement diffusé, transmis, ou émis par l'atmosphère et les surfaces terrestres pour une gamme de longueurs d'ondes comprises entre 240 nm et 2380 nm (proche ultra-violet à proche infrarouge). Pour le méthane, les spectres dans le proche infrarouge liés au rayonnement solaire observé au nadir (on regarde le long d'une verticale sous l'instrument) sont utilisés pour reconstituer les colonnes intégrées de méthane à l'aide d'un algorithme numérique inversant le transfert de rayonnement dans l'atmosphère. Il est à noter que la technique numérique pour passer des luminances mesurées par SCIAMACHY aux colonnes de méthane fait appel à la modélisation inverse (comme pour l'estimation des flux de CH<sub>4</sub>, cf. *infra*), avec un modèle de transfert radiatif (à la place du modèle de chimie-transport). Les incertitudes associées aux colonnes de méthane reconstruites sont de l'ordre de 2%. Il faut comprendre que la mesure du méthane depuis l'espace n'est pas une mesure directe, mais qu'il y a toute une chaîne de traitements numériques

entre la mesure de luminance du spectromètre en vol et la colonne de méthane reconstruite, avec des sources d'erreurs à chaque étape. Cela explique que les mesures depuis l'espace sont, pour le moment, plus de vingt fois moins précises que les mesures faites en surface. De même, il est délicat de comparer directement une valeur de colonne intégrée de méthane mesurée par satellite avec une valeur de concentration mesurée au sol par les réseaux d'observation. Des hypothèses sont nécessaires sur le profil vertical de  $\text{CH}_4$ , pas nécessairement bien contraint. Par contre, la mesure de méthane depuis l'espace fournit des données plus régulièrement réparties et permet d'observer des régions pas ou peu vues par le réseau de surface. Des structures régionales dans la distribution globale du méthane peuvent ainsi apparaître, inaccessibles avec le réseau de surface. Ainsi, SCIAMACHY, après des améliorations récentes dans les bases de données spectroscopiques sur le méthane (Frankenberg *et al.*, 2008), fournit maintenant une vision unique du méthane dans la bande tropicale (figure 3.8). Comme SCIAMACHY fonctionne avec la lumière solaire, il donne peu d'informations aux hautes latitudes.

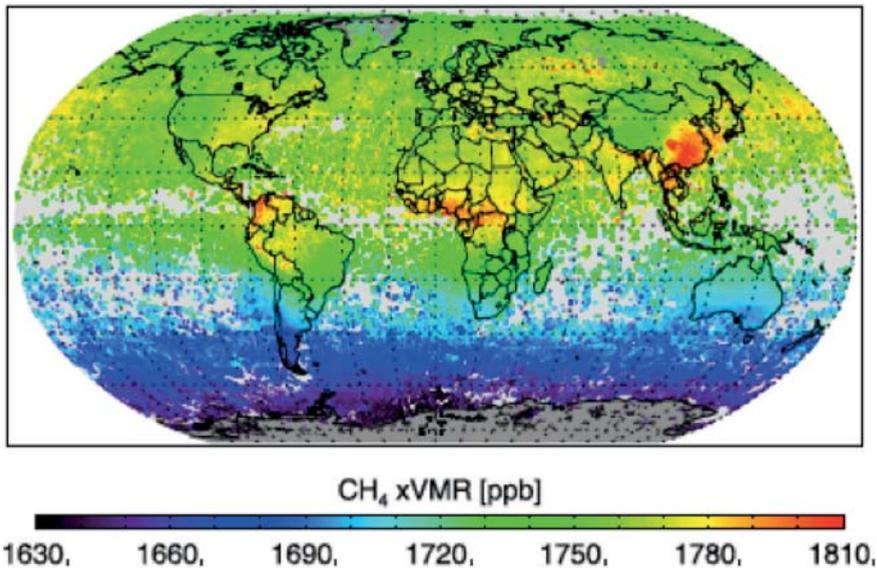


Figure 3.8 : Colonnes atmosphériques de méthane (en ppb) reconstruites à partir des observations spatiales de l'instrument SCIAMACHY à bord de la plate-forme ENVISAT (Frankenberg *et al.*, 2008). VMR désigne la valeur minimale rapportée.

Plus récemment, l'interféromètre atmosphérique de sondage Infrarouge (IASI) a été mis en orbite sur le satellite METOP-A (2006) et le spectromètre à transformée de Fourier TANSO sur le satellite GOSAT (2009). IASI a été conçu pour améliorer la prévision météorologique (reconstruction de profils de température et de vapeur d'eau de haute précision) et pour estimer et suivre à l'échelle mondiale les gaz traces tels que l'ozone, le méthane ou le monoxyde de carbone. La technique de mesure est basée sur la télédétection infrarouge passive utilisant un spectromètre à transformée de Fourier étalonné avec précision et travaillant dans la gamme spectrale allant de 3,7 à 15,5  $\mu\text{m}$ . Plusieurs approches utilisant en synergie des données des instruments de METOP sont en cours de développement pour produire des colonnes intégrées de méthane (de Maziere, Crévoisier, communication personnelle). TANSO sur GOSAT est quant à lui dédié à la mesure des gaz à effet de serre; il utilise la zone spectrale entre 0,5 et 2,5 microns, et est associé à un imageur pour détecter les nuages et les aérosols.

Enfin, des projets de télédétection active se profilent à l'horizon, à base de LIDAR (*Light Detection And Ranging*). La télédétection active se différencie de la télédétection passive par le fait que l'instrument produit lui-même sa propre lumière et ne dépend pas du rayonnement solaire (SCIAMACHY) ou terrestre (IASI). Le LIDAR fonctionne sur le même principe qu'un RADAR avec émission/réception d'une onde électromagnétique, la différence étant le domaine spectral dans lequel il travaille (ultraviolet - visible - infrarouge vs. micro-ondes). Un LIDAR se compose d'un système laser émettant l'onde lumineuse, d'un télescope récoltant l'onde rétrodiffusée par l'atmosphère et/ou absorbée par les composants rencontrés, et d'une chaîne de traitement quantifiant le signal reçu. Le projet franco-allemand MERLIN prévoit d'utiliser un LIDAR DIAL (*Differential Absorption Lidar*) pour reconstruire les colonnes intégrées de méthane depuis l'espace à partir de 2015. Le LIDAR DIAL utilise la différence entre les signaux rétrodiffusés après émission de rayonnement à deux longueurs d'onde, la première correspondant à une bande d'absorption du gaz à mesurer et l'autre non. L'intérêt majeur d'un tel projet de mesure active est qu'il sera possible de reconstruire des profils de méthane même aux hautes latitudes, et que la mesure sera un peu moins sensible aux biais que pour les instruments passifs.

Une dernière technique de mesure par télédétection est utilisée depuis le sol pour calculer des colonnes intégrées de méthane : la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Au lieu de décrire le spectre d'absorption d'un

composé en faisant varier la fréquence de la lumière émise, la lumière infrarouge passe au travers d'un interféromètre qui fournit un spectre en fréquence transformé ensuite en spectre d'absorption classique par transformée de Fourier inverse. Une quinzaine de stations de mesures mesurent ainsi des colonnes de méthane (figure 3.9). Cette technique peut fournir une méthode de validation pour les reconstructions satellites de méthane depuis l'espace. Les données de méthane atmosphérique, *in situ* ou par télédétection, peuvent être utilisées dans des modèles inverses pour réduire les incertitudes sur les sources et puits de méthane.

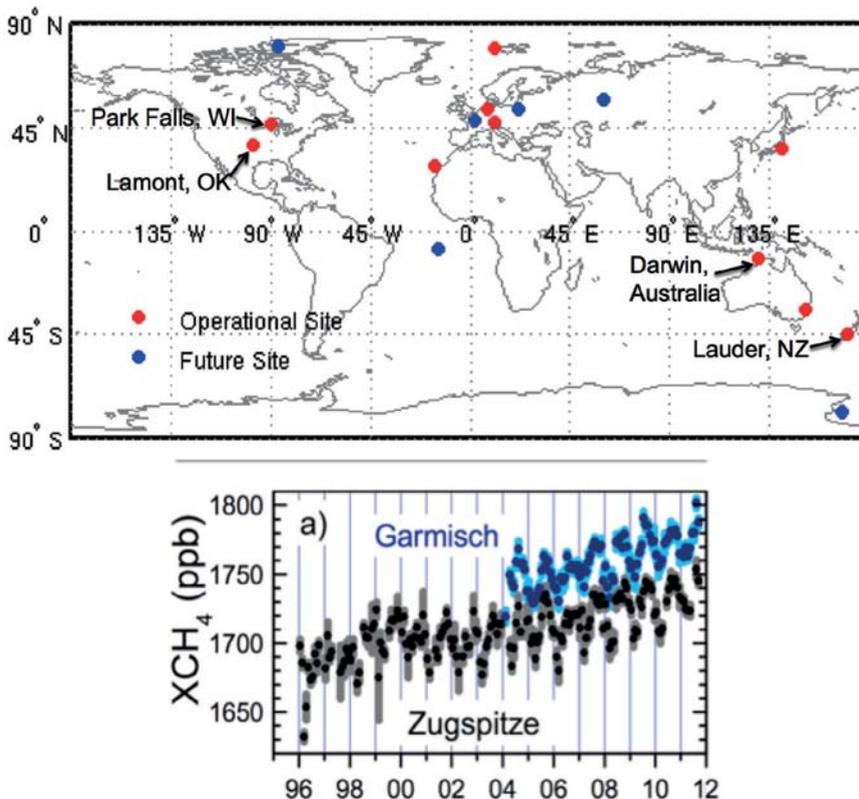


Figure 3.9: Haut : Carte des sites de mesure de spectromètres à transformée de Fourier rapides pour la mesure de colonnes atmosphériques de gaz à effet de serre depuis le sol (<https://tccon-wiki.caltech.edu>).

Bas : Colonnes intégrées de méthane à Garmisch et Zugspitze en ppb (Sussmann *et al.*, 2012).

## L'INVERSION ATMOSPHÉRIQUE : UNE APPROCHE POUR CONVERTIR LES OBSERVATIONS ATMOSPHÉRIQUES EN FLUX DE MÉTHANE

Lorsqu'on utilise des observations pour corriger la trajectoire d'un modèle, on fait de l'assimilation de données. C'est ce qui se passe dans les modèles de prévision météorologique avec des grandeurs comme la température ou la vapeur d'eau, mais aussi, par exemple, l'ozone. Si, en plus, on estime des paramètres permettant de calculer la nouvelle trajectoire du modèle, on franchit une étape supplémentaire en résolvant un problème inverse. Pour le méthane, l'inversion atmosphérique corrige la trajectoire d'un modèle représentant le transport et la chimie atmosphérique du méthane en corrigeant les flux de surface (paramètres) afin de mieux représenter les observations de méthane, qu'elles soient recueillies depuis la surface ou par satellite. L'inversion atmosphérique adaptée au méthane est une méthode mathématique et numérique, permettant de combiner de façon optimale des observations de méthane, une connaissance *a priori* des flux de surface et un modèle de chimie-transport liant flux et concentrations, pour optimiser les flux de surface et réduire leurs incertitudes. Dans la réalité, les émissions de surface se mélangent dans l'atmosphère et sont modifiées par la chimie atmosphérique pour donner des concentrations que l'on peut mesurer. L'inversion atmosphérique permet d'inverser le mélange et la chimie atmosphérique pour remonter à l'origine des émissions responsables de la concentration observée (figure 3.4). Cette opération se fait concrètement par la minimisation d'une fonction mathématique, appelée « fonction coût », qui comporte deux termes :

- ▶ un terme représentant la distance entre le modèle et les mesures, pondérée par l'incertitude d'observation : l'inversion vise à réduire au maximum cet écart en modifiant les flux forçant le modèle de chimie-climat. C'est un terme de type « moindres carrés pondérés » ;
- ▶ un terme représentant la distance entre le flux initial et le flux optimisé, pondérée par les incertitudes sur le flux initial. Ce terme permet de régulariser le problème inverse, c'est à dire d'empêcher que l'optimisation produise des flux totalement irréalistes compte tenu des connaissances sur les émissions de méthane représentées par les flux initiaux et leurs incertitudes.

Il est important de noter que l'inversion atmosphérique permet d'optimiser les flux de méthane, mais qu'elle fournit aussi une valeur de l'incertitude résiduelle

après optimisation. On peut montrer mathématiquement que cette incertitude est inférieure ou égale à l'incertitude initiale. La réduction de l'incertitude sur les flux de méthane sera d'autant plus grande que les observations apporteront de l'information à l'inversion. Ainsi, dans des régions avec de nombreux sites de mesures (comme l'Europe), la réduction d'incertitude peut atteindre plusieurs dizaines de pour cent alors qu'elle reste très faible dans des régions sans observations comme l'Amazonie. On peut produire des cartes de réduction d'incertitudes qui renseignent sur les contraintes apportées par l'atmosphère aux flux de méthane.

La taille des problèmes inverses résolus peut être très importante. En effet, si on inverse les flux de méthane pour tous les processus émetteurs, sur une grille de  $3^\circ \times 4^\circ$  (modèle de chimie-transport), mensuellement, et sur la période 1990-2009, cela correspondra typiquement à 17 millions de paramètres à estimer (7 000 points de grille, sur 12 mois et pendant 20 ans pour 10 processus). Ce genre d'inversion se résout sur les plus gros supercalculateurs existants. Il est aussi possible de réduire la taille du problème inverse en regroupant les points de grille du modèle de chimie-transport en régions et/ou en regroupant les processus émetteurs de méthane pour n'estimer que le flux total de méthane. Cependant, dans les conditions d'un regroupement géographique, on peut commettre une erreur d'agrégation : si la répartition spatio-temporelle du flux dans la région regroupée est fautive, l'inversion ne pourra pas la corriger et une erreur sera faite dans l'estimation du flux de méthane pour cette région.

## QUE NOUS ONT APPRIS LES INVERSIONS ATMOSPHÉRIQUES SUR LES FLUX DE MÉTHANE ?

La mise en œuvre de l'inversion atmosphérique a permis d'obtenir des résultats sur l'estimation des flux de méthane de l'échelle globale à l'échelle régionale. Les principaux résultats obtenus sont résumés ici.

### À partir de mesures au sol

L'estimation des flux de méthane est plus robuste pour le flux total que pour les processus individuels à l'échelle régionale. Le méthane est émis par une dizaine de

types de sources [chapitre 2]. L'utilisation des données atmosphériques permet de mieux contraindre le total des flux que les processus individuels qui correspondent souvent à des émissions co-localisées. Ainsi, dans la région particulièrement peuplée du nord de l'Inde, existent des émissions de méthane dues, notamment, aux rizières, aux zones inondées naturelles, aux ruminants, aux décharges et à la combustion de biocarburants, qu'il est difficile de séparer. Pour autant, les flux moyens de méthane peuvent être estimés pour les différents processus à l'échelle globale avec une réduction significative des incertitudes initiales (figure 3.10).

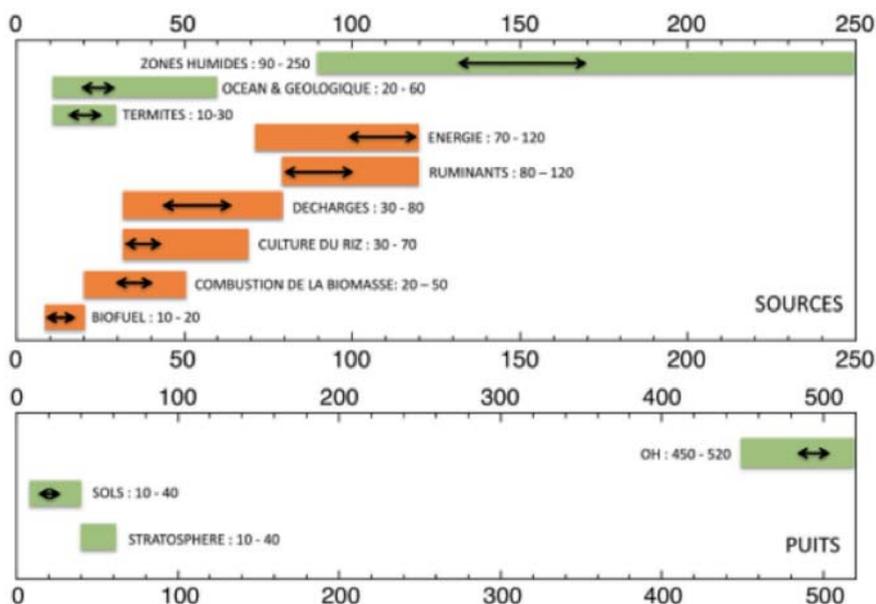


Figure 3.10: Principales sources et principaux puits de méthane atmosphérique (en Tg/an) et estimations existantes dans la littérature scientifique [barres]. Les émissions et puits naturels (vert) sont indiqués ainsi que les émissions anthropogéniques (orange). Les flèches indiquent la gamme de variations moyennes pour la période 1984-2009, après l'inversion atmosphérique conduite par Bousquet et al. (2006).

Pour certaines régions disposant d'observations atmosphériques plus nombreuses, il est possible de produire des estimations par pays avec leurs incertitudes (Bergamaschi et al., 2005). C'est le cas en Europe où le réseau est le plus dense au monde et en voie de pérennisation grâce au projet d'infrastructure de recherche ICOS, qui permettra de suivre à long terme l'évolution des concentrations

(~ 50 stations) et des flux (~ 50 stations) de carbone en Europe. Les incertitudes associées aux émissions inversées ne permettent pas toujours, pour le moment, de tirer des conclusions définitives, mais cette approche inverse atmosphérique constitue un premier pas important vers la mise au point de méthodes fiables de vérification des inventaires d'émission des gaz à effet de serre, qui sont pour le moment basés uniquement sur les déclarations des États.

### Avec prise en compte de mesures depuis l'espace

En 2005 et 2006, deux articles scientifiques ont été très remarquables : les premières données de méthane mesuré depuis l'espace par SCIAMACHY (Frankenberg *et al.*, 2005), et la découverte d'une source importante (150 Tg/an en moyenne) de méthane due aux plantes via un mécanisme aérobie (Keppler *et al.*, 2006). Il n'a pas fallu longtemps pour que ces deux résultats soient rapprochés, car les données SCIAMACHY montraient de fortes valeurs inexplicables par les inventaires d'émissions au-dessus de forêts tropicales, alors qu'elles devaient être une source de méthane importante d'après le travail de Keppler *et al.* Il faut dire qu'étant données les incertitudes importantes sur les émissions des différentes sources (figure 3.10), il est tout à fait possible d'introduire une nouvelle source, même importante, dans le bilan tout en restant compatible avec une source totale entre 500 et 600 Tg/an. Toutefois les estimations atmosphériques faites par plusieurs groupes dans le monde trouvaient une source maximale possible due aux plantes de 80 à 100 Tg/an. Les mesures de Keppler *et al.* sur des plantes en laboratoire ont été reprises par plusieurs groupes de physiologistes, qui ont mis en évidence l'importance du rayonnement ultra-violet utilisé dans les expériences avec les plantes, pouvant conduire à des émissions de méthane quand il y avait destruction des cellules végétales sous rayonnement ultra-violet intense. Ils ont aussi mis en évidence de faibles émissions dues à la transpiration par les plantes d'eau contenant du méthane dissous. Si on rapproche ces résultats récemment synthétisés dans (Nisbet *et al.*, 2009) avec la révision de paramètres spectroscopiques entraînant une forte diminution des valeurs de méthane au-dessus des forêts tropicales dans les données SCIAMACHY (Frankenberg *et al.*, 2008), on en conclut que les plantes ne sont pas une source significative de méthane par voie aérobie.

Outre cette aventure de la source aérobie due aux plantes, des inversions ont été produites pour estimer les sources méthane en utilisant les données de SCIAMACHY (Bergamaschi *et al.*, 2009) ; elles fournissent des résultats prometteurs, pour autant qu'on soit capable de corriger les biais des mesures satellites. SCIAMACHY a cessé de fonctionner début 2012 mais l'aventure du méthane depuis l'espace continue avec IASI et GOSAT.

## À partir des mesures du radical OH

L'estimation précise des émissions mondiales de méthane impose aussi d'avoir une bonne connaissance des concentrations du radical OH et de ses variations, car ce radical OH constitue le principal puits de méthane. Étant donné le temps de vie très court de OH (inférieur à 1 s), il est difficile de rendre compte directement de sa répartition à l'échelle mondiale. Les modèles de chimie atmosphérique calculent explicitement la concentration de ce radical et permettent de suivre ses variations sur le long terme et jusqu'à l'échelle mondiale. Cependant, les concentrations produites sont très liées aux hypothèses faites dans ces modèles car OH est une variable calculée qui est vraiment au cœur des schémas de réactions chimiques de la troposphère. Les concentrations moyennes annuelles de OH sont assez variables d'un modèle à l'autre, mais les variations interannuelles de OH sont assez faibles dans ces modèles (~ 1 à 3%), le radical étant relativement « tamponné » par l'ensemble des réactions chimiques, c'est-à-dire que les fluctuations d'espèces chimiques consommant ou produisant OH n'entraînent que peu de fluctuations du radical OH lui-même.

Une autre approche pour estimer OH a été l'utilisation d'un autre gaz (proxy) dont on connaît bien les émissions et dont le seul puits est OH : le 1,1,1-trichloroéthane, plus communément appelé méthylchloroforme ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ). Si on mesure précisément le rapport de mélange de ce gaz dans l'atmosphère, on peut alors optimiser les concentrations de OH par la même technique d'inversion que pour le méthane. Les variations interannuelles de concentration de OH produites alors sont beaucoup plus grandes (~ 5 à 10%) que celles données par les modèles de chimie-transport (Bousquet *et al.*, 2005 ; Krol and Lelieveld, 2003 ; Prinn *et al.*, 2001). De tels changements des concentrations de OH d'une année sur l'autre, s'ils étaient réels, induiraient une variabilité du méthane (qui représente environ 15 à 25% de l'oxydation par OH) très importante et peu compatible avec notre connaissance du méthane atmosphérique

actuel. Il a été suggéré (Krol and Lelieveld, 2003 ; Montzka *et al.*, 2011) que ces variations très importantes, notamment avant 1993, étaient dues à une trop grande sensibilité des concentrations de OH optimisées aux émissions de méthylchloroforme. Après 1993, le méthylchloroforme a commencé à décroître rapidement dans l'atmosphère car il est régulé par le protocole de Montréal sur la destruction de l'ozone stratosphérique et il a une durée de vie de cinq ans seulement dans l'atmosphère. Depuis 10 ans, la sensibilité de OH aux émissions de méthylchloroforme a diminué dans les inversions, qui estiment pour la dernière décennie une variabilité du radical OH plus proche de celle calculée par les modèles de chimie-climat.

## Les principaux enseignements

Dans la mesure où les variations de concentration du radical OH restent assez limitées d'une année sur l'autre, l'évolution des sources et puits de méthane doit nécessairement jouer un rôle important pour expliquer les variations observées du méthane atmosphérique depuis plus de 25 ans (cf. *supra* figure 1.2) : variations interannuelles pouvant atteindre 10 à 15 ppb d'une année sur l'autre et tendance à long terme montrant une décélération entre 1984 et 2006 et une accélération depuis. Plusieurs études ont proposé des analyses sur des périodes de quelques années de ces signaux. Il n'y a pas encore de consensus sur les causes de ces variations mais des scénarios se dessinent :

- ▶ les zones inondées naturelles joueraient un rôle déterminant pour expliquer les variations interannuelles des émissions de méthane, les émissions associées à la combustion de biomasse ne participant significativement aux variations observées que pendant des événements climatiques majeurs comme El Niño (ex : 1997-98, cf. *supra* figure 1.2). Un scénario impliquant une réduction des émissions par les rizières a aussi été avancé récemment (Kai *et al.*, 2011) pour expliquer la stagnation du méthane atmosphérique à la fin des années 1990. Ce scénario a été récemment contesté par Levin *et al.* (2000) pour qui une stagnation des émissions fossiles et naturelles est plus compatible avec les mesures isotopiques atmosphériques ;
- ▶ les émissions anthropiques montreraient une variabilité à plus long terme avec un léger ralentissement dans les années 1990 dû à l'effondrement des économies des anciens pays de l'Est (réduction des émissions de gaz

- naturel]), mais sembleraient augmenter avant et après, notamment en raison des émissions asiatiques depuis dix ans. Intégrées dans le temps, les émissions anthropogéniques mondiales de méthane répertoriées dans la base de données EDGAR4.1 suggèrent une augmentation de plus de 40 Tg depuis le début des années 1980. Cependant, des travaux récents utilisant l'éthane semblent montrer une réduction des émissions de méthane liées à la production, au transport et à l'utilisation de combustibles fossiles (Aydin *et al.*, 2011) qui auraient pu aussi contribuer à la stagnation du méthane atmosphérique ;
- ▶ une autre explication avancée pour la forte diminution du taux de croissance du méthane atmosphérique pour les années 1990 serait la diminution de certaines émissions anthropiques après 1991, puis une compensation entre des émissions anthropogéniques de nouveau en croissance (Asie) et des émissions dues aux zones inondées naturelles en décroissance à cause de sécheresses récurrentes dans différentes régions de l'hémisphère nord (Bousquet *et al.*, 2006). L'éruption du Mont Pinatubo en juin 1991 aux Philippines aurait aussi joué un rôle dans les variations observées en 1991-1992.
  - ▶ plus récemment, l'augmentation du méthane atmosphérique, après le minimum relatif de 2006, trouverait une explication possible dans la réponse des zones inondées naturelles à des anomalies positives de précipitation (2007 et 2008, dans la bande tropicale) et à des anomalies positives de température et de précipitation (2007, en Sibérie). Les émissions anthropogéniques auraient aussi connu une augmentation de 2 à 8 Tg/an depuis 2006 (figure 3.11). Les feux de biomasse et les variations du radical OH ne joueraient qu'un rôle faible dans cette augmentation de la fin de la première décennie du xxi<sup>e</sup> siècle.

Comme on le voit, les pistes pour expliquer les variations de méthane des dernières décennies ne manquent pas. La grande variété des sources de méthane ne facilite pas la détermination des scénarios les plus probables. C'est pourtant une tâche importante qui motive fortement la communauté de recherche depuis quelques années et qui devrait aboutir positivement si des progrès sont faits sur la densité d'observations, la qualité des modèles, la qualité de l'intégration des observations dans les modèles, ainsi que par la prise en compte de traceurs supplémentaires comme la composition isotopique du méthane ou l'évolution concomitante du monoxyde de carbone ou encore de l'éthane.

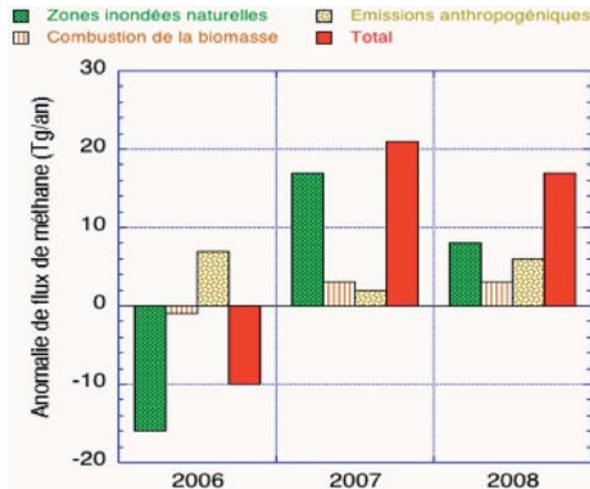


Figure 3.11 : Anomalie mondiale d'émissions de méthane entre 2006 et 2008 pour différents types de sources : zones inondées (en vert), combustion de la biomasse (barré), émissions anthropiques (points), et total (rouge). D'après [Bousquet *et al.*, 2011].

## QUELLES SONT LES PISTES ACTUELLES ET À VENIR POUR AMÉLIORER NOTRE CONNAISSANCE DES FLUX DE MÉTHANE ?

### Plus d'observations

Le suivi des gaz à effet de serre pour estimer leurs sources et puits par inversion du transport et de la chimie atmosphériques impose le développement de réseaux d'observations variés et pérennes. Les observations *in situ* en surface ou dans les premiers kilomètres de l'atmosphère sont irremplaçables, même si elles ne couvriront jamais toute la Terre, car elles sont extrêmement précises et facilement contrôlables. Les reconstructions des concentrations des gaz à effet de serre par télédétection spatiale sont un complément important aux données *in situ* en offrant une couverture spatiale inégalée, mais au prix d'une moindre précision. La télédétection du méthane depuis le sol par FTIR offre une possibilité intéressante de validation des mesures depuis l'espace. Des travaux récents [Bergamaschi *et al.*, 2009; Pison *et al.*, 2011] ont utilisé les données de colonnes pondérées de méthane de SCIAMACHY pour estimer les émissions de méthane à la surface pour

l'année 2004. Ces premières études laissent entrevoir un apport important de ces données pour réduire les incertitudes sur les sources et puits de méthane, même si des problèmes de biais et de cohérence avec les réseaux de mesure au sol demandent à être étudiés de plus près. Pour le méthane, l'enjeu est maintenant de combiner observations *in situ* et mesures par télédétection dans les inversions atmosphériques pour estimer au mieux les sources et puits. Cet objectif s'appuiera sur le développement des réseaux au sol et dans la basse atmosphère (mesures aéroportées) et sur les différents instruments spatiaux actuels (SCIAMACHY, IASI, GSAT) ou prévus dans les années à venir (LIDAR MERLIN). Il faut noter que cette possibilité d'utiliser conjointement observations de surfaces et reconstructions satellites est inédite pour les gaz à effet de serre, puisqu'il n'y a encore aucune série multi-annuelle de données satellitaires de CO<sub>2</sub>.

L'utilisation d'observations des différents isotopologues du méthane peut fournir une donnée indépendante pour séparer les différents types de sources. En effet, les différents processus conduisant à l'émission de méthane dans l'atmosphère ne traitent pas l'isotopologue <sup>12</sup>CH<sub>4</sub> comme l'isotopologue <sup>13</sup>CH<sub>4</sub>, ni le méthane deutéré comme le méthane non deutéré. On dit qu'il y a fractionnement isotopique, qui peut être cinétique (lié à une réaction chimique) ou physique (lié à un processus quelconque, y compris biologique). Des observations de <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> ou bien de CH<sub>3</sub>D peuvent nous renseigner sur les processus ayant causé leur émission, à condition de connaître suffisamment leur signature isotopique, c'est-à-dire de bien caractériser les modifications isotopiques dues au processus physique, biologique ou chimique sous-jacent. Comme les valeurs des fractionnements sont généralement très faibles, on exprime ces signatures en notation delta (en ‰ d'écart par rapport à la composition isotopique d'un standard de référence). Ainsi, selon les travaux de Walhen (1993), la signature isotopique <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C du méthane émis lors de combustion de biomasse (~ 20‰) est très différente de celle de la production anaérobie de méthane (~ 65‰) ou de celle des émissions de gaz naturel (~ 40‰). Le rapport D/H du méthane diffère fortement entre les sources biogéniques (~ 300‰) et les sources fossiles comme le gaz naturel ou les hydrates de méthane en domaine océanique (~ 180‰; Quay *et al.*, 1999). L'oxydation du méthane par OH conduit à un fractionnement cinétique important, la réaction avec les isotopologues <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> et CH<sub>3</sub>D étant plus lente que celle avec <sup>12</sup>CH<sub>4</sub> (Quay *et al.*, 1999). Ce fractionnement cinétique vaut environ 5‰ pour le rapport <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C et environ 200‰ pour le rapport D/H. Un puits minoritaire du

méthane, l'oxydation par le chlore atomique dans la couche limite marine ainsi que dans la stratosphère, intervient aussi fortement dans la signature isotopique du méthane résiduel dans l'atmosphère, avec un fractionnement de  $\sim 60\text{‰}$  pour le rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  et de  $\sim 540\text{‰}$  pour le rapport D/H (*e.g.*, Saueressig *et al.*, 1996). L'utilisation de telles informations, éventuellement spatialisées, pour améliorer la quantification des émissions et des puits dans les inversions atmosphériques devrait se développer à mesure de la disponibilité d'observations systématiques de la composition isotopique du méthane atmosphérique.

## De meilleurs modèles

Si la densité des observations se renforce dans les années à venir, les erreurs de modélisation du transport et de la chimie atmosphériques pourraient devenir la limitation principale à l'amélioration de notre connaissance des sources et puits de gaz à effet de serre par inversion atmosphérique. La densification des réseaux signifie la nécessité de représenter des observations dans des milieux très variés et parfois complexes (zones urbanisées, zones de montagne, zones côtières...). L'utilisation de modèles de chimie-transport mondiaux à basse résolution a montré quelques limites pour optimiser les flux régionaux dans ces conditions (Geels *et al.*, 2007). Plusieurs options sont en cours de développement pour lever cette difficulté. L'approche la plus simple consiste à raffiner les grilles des modèles mondiaux, avec parfois l'utilisation d'un zoom sur une ou plusieurs régions d'intérêt, ou bien de grilles imbriquées. Dans le cas de gaz à longue durée de vie comme le méthane, il y a un intérêt évident à utiliser un modèle mondial. L'inconvénient est que les moyens de calcul et les forçages dynamiques limitent encore les résolutions que l'on peut atteindre. Les modèles utilisés aujourd'hui ont des tailles de grille spatiale d'environ  $2^\circ \times 2^\circ$  avec des zooms allant jusqu'à  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  ( $\sim 50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  aux latitudes moyennes). La résolution verticale est aussi critique comme condition nécessaire de la bonne représentation du mélange dans les premiers kilomètres d'atmosphère. Le travail sur les paramétrisations physiques du mélange vertical (convection, turbulence) est aussi un axe important de travail pour les dynamiciens. Une autre approche possible est l'utilisation de modèles dits « à mésoéchelle » à domaine limité. Ils ont l'avantage de pouvoir utiliser des paramétrisations physiques plus complètes (par exemple non-hydrostatiques) et

d'avoir des résolutions spatiales fines (jusqu'au kilomètre). Les principaux inconvénients sont les temps de calcul et le problème des conditions aux limites pour les gaz à longue durée de vie. Des projets couplant modèle mondial basse résolution et modèle à mésoéchelle à domaine limité sont en cours dans plusieurs groupes de recherche à travers le monde.

Même si on améliore fortement la représentation du transport et de la chimie atmosphériques dans les années à venir, les modèles de chimie-transport ne resteront pas exempts d'erreurs. On peut citer par exemple la mauvaise représentation du transport vertical ou la difficulté de représenter des mesures ponctuelles dans l'espace et le temps avec un modèle ayant des résolutions spatiales de plusieurs dizaines de kilomètres. Il est important de mieux quantifier et de mieux prendre en compte ces erreurs dans les inversions atmosphériques, pour ne pas surestimer le gain apporté par les observations pour réduire les incertitudes sur les sources et puits de méthane. Le formalisme mathématique des inversions atmosphériques permet de prendre en compte de telles erreurs sous la forme de variances et covariances d'erreur. L'utilisation de plusieurs modèles ou de différentes hypothèses et paramétrisations dans un même modèle devraient permettre des progrès sur ces questions dans les années à venir.

## Une intégration plus complète des observations dans les modèles

Le méthane atmosphérique est couplé à d'autres espèces chimiques via sa chaîne d'oxydation dans l'atmosphère. Il s'agit principalement du formaldéhyde, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et du radical OH. La nécessité de respecter la cohérence de ce système chimique suggère d'opérer des inversions multi-espèces simultanées de ces composés pour mieux représenter les différentes rétroactions qu'ils exercent les uns sur les autres. Par ailleurs, des mesures directes de flux de méthane existent qui peuvent servir à contraindre les modèles de végétation calculant par exemple les émissions de méthane dues aux zones inondées. L'intégration d'un modèle de chimie-transport et d'un modèle de végétation dans un système d'assimilation multidonnées du cycle du méthane (CCDAS = Carbon Data Assimilation System) permettrait d'optimiser directement les paramètres du modèle de végétation à partir des mesures directes de flux mais aussi des observations atmosphériques via le modèle de chimie-transport. De tels systèmes sont en cours de développement pour le dioxyde de carbone et devront s'étendre au méthane dans les années à venir.

## CONCLUSIONS

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, le suivi du méthane atmosphérique peut aider à quantifier les sources et puits de méthane à grande échelle, notamment grâce à la modélisation montante ou descendante. Des résultats importants ont été obtenus depuis 10 ans permettant de mieux comprendre la variabilité du méthane atmosphérique. Le passage à des estimations fiables à l'échelle régionale (typiquement l'échelle des pays) ou même locale, se fera à mesure que plus d'observations *in situ* et spatiales seront disponibles et que les modèles de chimie-transport sauront représenter des observations en milieu complexe. La connaissance des émissions de méthane de l'échelle locale à l'échelle mondiale dépasse cependant largement le cadre scientifique. Si on se dirige vers une réglementation plus stricte des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre des négociations post-Kyoto, il sera nécessaire de disposer de méthodes indépendantes de vérification des déclarations des émetteurs de méthane, et ce pour des échelles allant de l'usine au pays en passant par l'agglomération. Les inversions atmosphériques peuvent être un outil pertinent pour cela à condition de disposer d'observations et de modèles adéquats. Toutefois, les laboratoires de recherche ne pourront pas assurer toutes les applications qui seront possibles à partir des observations atmosphériques. Une activité de services, travaillant en synergie avec les laboratoires de recherche est justifiée à partir des contraintes réglementaires en cours de négociation, avec pour principaux clients les gros industriels, le secteur agricole et les collectivités territoriales et nationales. Des start-ups, des PME ou des multinationales sectorielles pourraient développer dans les années à venir de la valeur économique autour du marché émergent de la quantification des émissions de gaz à effet de serre. Nous ne sommes pas si éloignés que cela d'un couplage productif entre monde académique et monde industriel sur la valorisation des observations atmosphériques de méthane (et autres gaz à effet de serre) en termes de produits carbone commercialisables, pourvoyeur d'emplois nouveaux pour les jeunes diplômés. Pour autant, il ne faut pas perdre de vue que la qualité de ces produits est tributaire de la science fondamentale développée autour des observations et des modèles et que les efforts de financement de cette partie amont du travail doivent continuer avec des moyens humains et financiers pérennes.

## RÉFÉRENCES

1. Aydin M., Verhulst K. R., Saltzman E. S., Battle M. O., Montzka S. A., Blake D. R., Tang Q. and Prather M. J.: *Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firn air*, *Nature* **476**, 198-201, <http://www.nature.com/nature/journal/v476/n7359/full/nature10352.html> #supplementary information, 2011.
2. Bergamaschi P., Krol M., Dentener F., Vermeulen A., Meinhardt F., Graul R., Ramonet M., Peters W. and Dlugokencky E.J.: *Inverse modelling of national and European CH<sub>4</sub> emissions using the atmospheric zoom model TM5*, *Atmos Chem Phys* **5**, 2431-2460, 2005.
3. Bergamaschi P., Frankenberg C., Meirink J.F., Krol M., Villani M.G., Houweling S., Dentener F., Dlugokencky E.J., Miller J.B., Gatti LV, Engel A. and Levin I.: *Inverse modeling of global and regional CH<sub>4</sub> emissions using SCIAMACHY satellite retrievals*, *J. Geophys. Res.-atmos.* **114**, -, 2009.
4. Bousquet P., Hauglustaine D.A., Peylin P., Carouge C. and Ciais P.: *Two decades of OH variability as inferred by an inversion of atmospheric transport and chemistry of methyl chloroform*, *Atmos Chem Phys* **5**, 2635-2656, 2005.
5. Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustaine D.A., Prigent C., Van der Werf G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathiere J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C. and White J.: *Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability*, *Nature* **443**, 439-443, 10.1038/nature05132, 2006.
6. Bousquet P., Ringeval B., Pison I., Dlugokencky E.J., Brunke E.G., Carouge C., Chevallier F., Fortems-Cheiney A., Frankenberg C., Hauglustaine D.A., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Szopa S., Yver C., Viovy N. and Ciais P.: *Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006-2008*, *Atmos Chem Phys* **11**, 3689-3700, 2011.
7. Buchwitz M., de Beek R., Burrows J.P., Bovensmann H., Warneke T., Notholt J., Meirink J.F., Goede A. P.H., Bergamaschi P., Korner S., Heimann M. and Schulz A.: *Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models*, *Atmos Chem Phys* **5**, 941-962, 2005a.
8. Buchwitz M., de Beek R., Noel S., Burrows J.P., Bovensmann H., Bremer H., Bergamaschi P., Korner S. and Heimann M.: *Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: year 2003 initial data set*, *Atmos Chem Phys* **5**, 3313-3329, 2005b.
9. EDGAR4, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.0. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>, 2009.

10. Frankenberg C., Meirink J.F., van Weele M., Platt U., and Wagner T.: *Assessing methane emissions from global space-borne observations*, *Science* **308**, 1010-1014, 2005.
11. Frankenberg C., Bergamaschi P., Butz A., Houweling S., Meirink J.F., Notholt J., Petersen A.K., Schrijver H., Warneke T. and Aben I.: *Tropical methane emissions: A revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT*, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L15811, doi: 10.1029/2008GL034300, 2008.
12. Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prather M., Steele L.P. and Fraser P.J., *3-dimensional model synthesis of the global methane cycle*, *Journal of Geophysical Research* **96** [D7], 13033-13065, 1991.
13. Geels C., Gloor M., Ciais P., Bousquet P., Peylin P., Vermeulen A.T., Dargaville R., Aalto T., Brandt J., Christensen J.H., Frohn L.M., Haszpra L., Karstens U., Rodenbeck C., Ramonet M., Carboni G. and Santaguida R.: *Comparing atmospheric transport models for future regional inversions over Europe. Part 1: Mapping the CO<sub>2</sub> atmospheric signals*, *Atmos. Chem. Phys.* **6**, 3709–3756, 2007.
14. Kai F.M., Tyler S.C., Randerson J.T. and Blake D.R.: *Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources*, *Nature* **476**, 194-197, <http://www.nature.com/nature/journal/v476/n7359/full/nature10259.html> #supplementary-information, 2011. Keppler F., Hamilton J.T.G., Brass M. and Rockmann T.: *Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions*, *Nature* **439**, 187-191, 2006.
15. Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S. and Prentice I.C.: *A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system*, *Global. Biogeochem. Cycles* **19**, 2005.
16. Krol M. and Lelieveld J.: *Can the variability in tropospheric OH be deduced from measurements of 1,1,1-trichloroethane (methyl chloroform)?*, *J. Geophys. Res.-atmos.* **108**, 4125, doi: 10.1029/2002JD002423, 2003.
17. Levin I., Veidt C., Vaughn B.H., Brailsford G., Bromley T., Heinz R., Lowe D., Miller J.B., Posz C. and White J.W.C.: *No inter-hemispheric [dgr]<sup>13</sup>CH<sub>4</sub> trend observed*, *Nature* **486**, E3-E4, 2012.
18. Montzka S.A., Krol M., Dlugokencky E., Hall B., Jockel P. and Lelieveld J.: *Small Interannual Variability of Global Atmospheric Hydroxyl*, *Science*, **331**, 67-69, doi: 10.1126/science.1197640, 2011.
19. Nisbet R.E.R., Fisher R., Nimmo R.H., Bendall D.S., Crill P.M., Gallego-Sala, A.V., Hornibrook E.R.C., Lopez-Juez E., Lowry D., Nisbet P.B.R., Shuckburgh E.F., Sriskantharajah S., Howe C.J. and Nisbet E.G.: *Emission of methane from plants*, *Proc. R. Soc. B* **1731**, doi: 10.1098/rspb.2008., 2009.

20. Prinn R.G., Huang J., Weiss R.F., Cunnold D.M., Fraser P.J., Simmonds P.G., McCulloch A., Harth C., Salameh P., O'Doherty S., Wang R.H.J., Porter L. and Miller B.R.: *Evidence for substantial variations of atmospheric hydroxyl radicals in the past two decades* (vol 292, pg 1882, 2001), *Science* 293, 1048-1048, 2001.
21. Quay P., Stutsman J., Wilbur D., Dlugokencky E. and Brown T., *The isotopic composition of atmospheric methane*, *Global Biogeochemical Cycles* 13, 445–461, 1999.
22. Ringeval B., de Noblet-Ducoudre N., Ciais P., Bousquet P., Prigent C., Papa F. and Rossow W.B.: *An attempt to quantify the impact of changes in wetland extent on methane emissions on the seasonal and interannual time scales*, *Global. Biogeochem. Cycles* 24, Gb200310.1029/2008gb003354, 2010.
23. Rodgers C.D.: *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*, *Atmospheric, oceanic and planetary physics*, edited by: scientific, W., Singapore, London, 240pp pp., 2000.
24. Romanini D., Chenevier M., Kassi S., Schmidt M., Valant C., Ramonet M., Lopez J. and Jost H.J., *Optical-feedback cavity-enhanced absorption: a compact spectrometer for real-time measurement of atmospheric methane*, *Applied Physics B* 83 (4), 659-667, 2006.
25. Saueressig G., Bergamaschi P., Crowley J.N., Fischer H. and Harris G.W., *D/H kinetic isotope effect in the reaction  $CH_4 + Cl$* , *Geophysical Research Letters* 23 (24), 3619-3622, 1996.
26. Schmid H.P.: *Source Areas for Scalars and Scalar Fluxes*, *Boundary-Layer Meteorology* 67, 293-318, 1994.
27. Sussmann, R., Forster, F., Rettinger, M., and Bousquet, P., *Renewed methane increase for five years (2007, 2011) observed by solar FTIR spectrometry*, *Atmos. Chem. Phys.* 12, 4885-4891, 2012 [10.5194/acp-12-4885-2012]
28. Tarantola A.: *Inverse problem theory*, edited by: Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1987.
29. Wahlen M.: *The global methane cycle*, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 21, 407-426, 1993.

## Chapitre 4

# ÉVOLUTION PASSÉE, PRÉSENTE ET FUTURE DU MÉTHANE DANS L'ATMOSPHÈRE

## RECONSTRUCTION ET INTERPRÉTATION DES VARIATIONS PALÉOCLIMATIQUES

Les carottes de glace constituent la seule archive disponible pour reconstruire la composition chimique précise de l'atmosphère sur le dernier million d'années ou presque. L'analyse des bulles d'air piégées dans la glace permet en particulier de reconstituer l'historique de la concentration de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ , trois gaz à effet de serre qui influencent la température de la terre. Ces mesures utilisées conjointement avec d'autres indicateurs du climat sont d'un intérêt capital pour mieux comprendre le rôle de ces trois gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique.

L'échelle temporelle couverte par les enregistrements glaciologiques s'est progressivement étendue, couvrant les derniers 150 000 puis 400 000 ans avec le forage russe de Vostok, et 800 000 ans à partir du forage européen EPICA, tous les deux conduits en Antarctique (cf. *supra* figure 1.1). Les enregistrements groenlandais couvrent quant à eux des périodes plus courtes (derniers 100 000 ans), mais avec une meilleure résolution temporelle (figure 4.1). La similitude avec

les variations enregistrées dans l'Antarctique est très grande. L'ensemble de ces mesures a montré la variation remarquablement similaire des concentrations de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub>, de N<sub>2</sub>O et de la température antarctique dans la succession des cycles glaciaires-interglaciaires.

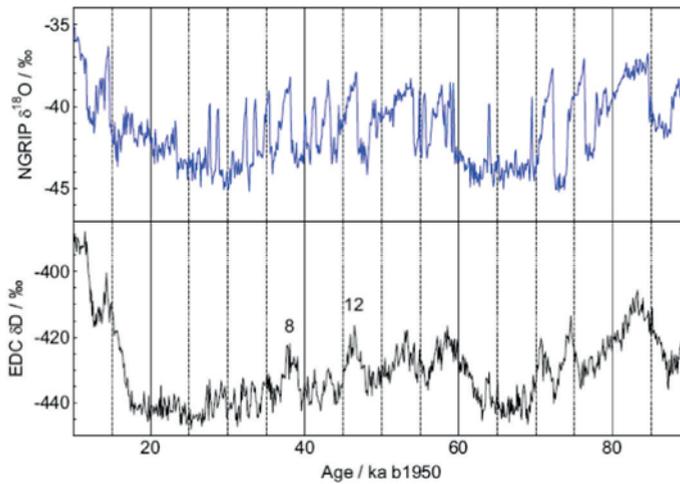


Figure 4.1 : Comparaison des données paléoclimatiques pour le Groenland (NorthGRIP, en bleu) et pour l'Antarctique (EPICA Dôme C, en noir) au cours d'une partie du dernier cycle glaciaire-interglaciaire. Les courbes montrent les fortes corrélations entre les deux régions, tant par leur contenu en isotope 18O qu'en deutérium, et donc la similitude des évolutions des températures dans ces deux régions. D'après Wolff *et al.* [2010].

Ces données montrent que la variation de la concentration de CH<sub>4</sub> est d'environ un facteur 2 entre les périodes glaciaires (350 ppbv) et les périodes interglaciaires (700 ppbv) avec un maximum absolu pendant toute cette période de  $773 \pm 15$  ppbv (à comparer avec la valeur actuelle de 1 800 ppbv en moyenne globale). On note aussi qu'avant 420 000 ans, alors que les périodes interglaciaires étaient plus froides, le maximum était généralement plus bas aussi (autour de 600 ppbv), légèrement inférieur aux valeurs pendant le début de l'Holocène (Spahni *et al.*, 2005). La succession de cycles glaciaires-interglaciaires qui apparaît clairement dans les archives glaciaires s'explique par la théorie de Milankovitch : elle est due en premier lieu au changement d'insolation au sommet de l'atmosphère du fait de changement des paramètres astronomiques de l'orbite de la Terre autour du soleil (excentricité, obliquité de l'écliptique et précession). Le climat répond aux modifications d'insolation, notamment par un changement d'albédo en lien avec

l'étendue de la cryosphère et des différents types de végétation, mais aussi au travers de modifications du cycle du carbone ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) qui amplifient le changement radiatif dû à l'insolation. La période dominante au cours des 8 derniers cycles est de l'ordre de 100 000 ans.

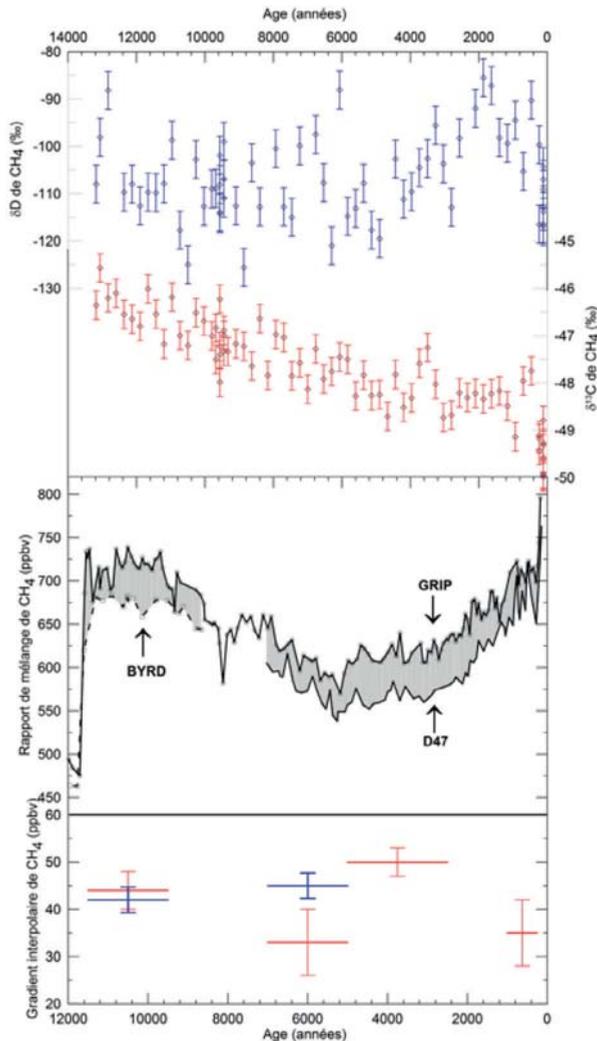


Figure 4.2 : Variation de la concentration du  $\text{CH}_4$  pendant l'Holocène (au centre, en noir ; GRIP est relatif au Groenland tandis que D47 et BYRD sont relatifs à l'Antarctique), ainsi que du gradient interpolaire (en bas, selon deux études), et (en haut) des rapports isotopiques D/H (en bleu) et  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  (en rouge).

D'après Chappellaz *et al.* [1997], Brook *et al.* [1999] et Sowers [2010].

Les changements de concentration de CH<sub>4</sub> entre les périodes glaciaires et interglaciaires ont trois causes principales possibles : l'augmentation en période interglaciaire des émissions des zones humides tropicales du fait de l'augmentation des précipitations de mousson sur les continents (Chappellaz *et al.*, 1993), la reprise des émissions des zones humides boréales après un arrêt total de celles-ci pendant les périodes glaciaires où ces régions sont largement couvertes de calottes (Fischer *et al.*, 2008) et une diminution de l'efficacité du puits atmosphérique de méthane – l'oxydation par les radicaux hydroxyyles OH (Thompson *et al.*, 1993).

Ces conclusions sont confortées par l'analyse des rapports isotopiques <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C et D/H du méthane piégé dans la glace (Fisher *et al.*, 2008). Cette analyse combinée aux informations sur le gradient interpolaire (Antarctique « moins » Groenland) de CH<sub>4</sub> suggère que les émissions dues aux feux de biomasse ne changent pratiquement pas entre périodes glaciaires et interglaciaires (Fischer *et al.*, 2008). Quantitativement, le rôle de chaque mécanisme dans le doublement de la concentration de CH<sub>4</sub> lors de la dernière transition glaciaire-interglaciaire peut se résumer en l'état de nos connaissances actuelles à :

- i) une augmentation du temps de résidence du méthane dans l'atmosphère d'environ 30 %,
- ii) une augmentation des émissions des zones humides boréales de 50 millions de tonnes par an,
- iii) une augmentation des émissions des zones humides tropicales de 55 millions de tonnes par an, et
- iv) une faible augmentation des émissions des feux de végétation, de seulement 6 millions de tonnes par an. Ces analyses permettent aussi de conclure au rôle négligeable de possibles dégazages d'hydrates de méthane piégés dans les sédiments marins, et confirment le rôle des zones humides continentales comme la principale source naturelle de méthane, tant en région tropicale qu'en région boréale.

## VARIATIONS PENDANT L'Holocène

Au cours de cette période interglaciaire, il est intéressant de constater que le climat a changé de façon non négligeable, quoique de manière bien moins importante que les variations rencontrées sur les échelles plus longues discutées

dans la section précédente. Les concentrations de méthane ont varié jusqu'à 15 % au cours de l'Holocène pour un changement de température globale de  $\pm 1$  °C [figure 4.1]. En s'appuyant sur une quantification des variations du gradient interpolaire de méthane sur cette période de temps, Chappellaz *et al.* (1997) ont proposé que la variation du cycle hydrologique aux basses latitudes soit le processus de contrôle dominant de l'évolution du méthane durant la première moitié de l'Holocène. En revanche, ces auteurs attribuent l'augmentation sur les 5000 dernières années à une expansion massive des marécages et des tourbières boréales. Le gradient interpolaire plus réduit sur la période étudiée la plus récente (le dernier millénaire) conduit les mêmes auteurs à invoquer l'effet des émissions de CH<sub>4</sub> d'origine anthropique (culture de riz, élevage). Cette hypothèse a été reprise avec un argumentaire plus poussé par un chercheur américain (Ruddiman, 2003), qui invoque plus largement un impact anthropique significatif sur le cycle de CH<sub>4</sub> mais aussi de CO<sub>2</sub> dès le milieu de l'Holocène. Si cette hypothèse semble de moins en moins plausible pour le CO<sub>2</sub> à la lueur d'analyses isotopiques de ce gaz dans la glace (Elsig *et al.*, 2009), elle n'a pas encore été réfutée pour le cas du méthane. Les analyses isotopiques de CH<sub>4</sub> conduites par Sowers (2010) suggèrent toutefois qu'une contribution croissante des marécages boréaux durant l'Holocène expliquerait l'essentiel de la tendance du méthane et des rapports isotopiques.

## VARIATIONS DEPUIS LA PÉRIODE INDUSTRIELLE

L'évolution spectaculaire du méthane au cours du dernier millénaire se concentre sur les deux derniers siècles (figure 4.2), avec une augmentation de  $\sim 1\ 100$  ppbv accompagnée d'une augmentation du rapport isotopique <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C d'environ 2‰, et de 15‰ pour le rapport D/H. Ces trois augmentations reflètent l'apport considérable de nouvelles sources anthropiques : culture du riz, élevage de ruminants, décharges, feux de végétation, extraction et distribution du gaz et du charbon.

Durant la période s'étendant des années 1 000 à 1 800, on observe de faibles fluctuations du méthane, de l'ordre de 50 ppbv (figure 4.3). Elles semblent correspondre approximativement aux périodes de l'optimum

médiéval et du petit âge glaciaire. Des mesures récentes de l'évolution du monoxyde de carbone et de ses isotopes grâce aux carottes de glace suggèrent que l'évolution de l'intensité et de la fréquence des feux de végétation constituerait un facteur déterminant de contrôle de cette variabilité naturelle sur le dernier millénaire (Wang *et al.*, 2010).

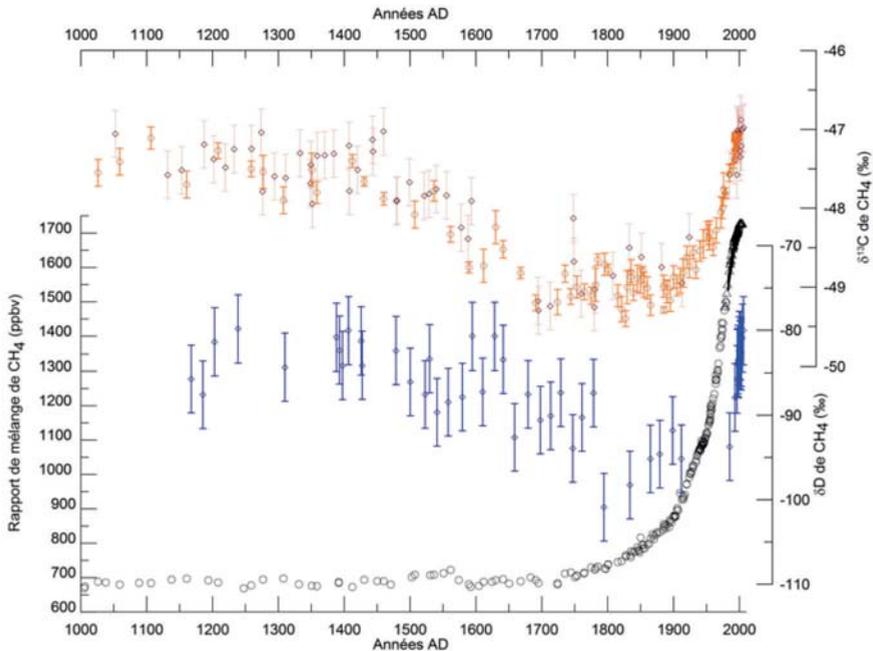


Figure 4.3 : Variation de la concentration du CH<sub>4</sub> au cours du dernier millénaire (en noir) ainsi que des rapports isotopiques D/H (en bleu) et <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C (en rouge et orange).  
D'après MacFarling Meure *et al.* (2006), Ferretti *et al.* (2005), et Mischler *et al.* (2009).

## RÉTROACTIONS CLIMATIQUES SUR LE CYCLE DU MÉTHANE ET ÉVOLUTION FUTURE

On a vu au chapitre 2 que les sources de méthane atmosphérique sont à la fois d'origine naturelle et anthropique. Nous examinons maintenant comment le changement climatique peut venir modifier à la fois les sources naturelles de méthane et, dans le futur, sa durée de vie dans l'atmosphère. Les zones humides, le pergélisol et les sédiments marins sont en effet susceptibles de répondre au réchauffement

climatique et de générer une augmentation des émissions de méthane. Le méthane étant un puissant gaz à effet de serre, ces émissions peuvent venir accélérer le changement climatique, ce qui constitue une rétroaction climatique positive dont il convient d'estimer l'importance. Par ailleurs, le pouvoir oxydant de l'atmosphère va aussi répondre au changement climatique, via une modification des émissions naturelles et anthropiques de gaz réactifs (NO<sub>x</sub>, composés organiques volatils ou COV) ou encore via une augmentation des températures et de l'humidité. Cette modification du pouvoir oxydant de l'atmosphère a un impact direct sur la durée de vie du méthane et donc sur les concentrations atmosphériques.

## Zones humides

La manière dont les émissions des zones humides vont répondre au changement climatique futur résultera à la fois des changements dans l'étendue des zones humides et des émissions de méthane par unité de surface. L'étendue des zones humides est difficile à prévoir car elle dépend de l'humidité du sol, qui dépend de multiples processus et paramètres, comme les précipitations, l'évapotranspiration et le ruissellement, qui eux-mêmes répondent au changement climatique. Par exemple, une fonte des neiges qui arriverait plus tôt dans la saison peut augmenter le ruissellement et diminuer l'étendue des zones humides en été. Enfin, le dégel du pergélisol peut aussi venir modifier l'étendue des zones humides, cet aspect des choses est discuté dans la section suivante. Les émissions de méthane par unité de surface dépendent de la température qui gouverne l'activité microbienne mais aussi de l'humidité du sol.

On peut aussi souligner que le dépôt de composés soufrés peut avoir un impact sur les émissions de méthane car certaines bactéries ont une forte affinité avec l'hydrogène et l'acétate, qui sont deux éléments nécessaires à la méthanogénèse. On pense donc que les pluies acides générées par l'utilisation de combustibles fossiles (charbon et pétrole principalement) ont causé une réduction des émissions de CH<sub>4</sub> dans les zones humides où ces dépôts ont eu lieu. Dans un futur plus ou moins rapproché, les dépôts acides vont sans doute diminuer dans les régions du globe où elles ne diminuent pas déjà, en raison des politiques d'amélioration de la qualité de l'air, ce qui impliquera alors une augmentation probable des émissions de méthane (Gauci *et al.*, 2004).

Diverses études ont estimé l'augmentation des émissions de méthane due au changement climatique à partir de modèles de climat couplés à une représentation simplifiée des zones humides et des émissions de méthane qui y sont associées. O'Connor *et al.* (2010) ont synthétisé ces études qui montrent une augmentation des émissions de 10 à 35 % par °C de réchauffement global. Cette rétroaction ajoute une augmentation supplémentaire de température pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle qui varie de 1 à 8 % selon les modèles et les scénarios considérés. Des expériences de terrain sont souhaitables pour mieux comprendre la réponse des zones humides aux changements de température, de précipitation et d'humidité du sol.

## Pergélisol continental

Selon Schuur *et al.* (2008), les quantités de carbone stockées dans les régions de pergélisol atteignent 1 672 Gt, réparties entre 277 Gt pour les tourbières gelées, 407 Gt dans la yedoma sibérienne, 747 Gt dans les autres sols et 241 Gt dans les sédiments alluviaux des grands deltas. Cette estimation inclut le carbone qui se trouve sous le pergélisol. Tarnocai *et al.* (2009) en ont déduit une distribution des stocks de carbone dans les régions boréales. Il est remarquable que certains pergélisols datent de plus de 700 000 ans, ce qui implique que le pergélisol a survécu à plusieurs cycles glaciaires-interglaciaires, y compris à des périodes prolongées plus chaudes localement que le climat actuel, comme le dernier interglaciaire il y a 125 000 ans. Les processus qui peuvent déstabiliser et dégeler le pergélisol peuvent être graduels, comme un approfondissement de la couche active et la formation de taliks, ou plus soudains, comme le thermokarst ou des feux. La question reste néanmoins posée de l'évolution du pergélisol dans des climats beaucoup plus chauds, comme par exemple dans ceux attendus lorsque le réchauffement climatique aura possiblement atteint des valeurs bien supérieures à celles connues aujourd'hui.

L'approfondissement de la couche active peut résulter d'un dégel plus long et plus intense pendant l'été et d'un regel plus court et moins intense pendant l'hiver. Ce processus est modulé par une éventuelle augmentation de l'humidité du sol qui conduit à une augmentation de la capacité thermique du sol, mais aussi à une augmentation de sa conductivité thermique et donc du couplage avec l'atmosphère. Les autres processus à considérer sont l'augmentation de la couverture neigeuse qui isole le sol et l'empêche de regeler, la croissance de la végétation qui modifie

l'humidité du sol de manière différente selon les types de végétation (arbustes ou mousses) et le dégagement de chaleur qui provient de la décomposition microbienne de la matière organique. Le réchauffement peut conduire à des zones de taliks, sièges de décomposition de la matière organique et de production de  $\text{CH}_4$ . Au final, c'est l'humidité du sol et la fraction de pergélisol dégelé inondé qui sont les paramètres clés déterminants, selon que la décomposition du carbone contenu dans le pergélisol aura lieu de manière aérobie (production de  $\text{CO}_2$ ) ou anaérobie (production de  $\text{CH}_4$ ). Si le méthane diffuse dans le sol jusqu'à un niveau où l'oxygène est présent, il peut y être oxydé par les bactéries méthanotrophes avant de rejoindre l'atmosphère. Néanmoins, s'il est produit en grande quantité, le méthane peut aussi s'échapper sous forme de bulles. Une situation de sécheresse peut aussi déclencher des feux qui émettent à la fois du  $\text{CO}_2$  et des quantités appréciables de  $\text{CH}_4$ , mais conduisent à diminuer le stock de carbone susceptible d'émettre du méthane par la suite. Le lecteur intéressé consultera l'article de revue de O'Connor *et al.* (2010) pour plus de détails sur le sujet.

Au final, il est donc très difficile de quantifier la quantité de méthane qui proviendra du dégel du pergélisol. Les modèles s'accordent à dire que le pergélisol va continuer de fondre pendant le  $\text{xxi}^{\text{e}}$  siècle, les estimations allant jusqu'à 50 % de fonte, ou plus, d'ici à 2100. Seules quelques études ont cherché à établir des estimations globales quant aux émissions de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  et celles-ci sont beaucoup plus incertaines. Khvorostyanov *et al.* (2008a) estiment que 75 % des 500 Gt C contenus dans le yedoma peuvent s'échapper dans l'atmosphère dans les trois à quatre prochains siècles. Dans une autre étude, Khvorostyanov *et al.* (2008b) estiment que ceci constituera entre 2100 et 2200 une source de  $\text{CO}_2$  de  $236 \text{ kg C m}^{-2}$  accompagnée d'une source de  $\text{CH}_4$  de  $20 \text{ kg C m}^{-2}$  (soit 8 % du total) pour un site particulier de yedoma. Le rôle des changements de végétation sur la dynamique du pergélisol et des émissions de méthane reste quant à lui particulièrement incertain.

## Les hydrates de méthane marins

Les clathrates sont des composés cristallins où les atomes forment une cage capable de piéger des molécules à l'intérieur. On parle d'hydrate de méthane quand la cage est composée de molécules d'eau et le gaz piégé est du méthane. Dans les

hydrates de méthane naturels, le gaz peut être d'origine biogénique (dans la majorité des cas), volcanique ou thermogénique (produit de manière non-biologique à partir de la matière organique soumise à une haute température). Les hydrates sont généralement associés à la présence de pergélisol profond ou aux marges sédimentaires à des profondeurs excédant 500 m, c'est-à-dire là où la pression est suffisamment élevée pour que les clathrates soient thermodynamiquement stables.

La figure 4.4 illustre comment la zone de stabilité des hydrates de méthane varie en fonction des situations pour le pergélisol continental, les zones côtières et l'océan profond. Le volume occupé par la zone de stabilité dépend du gradient géothermal qui reste par ailleurs mal connu (généralement entre 25 et 30 °C km<sup>-1</sup>). La quantité d'hydrates de méthane présente au fond des océans reste incertaine. Les estimations ont été revues à la baisse depuis les années 1970 et le consensus, basé en particulier sur les travaux d'Archer *et al.* (2009), est de 170 à 1 000 Gt C sous forme d'hydrates et autant sous forme de gaz stocké sous la zone de stabilité. Le lecteur pourra se référer à l'article de O'Connor *et al.* (2010) pour une discussion plus approfondie sur les clathrates et les inventaires d'émissions.

Il est légitime de se demander comment les changements de pression et de température au fond des océans, attendus du fait du réchauffement climatique, sont de nature à déstabiliser les hydrates de méthane présents dans les sédiments. En eau peu profonde, un réchauffement peut déstabiliser les hydrates à la fois par le dessus et le dessous, alors qu'en eau profonde la déstabilisation ne peut arriver que par le dessous de la couche de stabilité. Compte tenu des constantes de temps associées au réchauffement de l'océan profond et de la diffusion de chaleur dans les sédiments (plusieurs milliers d'années), nous ne nous préoccupons ici que des hydrates de méthane situés dans les zones côtières, en particulier dans l'océan Arctique, dont on sait par ailleurs qu'il se réchauffe rapidement. Les mécanismes de déstabilisation des hydrates sont compliqués et peuvent se manifester au travers de cheminées de méthane si les hydrates sont déstabilisés par en dessous ou des glissements de terre sous-marins. Il est à noter que les dégazages de méthane qui ont été observés dans l'océan Arctique ne sont pas nécessairement, et sans doute pas, d'origine anthropique. Les fonds marins des zones côtières étaient en contact avec l'atmosphère et la glace lors du dernier maximum glaciaire du fait de la réduction du niveau de la mer à cette époque. Ces fonds marins continuent de se réchauffer du simple fait qu'ils sont maintenant en contact avec l'eau de l'océan dont la température est beaucoup plus élevée que la température à laquelle ils

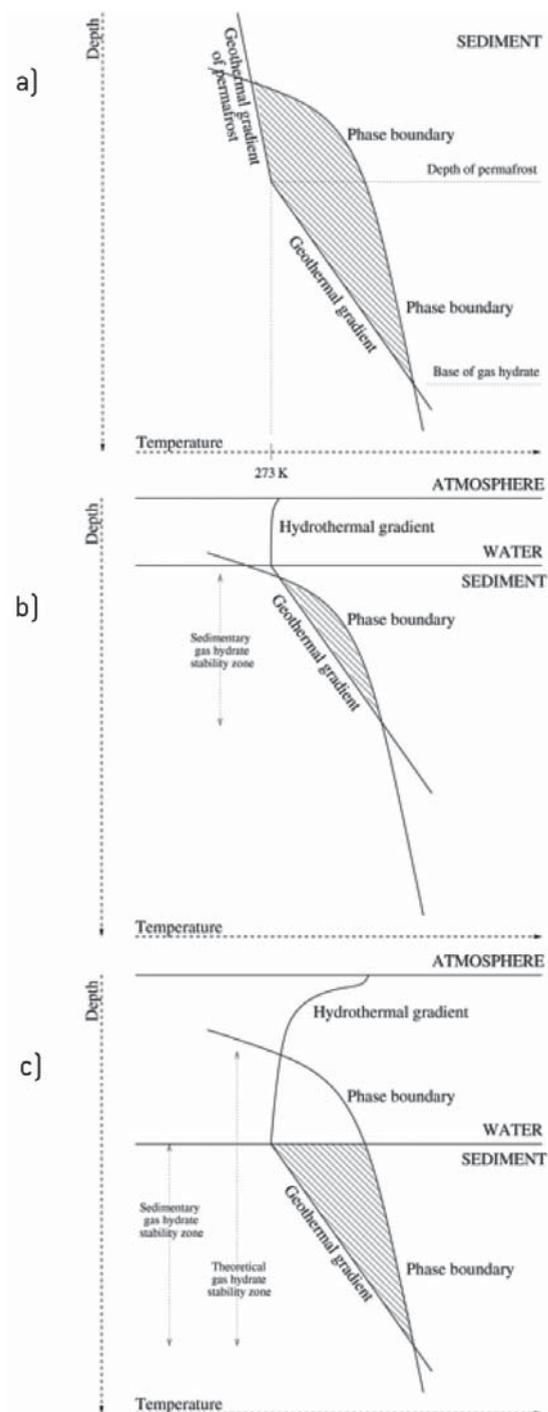


Figure 4.4 : Zone de stabilité des hydrates de méthane pour trois situations typiques : pergélisol continental [a], zones côtières [b] et océan profond [c]. D'après O'Connor *et al.* [2010].

étaient soumis lors du dernier maximum glaciaire. La perturbation anthropique reste encore sans doute minime. Il est d'ailleurs probable qu'une bonne partie du méthane émis par ces zones de pergélisols submergés provient de la décomposition actuelle de la matière organique « dégelée », et non de dégazage de clathrates de méthane plus en profondeur. Toutefois, il est clair que le réchauffement attendu de l'océan arctique est de nature à déséquilibrer une partie des hydrates, sur des constantes de temps qui restent mal évaluées.

Il est également important de s'intéresser au devenir du méthane une fois qu'il a été émis au fond de l'océan. Les indications contenues dans la littérature scientifique sont contradictoires. D'un côté, les observations et des simulations numériques montrent qu'une fraction importante du méthane peut atteindre la surface de l'océan si le méthane est émis en grande quantité ou sous la forme de bulles, en particulier dans les zones peu profondes. De l'autre côté, la dissolution du méthane émis au fond de l'océan, le mélange en profondeur et l'oxydation du méthane par les bactéries semblent jouer aussi un rôle très important. Nous n'avons donc qu'une vision très fragmentaire du cycle du méthane dans l'océan, mais des mesures montrent que certaines régions de l'océan Arctique sont déjà saturées en méthane.

Il est possible de conclure ici que le réchauffement climatique peut conduire à la déstabilisation d'une partie des hydrates de méthane présents dans les sédiments et dans le pergélisol. Pour la majorité des hydrates, les constantes de temps sont de l'ordre de plusieurs millénaires et n'accéléreront donc pas le réchauffement climatique des prochains siècles, d'autant qu'il faut garder à l'esprit que cette décomposition est endothermique et tend donc à auto-stabiliser le réservoir d'hydrates de méthane si la décomposition est générée par une augmentation de température plutôt que par une diminution de pression. Pour certaines régions côtières, les constantes de temps associées à cette déstabilisation sont sans doute plus courtes, mais mal évaluées. La fraction du méthane émis au fond de l'océan qui entrerait dans l'atmosphère suite à une déstabilisation est mal contrainte, mais est sans doute faible. Elle dépendra essentiellement de la capacité du filtre microbien<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Dans un milieu riche en sulfates comme l'eau de mer et le sédiment marin, une voie très importante d'oxydation du méthane implique des archées méthanotrophes. Celles-ci vivent en symbiose avec des bactéries sulfato-réductrices. Elles oxydent le méthane selon une voie anaérobie, au contraire des bactéries méthanotrophes dans les sols qui utilisent une voie aérobie.

à l'interface eau-sédiment et de la colonne d'eau à oxyder rapidement ce méthane pour le rendre au cycle du carbone océanique plutôt qu'à l'atmosphère.

## Impact du réchauffement climatique sur la chimie du méthane

Il n'est pas possible ici d'entrer dans le détail, très complexe et non-linéaire, de la chimie du méthane (voir chapitres 1 et 2 pour quelques généralités). La durée de vie du méthane dans l'atmosphère augmente avec sa concentration. Autrement dit, le méthane additionnel émis actuellement a une durée de vie d'environ 12 ans, au lieu de 8 à 9 ans pour le méthane déjà présent. Le réchauffement climatique induit par ailleurs une accélération du puits atmosphérique de méthane (effet de température et d'humidité). Cette réduction de la durée de vie due à la cinétique chimique est de l'ordre de 3 % pour un réchauffement de 4 °C. En revanche, la durée de vie du méthane (et donc sa concentration) pourrait augmenter si les émissions biogéniques de composés organiques volatils (COVs) par la végétation augmentent avec le changement climatique. Les émissions biogéniques de COVs augmentent en effet avec la température, mais diminuent avec la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>. Elles dépendront aussi des scénarios d'utilisation des sols et en particulier de la production de biocarburants. Lathière *et al.* (2005) suggèrent une augmentation de 75 % des émissions de COV d'ici à 2100, ce qui correspondrait à une augmentation de la durée de vie du méthane du même ordre de grandeur que la diminution attendue du fait de la cinétique chimique.

## CONCLUSIONS

L'amplitude des rétroactions climatiques impliquant le CH<sub>4</sub> est représentée de manière semi-quantitative sur la figure 4.5. Elle montre que les rétroactions les plus puissantes, associées à la déstabilisation des clathrates de méthane, sont à la fois les plus incertaines et celles qui opèrent sur les échelles de temps les plus longues. Les rétroactions associées au dégel du pergélisol pourraient intervenir sur l'échelle du siècle. Si la fonte du pergélisol est relativement certaine, la

vitesse à laquelle cette fonte interviendra, la quantité de carbone qui sera émise vers l'atmosphère et la fraction de ce carbone émis qui le sera sous forme de méthane, restent très mal contraints. D'autres rétroactions impliquant les zones humides et des modifications de la chimie atmosphérique joueront un rôle dans le bilan futur du méthane et peuvent contribuer à amplifier le réchauffement climatique mais dans une mesure qui reste modeste par rapport aux autres rétroactions climatiques.

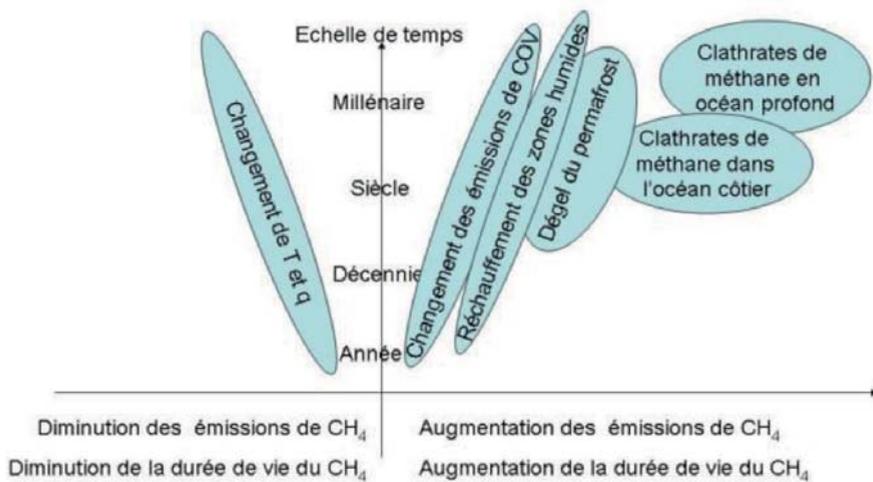


Figure 4.5 : Figure illustrant de manière semi-quantitative les variations futures des émissions et de la durée de vie du méthane en fonction des échelles de temps considérées. Adapté de O'Connor *et al.* (2010). Dans l'ellipse de gauche « T » désigne la température et « q » l'humidité.

## RÉFÉRENCES

1. Archer D., Buffett B. and Brovkin V., *Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106** (49), 20596–20601, 2009.
2. Brook E.J., Harder S., Severinghaus J.P. and Bender M., *Atmospheric methane and millennial-scale climate change*, in : *Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales* (ed. P.U. Clark, R.S. Webb and L.D. Keigwin), *Geophysical Monograph series 112*, p. 165-176, American Geophysical Union, 1999.
3. Chappellaz J.A., Fung I.Y and Thompson A.M., *The atmospheric CH<sub>4</sub> increase since the last glacial maximum. 1. Source estimates*, *Tellus* **45B**, 228-241, 1993.
4. Chappellaz J., Blunier T., Kints S., Dallenbach A., Barnola J.M., Schwander J., Raynaud D. and Stauffer B., *Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Holocene*, *J. Geophys. Res.* **102**, 15987-15997, 1997.
5. Elstig, J., Schmitt, J., Leuenberger, D., Schneider, R., Eyer, M., Leuenberger, M., Joos, F., Fisher, F., et Stocker, T.F., *Stable isotopes constraints on Holocene carbon cycle changes from an Antarctic ice core*, *Nature* **461**, 507-510, 2009
6. Ferretti D.F., Miller J.B., White J.W.C., Etheridge D.M., Lassey K.R., Lowe D.C., MacFarling Meure C.M., Dreier M.F., Trudinger C.M., van Ommen T.D. and Langenfelds R.L., *Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years*, *Science* **309**, 1714-1717, 2005.
7. Fischer H., Behrens M., Bock M., Richter U., Schmitt J., Loulergue L., Chappellaz J., Spahni R., Blunier T., Leuenberger M. and Stocker T.F., *Changing boreal methane sources and constant biomass burning during the last termination*, *Nature* **452**, 864-867, 2008.
8. Gauci V., Matthews E., Dise N., Walter B., Koch D. and Granberg G., *Sulfur pollution suppression of the wetland methane source in the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries*, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **101**, 34, 12583-12587, 2004.
9. Khvorostyanov D., Krinner G., Ciais P., Heimann M. and Zimov S.A., *Vulnerability of permafrost carbon to global warming, Part I. Model description and role of heat generated by organic matter decomposition*, *Tellus*, doi : 10.1111/j.1600-0889.2007.00333.x, 2008a.
10. Khvorostyanov D., Ciais P., Krinner G., Zimov S.A., Corradi C. and Guggenberger G., *Vulnerability of permafrost carbon to global warming, Part II. Sensitivity of permafrost carbon stock to global warming*, *Tellus*, doi : 10.1111/j.1600-0889.2007.00336.x, 2008b.
11. Lathière J., Hauglustaine D.A., de Noblet-Ducoudré N., Krinner G. and Folberth G.A., *Past and future changes in biogenic volatile organic compound emissions simulated with a global dynamic vegetation model*, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L20818, doi : 10.1029/2005GL024164, 2005.

12. MacFarling Meure C., Etheridge D., Trudinger C., Steele P., Langenfelds R., van Ommen T., Smith A. and Elkins J., *Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O records extended to 2000 years BP*, *Geophys. Res. Lett.* 33, L14810, doi : 10.1029/2006GL026152, 2006.
13. Mischler J. A., Sowers T. A., Alley R. B., Battle M., McConnell J. R., Mitchell L., Popp T., Sofen E. and Spencer M.K., *Carbon and hydrogen isotopic composition of methane over the last 1000 years.*, *Global Biogeochemical Cycles* 23, GB4024, doi : 10.1029/2009GB003460, 2009.
14. O'Connor F.M., Boucher O., Gedney N., Jones C.D., Folberth G.A., Coppel R., Friedlingstein P., Collins W.J., Chappellaz J., Ridley J. and Johnson C.E., *Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change : A review*, *Rev. Geophys.* 48, RG4005, doi : 10.1029/2010RG000326, 2010.
15. Ruddiman, W.F., *The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago*, *Climatic Change* 61, 261-293, 2003
16. Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J., Euskirchen E., Field C.B., Goryachkin S.V., Hagemann S., Kuhry P., Lafleur P., Lee H., Mazhitova G., Nelson F.E., Rinke A., Romanovsky V., Shiklomanov N., Tarnocai C., Venevsky S., Vogel J.G. and Zimov S.A., *Vulnerability of permafrost carbon to climate change : Implications for the global carbon cycle*, *BioScience* 58, 701-714, 2008.
17. Sowers T., *Atmospheric methane isotope records covering the Holocene period*, *Quaternary Science Reviews* 29, 213-221, 2010.
18. Spahni R., Chappellaz J., Stocker T.F., Loulergue L., Hausammann G., Kawamura K., Flückiger J., Schwander J., Raynaud D., Masson-Delmotte V. and Jouzel J., *Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores*, *Science* 310, 1317-1321, 2005.
19. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G. and Zimov S., *Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region*, *Glob. Biogeochem. Cycles* 23, doi : 10.1029/2008GB003327, 2009.
20. Thompson A.M., Chappellaz J., Fung I.Y. and Kucsera T.L., *The atmospheric CH<sub>4</sub> increase since the last glacial maximum, 2. Interactions with oxidants*, *Tellus*, 45B, 242-257, 1993.
21. Wang Z., Chappellaz J., Park K. and Mak J.E., *Large variations in Southern hemisphere biomass burning during the last 650 years*, *Science* 330, 1663-1666, 2010.
22. Wolff E.W., Chappellaz J., Blunier T., Rasmussen S.O. and Stevenson A. *Millennial-scale variability during the last glacial : The ice core record*. *Quaternary Science Reviews* 29 (21-22), 2828-2838, 2010

## Chapitre 5

# ÉQUIVALENCE « CARBONE » DU MÉTHANE

Ce chapitre examine les différentes manières d'estimer l'équivalence CO<sub>2</sub> du méthane et discute leurs raisons d'être. Il se place essentiellement dans un cadre théorique et n'aborde pas les problèmes pratiques d'implémentation des politiques du changement climatique.

## PROTOCOLE DE KYOTO ET POLITIQUES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) autres que le dioxyde de carbone est très intéressante car elle permet de réduire la facture des politiques climatiques de 30 à 40 % (van Vuuren *et al.*, 2006). Pour ce faire, un poids est attribué à chaque GES par comparaison avec le dioxyde de carbone. Cela permet d'établir une équivalence entre les différents GES en vue de traiter globalement leur réduction.

Le protocole de Kyoto reste à l'heure actuelle le seul accord international de réduction des émissions de GES. Le méthane fait partie du panier de six GES couvert par ce protocole. Les totaux d'émissions et les objectifs de réduction y sont fixés par pays en terme de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>, libre ensuite aux pays signataires de répartir leur effort sur les différents GES comme ils l'entendent. C'est le pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans, sur lequel nous revenons dans la section

suivante, qui est utilisé pour fixer les équivalences. Le méthane est un GES plus efficace que le CO<sub>2</sub>, une réduction d'émission de 1 tonne de CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère équivaut donc à une réduction de 25 tonnes de CO<sub>2</sub><sup>21</sup>.

De plus, pour atteindre leurs objectifs de réductions d'émissions, certains pays (ou groupe de pays comme l'Europe) ont introduit une bourse aux émissions de carbone. Des droits à émettre sont attribués aux entreprises en fonction de critères déterminés par le régulateur (par exemple attribution gratuite ou mise aux enchères). Ces droits sont ensuite négociés et échangés sur la bourse aux émissions de CO<sub>2</sub>. L'idée sous-jacente de cette équivalence est que le marché va réaliser les réductions d'émissions là où elles coûtent le moins cher. Une entreprise qui peut facilement réduire ses émissions peut les réduire en-dessous de son quota et monnayer la différence sur le marché. À l'inverse une entreprise qui peut difficilement réduire ses émissions pourra acheter des droits d'émissions à moindres frais.

À l'heure actuelle, la plupart des bourses aux émissions ne permettent en fait que d'échanger des émissions de CO<sub>2</sub>, mais il est envisageable d'y inclure aussi certaines émissions de CH<sub>4</sub> ou d'autres GES (c'est le cas par exemple de la bourse d'émissions de Nouvelle-Zélande qui prévoit d'inclure les émissions de CH<sub>4</sub> par les décharges et certaines émissions du secteur agricole). Par ailleurs, le méthane fait partie des gaz qui peuvent donner lieu à des quotas d'émission dans le cadre du mécanisme de développement propre (MDP). Avec une équivalence du méthane de 25, si la tonne de CO<sub>2</sub> vaut 10 euros à la bourse aux émissions, la tonne de CH<sub>4</sub> peut alors être échangée pour 250 euros.

L'équivalence CO<sub>2</sub> du méthane affecte les politiques de changement climatique à plusieurs niveaux :

- ▶ tout d'abord les totaux d'émissions par pays dépendent du poids donné aux GES autres que le CO<sub>2</sub>. Plus les émissions d'un pays sont élevées, plus la communauté internationale est en droit d'espérer de ce pays des réductions d'émissions importantes. Un pays dont les émissions sont élevées va au contraire essayer de négocier un quota d'émissions plus élevé en arguant de

<sup>21</sup> Le pouvoir de réchauffement global à 100 ans pour le méthane a été estimé à 21 dans le second rapport d'évaluation du GIEC (valeur utilisée par le protocole de Kyoto et dans le système européen d'échange de permis d'émissions), puis réévalué à 23 dans le troisième rapport d'évaluation et à 25 dans le quatrième rapport d'évaluation (Forster *et al.*, 2007).

la difficulté à réduire ses émissions rapidement. Le poids donné au méthane est donc un sujet sensible pour les pays qui ont des émissions anthropiques de méthane élevées de par leurs activités agricoles ou industrielles ;

- ▶ au niveau des politiques nationales, le poids du méthane va influencer sur la priorité accordée aux différents programmes de réduction des émissions ;
- ▶ le poids du méthane est aussi important dans le cadre des échanges réalisés via les mécanismes de développement propre ou sur les bourses d'émissions lorsque celles-ci incluent certaines émissions de CH<sub>4</sub>.

## POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Par définition le **pouvoir de réchauffement global (PRG)** absolu d'un gaz est égal au forçage radiatif cumulé généré par une émission ponctuelle d'un kg de ce gaz. Le cumul s'effectue jusqu'à un horizon temporel T, qui est généralement pris égal à 100 ans. Une définition mathématiquement équivalente est que le PRG absolu correspond au forçage radiatif au bout d'une période T pendant laquelle ce gaz est émis de façon constante [Dufresne, 2009]. Le PRG absolu d'un gaz a donc pour unité le Wm<sup>-2</sup>kg-1an. Le **PRG d'un gaz** est égal à son PRG absolu normalisé par celui du CO<sub>2</sub>. Il est donc fonction de son efficacité radiative, de sa durée de vie dans l'atmosphère et de l'horizon temporel choisi pour l'intégration temporelle. Les PRGs du méthane pour des horizons temporels de 20, 100 et 500 ans sont respectivement de 72, 25 et 7 [Forster *et al.*, 2007]. De manière générale, les gaz qui ont une durée de vie plus courte que le CO<sub>2</sub> ont des PRGs qui décroissent avec l'horizon temporel, et inversement, les gaz qui ont une durée de vie plus longue que celle du CO<sub>2</sub> voient leurs PRG augmenter avec l'horizon temporel. Un horizon temporel de 100 ans s'est vite imposé comme étant la norme (en particulier dans le cadre du protocole de Kyoto) car il représente la durée typique sur laquelle le problème du changement climatique se pose, mais il est clair que ce choix est quelque peu arbitraire. On peut remarquer que la totalité des GES d'intérêt climatique ont des PRGs à 100 ans plus grands que l'unité en raison de la très faible efficacité radiative du CO<sub>2</sub> par unité de masse. En résumé, le PRG est une mesure du forçage radiatif intégré généré par une émission ponctuelle d'un GES, mesure égale au forçage radiatif à la fin d'une période donnée pendant laquelle le GES a été émis de façon constante.

## QUEL POIDS ATTRIBUER AU MÉTHANE ?

Deux écoles s'affrontent sur l'importance des réductions des émissions de méthane dans la lutte contre le changement climatique (Boucher, 2010).

Les premiers pensent qu'il faut réduire les émissions de méthane dès maintenant et de façon notable car, compte tenu de la relative courte durée de vie du méthane, cela conduira à une diminution rapide du forçage radiatif par ce gaz et donc à un ralentissement du changement climatique. Le même argument s'applique à d'autres espèces chimiques à courte durée de vie comme l'ozone troposphérique, autre GES, et le carbone-suie, un type d'aérosol qui contribue à réchauffer localement le climat (Hansen *et al.*, 2000). Bien sûr, ces objectifs plus ambitieux sur le méthane n'excluent pas qu'il faille aussi réduire les émissions de dioxyde de carbone. Cette logique plaide en faveur d'un poids plus élevé pour le méthane.

Les seconds estiment au contraire qu'il est plus important de se focaliser sur des réductions d'émissions de dioxyde de carbone car, en raison de sa longue durée de vie (plus d'un siècle), une partie importante du CO<sub>2</sub> émis aujourd'hui sera encore présente dans l'atmosphère au siècle prochain. Dans la mesure où la lutte contre le changement climatique a un coût, il est plus important de réduire au plus vite les émissions de CO<sub>2</sub>, voire d'investir dans la recherche et développement afin de pouvoir réduire à moindre coût les émissions de CO<sub>2</sub> un peu plus tard. Il sera toujours temps de réduire les émissions de méthane dans quelques décennies car, du fait de sa courte durée de vie, la concentration atmosphérique de méthane répondra rapidement aux réductions d'émissions.

Alors qui des premiers ou des seconds a raison ? En filigrane, on voit que les deux écoles de pensée portent un jugement de valeur sur l'imminence des impacts du changement climatique.

Pour les premiers, il est important de ralentir le changement climatique dès maintenant, soit pour réduire les impacts attendus dans les décennies qui viennent, soit pour enclencher une dynamique vertueuse dans la lutte contre le changement climatique. Toutefois, la lutte contre le changement climatique ayant un coût, on peut se poser la question de savoir si privilégier la lutte contre l'augmentation du méthane diminuera mécaniquement l'effort qui sera consenti sur le CO<sub>2</sub>.

Pour les seconds, le changement climatique est un problème à long terme (il convient par exemple de ne pas excéder un réchauffement de 2 ou 3 °C au cours de ce siècle et des siècles suivants) et l'on cherche le moyen optimal d'arriver à

cet objectif. Cela justifie un poids moindre à court terme pour le méthane, mais en contrepartie, le poids du méthane devra progressivement être ajusté à la hausse au fur et à mesure qu'on se rapprochera de l'objectif maximum de changement climatique à ne pas dépasser. Manne et Richels (2001) disposent d'un modèle intégré économie-climat qui permet de calculer la trajectoire optimale de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour un objectif climatique donné. Ils ont montré que pour un objectif de stabilisation à 2 °C, l'équivalence CO<sub>2</sub> du méthane augmente d'une valeur de 5 à 10 au début du XXI<sup>e</sup> siècle à une valeur de 40 à 50 à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. De manière similaire, van Vuuren et al. (2006) ont montré que les modèles économie-climat qui optimisent dans le temps le poids de méthane simulent des réductions de méthane moins fortes dans les cinquante prochaines années que les modèles où le poids du méthane est fixé à la valeur de son PRG à 100 ans (figure 5.1). Cependant, si l'on adopte aussi un objectif de limitation de la vitesse du réchauffement climatique à 0,2 °C par décennie, ce qui place une contrainte à court terme, Manne et Richels (2001) montrent que le poids du méthane prend une valeur autour de 20 à 30 pendant tout le XXI<sup>e</sup> siècle.

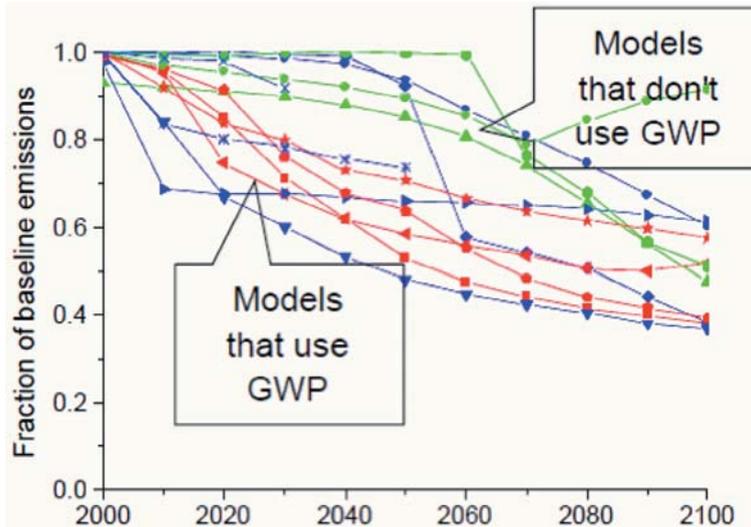


Figure 5.1 : Réductions des émissions de méthane simulées par divers modèles intégrés économie-climat pour stabiliser le forçage radiatif anthropique à 4,5 Wm<sup>-2</sup>. Les modèles qui utilisent le PRG [GWP en anglais] pour calculer les taux d'échange entre les gaz simulent des réductions de méthane plus rapides que ceux qui calculent ces taux d'échange en optimisant la trajectoire. D'après van Vuuren *et al.* (2006). © Elsevier

## POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL POUVOIR DE TEMPÉRATURE GLOBAL ET AUTRES MÉTRIQUES

La notion de PRG soulève néanmoins de nombreux problèmes :

- ▶ il dépend de l'horizon temporel qui résulte d'un choix arbitraire ;
- ▶ il ne prend pas en compte des variations futures de la composition chimique de l'atmosphère dans l'intégration temporelle du forçage radiatif ;
- ▶ il n'y a pas de lien clair entre le concept abstrait de forçage radiatif et un objectif concret de lutte contre le changement climatique (IPCC, 2009).

C'est pourquoi Shine *et al.* (2005, 2007) ont défini une nouvelle métrique, qu'ils ont appelée **pouvoir de changement de température global (PTG)**.

Le *PTG absolu* d'un gaz mesure le changement de température en moyenne globale à une échéance temporelle donnée induit par une émission ponctuelle de ce gaz (unité  $K.kg^{-1}$ ). Le **PTG d'un gaz** est égal à son PTG absolu normalisé par celui du  $CO_2$ . Shine *et al.* ont montré que, pour des espèces à courte durée de vie comme le méthane, le PTG prend des valeurs plus élevées que le PRG pour les horizons temporels courts, mais inversement des valeurs moins élevées que le PRG pour les horizons temporels longs. Ceci est dû au fait que le système climatique perd la mémoire d'une perturbation radiative initiale, si bien que pour un gaz à courte durée de vie comme le méthane, l'impact climatique dû à une émission ponctuelle est concentré sur les premières décennies suivant cette émission. Cela est illustré sur la figure 5.2. Pour le méthane, les PTG à 20, 50 et 100 ans valent respectivement 57, 12 et 4 (Fuglestad *et al.*, 2009). Pour une espèce à très courte durée de vie comme l'ozone troposphérique ou les aérosols de carbone-suie, la dépendance du PTG avec l'horizon temporel est encore plus importante (Boucher et Reddy, 2008). Il faut souligner cependant que les valeurs du PTG dépendent aussi des hypothèses faites sur la vitesse à laquelle l'océan profond absorbe et restitue l'énergie qui provient du déséquilibre radiatif initial. En ce sens, le PTG est une métrique dont le calcul est soumis à plus d'incertitudes que celui du PRG.

La multiplication des métriques pour mesurer l'équivalence des GES s'avère être un frein à la négociation et à un accord politique sur une politique de réduction des émissions. Tol *et al.* (2008) ont présenté un cadre unificateur des différentes métriques du changement climatique. D'un point de vue économique, on peut

procéder soit à une **analyse coût-bénéfice** qui cherche à minimiser le coût total du changement climatique en incluant à la fois les coûts d'atténuation (réduction des émissions), d'adaptation et le coût des dommages résiduels liés au changement climatique (après atténuation et adaptation), soit à une **analyse coût-efficacité** qui cherche à minimiser uniquement les coûts d'atténuation pour atteindre un objectif de changement climatique à ne pas dépasser. Tol *et al.* ont montré que l'analyse coût-efficacité se rapproche de l'analyse coût-bénéfice si les coûts des impacts du changement climatique sont pris nuls sous l'objectif climatique et infinis au-delà. Les deux approches diffèrent néanmoins dans leur traitement des cas extrêmes en particulier en présence d'incertitudes. On se place ici dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice pour une étude de sensibilité (Boucher, 2012). Celle-ci se traduit par la recherche de la stratégie de réduction d'émission qui minimise le coût total du changement climatique. L'analyse coût-bénéfice va dépendre de la **fonction de dommage** qui caractérise le coût des impacts climatiques et du **taux d'actualisation** sur lequel nous reviendrons.

On peut, chaque année, obtenir le poids relatif entre deux gaz en calculant le rapport des coûts respectifs de la réduction de chacun des gaz pour la stratégie d'émission optimale obtenue. En prenant le CO<sub>2</sub> comme référence, ce poids relatif est appelé **pouvoir de dommage global** (PDG ; *Global Damage Potential* en anglais) du gaz. Le poids relatif évolue en fonction du temps. Tol *et al.* montrent que le PRG est un cas particulier du PDG sous les hypothèses d'un horizon temporel fini, d'un taux d'actualisation nul, de concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre n'évoluant pas dans le temps, et de coûts des impacts du changement climatique proportionnels au forçage radiatif.

De fait, cette analyse permet de mieux comprendre les limites du PRG. Elle fait en particulier apparaître l'hypothèse implicite que les impacts du changement climatique sont proportionnels au forçage radiatif. Cette hypothèse n'est pas vérifiée. D'une part, il y a un décalage dans le temps entre forçage radiatif et changement de température, un problème qui a déjà été identifié par Dufresne (2009) et, d'autre part, les impacts du changement climatique ne sont pas forcément une fonction linéaire du changement de température global. Le seul cumul du forçage radiatif pour approximer les dommages du changement climatique est donc quelque peu curieux. Par ailleurs, l'absence de scénario sous-jacent et l'hypothèse de concentrations atmosphériques de GES constantes dans le temps posent également problème.

La valeur choisie pour le taux d'actualisation permet d'exprimer un choix entre importance du futur proche et importance du futur lointain. Plus il est grand et plus il « écrase » le poids du long terme, ce qui est parfois interprété comme allant à l'encontre des principes de précaution et de solidarité intergénérationnelle. Dans ce cas, le taux d'actualisation permet d'exprimer une préférence pour le présent, mais aussi l'hypothèse que la croissance économique et les progrès technologiques feront de l'atténuation et l'adaptation au changement climatique un problème moindre dans le futur lointain. Lecocq et Hourcade (2004) ont montré que la technique d'actualisation reste un passage obligé dans le processus de décision socio-économique. Mathématiquement, le choix d'une valeur du taux d'actualisation permet de s'affranchir du choix arbitraire d'un horizon temporel nécessaire pour le calcul du PRG. Cependant, le choix du taux d'actualisation, même s'il est lié au modèle économique, n'en reste pas moins controversé (Lecocq et Hourcade, 2004 ; Stern, 2007 ; Weitzman, 2007). Il représente un choix politique qui correspond à des valeurs et des principes éthiques. Ces valeurs ne sont pas forcément universelles et le degré de préférence pour le présent (ou à l'inverse pour le futur) dépend des cultures et, sans doute, des niveaux de vie des sociétés. La valeur du taux d'actualisation reflète un choix sur le degré de solidarité intergénérationnelle qui ne peut pas être déconnecté du degré de solidarité entre les peuples. On peut enfin noter que l'inverse du taux d'actualisation est en fait une constante de temps. On ne tranchera pas ici le débat du choix de la valeur du taux d'actualisation qui, on l'a vu, mêle arguments éthiques et économiques, mais on illustrera simplement ce que l'actualisation implique quand on calcule le poids du méthane.

Pour simplifier, nous considérons un scénario dans lequel l'augmentation de température,  $\Delta T(t)$ , passe de 1 °C en 2000 à 3 °C en 2100, puis est stabilisée au-delà. La manière dont les dommages du changement climatique doivent être mesurés fait l'objet de nombreuses recherches et il n'y a pas encore de consensus à ce sujet (Warren *et al.*, 2006). Il est cependant habituel de modéliser les dommages comme une fonction quadratique du changement de température pondérée par un taux d'actualisation et cumulée sur le temps (dans ce cas, on ne place cependant pas de contrainte sur la vitesse du changement climatique). Le PDG pour le méthane vaut 16 et 38 pour des taux d'actualisation valant respectivement 1 % et 3 % (voir figure 5.2). Ces valeurs sont à comparer à un PDG à 100 ans avec taux

d'actualisation nul, qui vaudrait 21 pour le scénario considéré (une valeur très proche du PRG à 100 ans).

On remarque donc à partir de ces calculs, qui n'ont qu'une valeur illustrative, que la prise en compte d'un taux d'actualisation élevé conduit à augmenter le poids du méthane en attachant moins d'importance sur le long terme et donc sur les impacts du CO<sub>2</sub>.

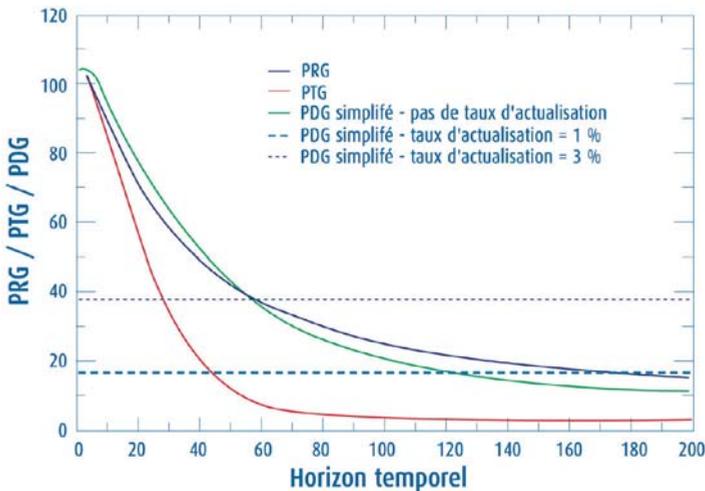


Figure 5.2: PRG, PTG et PDG simplifié pour le méthane en fonction de l'horizon temporel. Tireté : valeurs du PDG simplifié estimées pour des taux d'actualisation de 1 % et 3 % (indépendantes de l'horizon temporel).

Mais l'actualisation n'est pas un argument miracle pour les tenants d'une action rapide visant à réduire les émissions de méthane : l'inconvénient d'un taux d'actualisation élevé est aussi de conduire à déplacer l'équilibre entre atténuation et adaptation au changement climatique vers moins d'atténuation, plus d'adaptation et sans doute plus de dommages résiduels. En effet, le coût de l'atténuation porte sur le court terme pour des bénéfices qui se font sentir sur le long terme, tandis que le coût de l'adaptation, au contraire, se payera à plus long terme compte tenu de l'inertie du cycle du carbone et du système climatique. L'argument qui consiste à attribuer un poids moins élevé pour le méthane ne signifie pas qu'il ne faille pas agir maintenant pour réduire ce gaz, mais qu'il faut avant tout garder un certain équilibre entre réductions des émissions de CO<sub>2</sub> et de méthane.

## RÉDUCTION PONCTUELLE ET RÉDUCTION PÉRENNE DES ÉMISSIONS

La question se pose aussi de savoir comment valoriser une réduction pérenne d'émissions par rapport à une réduction ponctuelle dans le temps. Les métriques discutées ci-dessus (PRG et PTG) sont appropriées pour des émissions ponctuelles. Il paraît logique en effet d'utiliser une métrique qui corresponde à une émission ponctuelle pour échanger un permis d'émission qui n'a qu'une validité limitée dans le temps. On peut cependant définir une métrique pour une réduction pérenne d'émissions qui soit calquée sur le PTG en suivant Shine *et al.* (2005, 2007), mais avec un terme d'actualisation sur les impacts futurs pour représenter l'incertitude associée au fait que l'objectif climatique peut évoluer dans le temps. Dessus *et al.* (2008) relèvent à juste titre que le PRG est valable pour une émission ponctuelle à un instant donné et qu'une réduction pérenne des émissions de méthane conduit à une plus grande réduction du forçage radiatif cumulé en rapport au CO<sub>2</sub> à une échéance donnée que ne l'indique le PRG. Ceci est également vrai pour le PTG. Ces considérations ne justifient néanmoins pas d'utiliser une métrique pour des émissions continues plutôt que ponctuelles (Boucher, 2012). Tol *et al.* (2008) ont par ailleurs montré comment des métriques pour des émissions ponctuelles pouvaient être modifiées pour prendre en compte des effets dynamiques comme l'inertie du système économique due à la longévité du capital social ou la diminution progressive des coûts des réductions des émissions.

## CONCLUSIONS

Différentes stratégies, parfois antagonistes, ont été proposées en ce qui concerne la réduction des émissions de méthane dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Nous avons montré ici que le poids relatif à attribuer aux réductions de méthane (relativement au dioxyde de carbone) dépend de la métrique utilisée pour mesurer les impacts radiatifs ou climatiques, de l'objectif politique de lutte contre le changement climatique et, dans une certaine mesure, d'un jugement de valeur sur l'urgence du problème du changement climatique.

Pour une émission ponctuelle, il existe à la fois des arguments qui justifient un poids du méthane plus élevé que celui donné par son PRG à 100 ans (raccourcissement de l'horizon temporel, prise en compte d'un taux d'actualisation, volonté de limiter la vitesse du réchauffement climatique dans les prochaines décennies) et d'autres qui plaident pour un poids du méthane moins élevé (utilisation du changement de température plutôt que du forçage radiatif comme indicateur pertinent des impacts futurs du changement climatique, coût du changement climatique augmentant de manière quadratique avec le changement de température).

Quelle que soit la métrique utilisée, le poids du méthane reste tributaire d'un paramètre qui implique un jugement de valeur sur l'échelle de temps associée au problème du changement climatique (choix de l'horizon temporel pour le PRG, valeur du taux d'actualisation pour le PDG). On peut montrer cependant qu'il est difficile de construire un poids pour le méthane pour une émission ponctuelle qui aille au-delà d'une valeur située autour de 40. On a aussi montré que le poids du méthane doit augmenter au fur et à mesure que l'humanité se rapproche des impacts dangereux du changement climatique ou de l'objectif climatique qu'elle s'est fixé.

Le bénéfice d'une réduction pérenne des émissions de méthane par rapport à une réduction pérenne des émissions de CO<sub>2</sub> est plus élevé que ne l'indique le poids du méthane pour une émission ponctuelle. Cela ne justifie pas pour autant d'augmenter le poids du méthane pour une émission ponctuelle. On peut montrer en effet qu'un cadre régulateur qui augmente progressivement le prix du CO<sub>2</sub> et le poids du méthane pour une émission ponctuelle au cours du temps incite à des réductions pérennes d'émissions de méthane plus élevées. Au final, l'équivalence CO<sub>2</sub> du méthane dépend de l'usage que l'on veut en faire et une partie de la controverse sur l'équivalence du méthane semble être due à cette ambiguïté.

Il faut enfin souligner que des résultats récents suggèrent que le PRG du méthane doit être réévalué en raison d'effets indirects qui n'avaient pas été considérés jusque-là. Boucher *et al.* (2009) ont montré que l'oxydation du méthane en dioxyde de carbone doit être prise en compte dans le calcul des effets du méthane d'origine fossile, ce qui augmente son PRG à 100 ans de 25 à 27. Dans le cas contraire, il conviendrait de comptabiliser les émissions de méthane d'origine fossile à la fois comme méthane et comme dioxyde de carbone, ce qui n'est pas le cas actuellement. Shindell *et al.* (2009) estiment par ailleurs que les émissions de méthane contribuent à diminuer les concentrations du radical OH et limitent donc

l'oxydation du dioxyde de soufre en aérosols soufrés. Cet effet conduit à diminuer l'impact refroidissant de ce type d'aérosols et donc à réchauffer le climat. Cela augmenterait le PRG du méthane à 100 ans d'encore 10 à 30 %.

## RÉFÉRENCES

1. Boucher O., *Quel rôle pour les réductions d'émission de méthane dans la lutte contre le changement climatique ?*, *La Météorologie* 68, 35-40, 2010.
2. Boucher O. and Reddy M. S., *Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions*, *Energy Policy* 36, 193-200, doi: 10.1016/j.enpol.2007.08.039, 2008.
3. Boucher O., Friedlingstein P., Collins B. and Shine K.P., *Indirect GWP and GTP due to methane oxidation*, *Environmental Research Letters* 4 (044007), doi: 10.1088/1748-9326/4/4/044007, 2009.
4. Boucher O., *Comparison of physically- and economically-based CO<sub>2</sub>-equivalences for methane*, *Earth System Dynamics* 3, 49-61, 2012.
5. Dessus B., Laponche B. et Le Treut H., *Réchauffement climatique : importance du méthane*, *La Recherche* 417, 46-49, 2008.
6. Dufresne J.-L., *L'utilisation du potentiel de réchauffement global pour comparer les émissions de méthane et de dioxyde de carbone*, *La Météorologie* 64, 54-58, 2009.
7. Forster P.M. de F., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R.A., Fahey D.W., Haywood J.A., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M. and Van Dorland R., *Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing*, in: *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, pp. 129-234, 2007.
8. Fuglestvedt J.S., Shine K.P., Berntsen T., Cook J., Lee D.S., Stenke A., Skeie R.B., Velders G.J.M. and Waitz I.A., *Transport impacts on atmosphere and climate : metrics*, *Atmospheric Environment* 44, 46-48-4677, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.04.044, 2009.
9. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lacis A. and Oinas V., *Global warming in the twenty-first century : An alternative scenario*, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 97, 9875-9880, 2000.
10. IPCC, Meeting Report of the Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics [Plattner G.K., Stocker T.F., Midgley P. and Tignor M. (eds.)] . IPCC Working Group I, Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 75 pp., 2009.
11. Lecocq F. et Hourcade J.C., *Le taux d'actualisation contre le principe de précaution ? Leçons à partir du cas des politiques climatiques*, *L'Actualité économique* 80, n°1, 41-65, mars 2004.
12. Manne A.S. and Richels R.G., *An alternative approach to establishing trade-offs among greenhouse gases*, *Nature* 410, 675-677, 2001.

13. Shindell D.T., Faluvegi G., Koch D.M., Schmidt G.A., Unger N. and Bauer S.E., *Improved attribution of climate forcing to emissions*, *Science* 326, 716-718, 2009.
14. Shine K.P., Fuglestedt J.S., Hailemariam K. and Stuber N., *Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases*, *Climatic Change* 68, 281-302, 2005.
15. Shine K.P., Berntsen T.K., Fuglestedt J.S., Skeie R.B. and Stuber N., *Comparing the climate effect of emissions of short and long lived climate agents*, *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 1903-1914, doi: 10.1098/rsta.2007.2050, 2007.
16. Stern N., *Stern review on the economics of climate change*, executive summary, HM Treasury, London : [http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview\\_index.htm](http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm), 2007.
17. Tol R.S.J., Berntsen T.K., O'Neill B.C., Fuglestedt J.S., Shine K.P., Balkanski Y. and Makra L., *A unifying framework for metrics for aggregating the climate effect of different emissions*, ESRI Working Paper 257, Economic and Social Research Institute, Dublin, Irlande, <http://www.esri.ie/UserFiles/publications/20080924144712/WP257.pdf>, 2008.
18. van Vuuren D.P., Weyant J. and de la Chesnaye F., *Multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing*, *Energy Economics* 28, 102-120. 2006.
19. Warren R., Hope C., Mastrandrea M., Tol R., Adger N. and Lorenzoni I., *Spotlighting Impacts Functions in Integrated Assessment*, Research Report Prepared for the Stern Review on the Economics of Climate Change, Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 91, September 2006. Résumé disponible sur <http://www.tyndall.ac.uk/content/spotlighting-impacts-functions-integrated-assessments-research-report-prepared-stern-review->
20. Weitzman M.L., *A review of the Stern review on the economics of climate change*, *Journal of Economic Literature* XLV, 703-724, 2007.

## *Chapitre 6*

# ÉVOLUTIONS PERCEPTIBLES EN COURS, RECOMMANDATIONS DE TYPE MÉTHODOLOGIQUE ET MESURES « SANS REGRET »

Le propos de cet ouvrage étant de faire un « état des lieux », nous n'irons pas au-delà de la description de ce qui est observable et aussi, lorsque possible, prévisible. D'autres institutions et d'autres initiatives se sont penchées, et se pencheront encore dans le futur, sur des projets de recommandations plus détaillés afin de réduire l'impact climatique lié au méthane.

Notre propos ici est double :

- ▶ d'une part, identifier les évolutions des émissions de méthane en cours, en partant des observations et mesures faites sur les sources et puits de méthane actuels (chapitres 2 et 3) et en extrapolant à partir des changements observés dans le passé (chapitre 4) ;
- ▶ d'autre part, rassembler les éléments scientifiques et techniques qui permettront d'apprécier la pertinence de futures recommandations destinées à structurer des actions au niveau national ou au niveau européen et international ; nous distinguerons parmi ces recommandations celles de type méthodologique, visant à améliorer nos connaissances du cycle du méthane, et celles touchant à des actions à court terme, dont la pertinence est démontrée et qu'on peut recommander « sans regret ».

## LES ÉVOLUTIONS EN COURS AU SEIN DES SOURCES ET PUIXS DE MÉTHANE

### Évolutions dans les sols en général

Les sols interviennent comme stock de carbone au sens large et, le plus souvent mais pas uniquement, comme puits de méthane [cf. chapitre 2]. La modification des usages du sol, notamment la déforestation, jouent un rôle important dans le comportement du sol qui peut être émetteur ou puits selon les conditions, essentiellement hydriques et de température.

Les zones désertiques participent peu au stock de carbone et aux échanges de méthane. Cependant, ces surfaces désertiques s'accroissent. Le CIRAD estime que 50 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> sont menacés de désertification. Cela conduirait à une diminution des émissions de méthane. La sécheresse en Asie est l'une des explications qui a été retenue pour expliquer la décroissance de la concentration en méthane de l'atmosphère après 2000. Cette explication laisse entendre qu'un épisode de sécheresse dans une région du monde modifierait les émissions de méthane d'un ordre de grandeur équivalent à la variation des émissions anthropiques.

En matière de forêts, de nombreuses recherches montrent que « le déboisement entraîne généralement la perte presque totale de la biomasse et une perte de carbone du sol de 40 à 50 % en l'espace de quelques décennies, dont la moitié se produit en moins de 5 ans. Dans le cas de déboisement suivi par une prairie, les études isotopiques de carbone montrent le remplacement relativement rapide de la réserve de carbone originelle de la forêt par des composés du carbone dérivés de la prairie. Avec le boisement, le carbone de la surface du sol et le carbone du sous-sol augmentent, mais lentement, selon le taux de croissance des arbres »<sup>22</sup>.

La plupart des études relatives à l'évaluation des changements de stocks de carbone dans les sols ne discutent pas les conséquences sur le cycle du méthane. La forêt a des comportements très variés selon le niveau de la nappe phréatique, plus ou moins profonde, et même selon la submersion sur plusieurs mètres de profondeur, durant les épisodes pluvieux ou durant les crues, comme c'est par exemple le cas pour les fleuves Amazone et Ienisseï. Malgré le manque de mesures,

<sup>22</sup> Repris de FAO (2002); Arrouays et Pelissier (1994); voir aussi Neil *et al.* (1998).

il est très vraisemblable qu'une forêt sèche est un puits de méthane et qu'une forêt humide est émettrice de méthane. Des mesures atmosphériques au-dessus des grandes zones forestières de la planète, ainsi que dans la canopée, et selon les épisodes secs et humides, seraient donc d'un grand intérêt pour tenter de prévoir l'évolution du comportement « méthane » des forêts.

Dans les zones de culture, le comportement « méthane » des sols dépend des pratiques culturales utilisées. L'étude de la FAO (FAO, 2002) indique qu'un labour profond peut diminuer la teneur en carbone organique de 10 % à 30 %. La tendance aujourd'hui est de diminuer les profondeurs de labour. Notons toutefois que ce choix n'est pas dicté par le souci de diminuer les émissions de méthane, mais par celui de limiter l'appauvrissement des sols en matériaux organiques et en faune tellurique. L'IRD et le CIRAD mènent de nombreuses recherches dans ces domaines, à Madagascar, au Brésil, au Laos, au Kenya, etc. Ces études comparent non seulement le labour traditionnel, plus ou moins profond, mais aussi la jachère traditionnelle et la culture par semis direct sur couverture végétale (permanente ou avec écobuage). L'érosion des sols est souvent le premier problème à résoudre. Cependant, la question du stock de carbone et la question « puits ou source de méthane » devraient être parties intégrantes de ces recherches.

De nouveau, il manque de mesures atmosphériques au-dessus des grandes zones de culture ou d'élevage, selon les épisodes secs et humides, qui seraient d'un grand intérêt pour tenter de prévoir l'évolution du comportement « méthane » de ces zones dans le futur et en fonction de l'évolution du climat (température et saturation des sols), zone par zone.

Beaucoup de recherches agronomiques se donnent pour objectif l'amélioration de la qualité, de la constance et de la résistance au stress hydrique de la production pour assurer des ressources alimentaires régulières. Certaines des modifications recommandées à la suite de ces recherches conduisent, de fait, à diminuer les émissions de méthane. La diminution des émissions de méthane n'en est donc pas l'objectif, mais il peut être le résultat de la recherche d'une meilleure protection de la ressource en sols.

Une synthèse des recherches en cours a été présentée aux rencontres de l'INRA en février 2011 (voir annexe A). Elles montrent, en particulier, que les prairies constituent des puits nets pour le CO<sub>2</sub> (comparables aux forêts) et que des pratiques d'élevage peu intensives diminuent les émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> : ainsi la quantité de carbone stockée par la prairie compenserait la quantité de méthane émise par les animaux valorisant cette prairie.

## Évolutions dans les zones humides

On a vu que les zones humides sont le plus gros émetteur de méthane de la planète, celui dont la capacité d'émission présente les plus fortes variations, en fonction principalement de l'hydrologie et de la température. C'est donc l'émetteur qui interagit le plus avec les variations climatiques. La réflexion sur les émissions des zones humides est couplée avec la réflexion sur le comportement des sols présentée au paragraphe précédent.

Le fait de drainer les sols humides, par exemple pour augmenter les surfaces cultivables, a un impact direct sur le comportement « méthane » des sols. L'assèchement de la mer d'Aral a ainsi été en grande partie provoqué par une surirrigation des plaines cotonnières d'Ouzbékistan associée à un drainage très insuffisant des sols. Il y a toute raison de penser que ces grandes étendues saturées d'eau ont été émettrices de méthane. Un drainage efficace du sol peut au contraire permettre simultanément d'améliorer la production, de diminuer la consommation d'eau et de diminuer les émissions de méthane. Inversement, certains pays cherchent à reconstituer des zones humides drainées dans le passé afin de protéger ou développer la biodiversité riche des zones humides.

### **Le cas particulier des rizières**

Ce n'est pas le riz en soi qui est émetteur de méthane, mais bien la pratique culturale par immersion temporaire (cf. chapitre 2, et figure 6.1).

À Madagascar, en Afrique, en Asie du Sud-Est, la culture du riz pluvial en milieu sec (en particulier sur les hauts-plateaux) atteint des rendements satisfaisants [Ratnadass A. *et al.* 2008]. Si la culture du riz noyé durant une période de l'année s'est autant développée ailleurs, c'est qu'elle présente certains avantages pour les paysans. Des recherches sont menées essentiellement pour stabiliser la production du riz et développer des méthodes culturales efficaces en particulier vis-à-vis des sécheresses et des maladies. L'objectif premier n'est pas de diminuer les émissions de méthane. Cependant, comme nous l'avons déjà noté, la fabrication et l'émission de méthane consomment de l'énergie qui n'est donc plus disponible pour la production agricole. Il est donc vraisemblable que l'amélioration des pratiques culturales ira dans le sens d'une réduction des émissions de méthane.



Figure 6.1 : Rizière ennoyée, Sumatra (Indonésie) photo B. Tardieu – Académie des technologies.

## Évolutions au sein des décharges

Nous avons vu au chapitre 2 que les solutions techniques existent, non seulement pour éviter d'émettre du méthane, mais aussi pour le récupérer et l'utiliser comme source d'énergie. Ceci est devenu la règle en Europe<sup>23</sup>. La tendance est la même avec retard aux USA et au Canada. En France, selon le rapport du CGEDD-CGIET de 2010, on peut estimer que 80 à 90 % du potentiel de captation du méthane issu des décharges est en principe déjà traité. Cependant les estimations nationales font encore état de 0,3 à 0,5 Tg/an émis. C'est pourquoi une étude de l'Agence française de développement (AFD, 2008) propose un programme de captation du méthane des décharges en France visant à éliminer d'ici 2015 « 400 000 t de méthane sur les 500 000 actuellement émises ». Le rapport du CGEDD-CGIET préconise de procéder en même temps à un point actualisé et quantifié des émissions résiduelles de méthane et à la mesure réelle du rendement de la captation du méthane.

<sup>23</sup> Circulaire 1999/31/CE.

Dans les pays émergents, en particulier, des crédits « carbone » peuvent être attribués dans le cadre des mécanismes de développement propre pour l'élimination de ces décharges à ciel ouvert (figure 6.2) ou leur transformation en décharges couvertes récupérant le méthane produit.



Figure 6.2 : Décharge à ciel ouvert sur les rives de l'Ikupa, Antananarivo (Madagascar)  
Photo B. Tardieu – Académie des technologies.

## Évolutions en matière de combustion incomplète de la biomasse, le charbon de bois

Contrairement à ce qui est fait avec la méthode traditionnelle, il est tout à fait possible de produire du charbon de bois en collectant et utilisant le méthane produit. L'installation prototype brésilienne montrée dans la figure 6.3 peut produire 4 000 tonnes/an. Le bois utilisé est de l'eucalyptus industriel. Le méthane collecté peut être utilisé pour produire de la vapeur et faire tourner une turbine à vapeur, ou bien être utilisé dans un moteur diesel adapté au gaz pauvre ou enfin torché afin de transformer aussi complètement que possible le méthane en  $\text{CO}_2$ . Dans l'immédiat, compte tenu du prix de l'électricité, du prix du charbon de bois et du prix du carbone, l'opération ne se justifie pas économiquement, mais la technologie est bien au point.



Figure 6.3 : Usine pilote de fabrication de charbon de bois  
(B. Tardieu - Académie des technologies).

## Évolutions en matière d'animaux d'élevage

### **La digestion des ruminants**

Des recherches ont été entreprises dans plusieurs pays du monde afin de réduire les émissions du bétail, et en particulier du cheptel bovin et ovin, portant essentiellement sur la nourriture de ce cheptel. La question posée est différente selon qu'il s'agit d'élevage hors sol ou d'animaux pâturant des prairies naturelles ou artificielles.

L'INRA a organisé une rencontre en février 2011 dans le cadre du Salon de l'agriculture (voir annexe B). Les rations riches en aliments concentrés permettent de réduire les émissions de méthane, mais cela va à l'encontre d'une valorisation maximale des ressources fourragères. L'annexe B montre la grande complexité des interactions entre limitation des émissions de méthane,

préservation de la santé animale et humaine, viabilité économique et écologique. Les recherches doivent donc être poursuivies avant toute action à grande échelle.

### **La fermentation des excréments, fumiers, lisiers**

Lorsque les animaux sont élevés en prairie, leurs excréments participent à l'entretien des sols et à leur régénération. Lorsque les animaux sont élevés hors sol, les excréments, fumiers et lisiers peuvent être récupérés. Il s'agit de matières organiques valorisables. Il n'y a pas de problèmes techniques pour valoriser ces matières comme engrais et comme source de méthane. La « méthanisation à la ferme » est une technique qui permet à la fois de capter les émissions naturelles de méthane de ces matières hautement fermentescibles et de produire une énergie renouvelable de façon décentralisée (voir Annexe C). L'équipement nécessaire est cependant important en terme d'investissement et pousse à une recherche d'optimisation économique en incorporant d'autres substrats organiques, qu'ils soient produits sur la ferme (déchets végétaux ou surtout cultures énergétiques – de maïs – comme en Allemagne) ou collectés à proximité (déchets verts, déchets des industries alimentaires...). En Allemagne, des exploitants agricoles ont abandonné les cultures vivrières pour consacrer une partie de leur terre à la production de méthane pour la vente d'électricité, plus rentable. Ceci n'est pas soutenu en France, où est encouragé l'usage de cultures intermédiaires à valorisation énergétique (CIVE) entre deux cultures principales, de façon à produire du carbone sans concurrencer l'alimentation humaine et, si possible, sans ajout d'engrais. La différence entre les deux pays provient de ce que la France favorise l'élevage et l'agriculture vivrière tandis que l'Allemagne attribue un rôle central au biogaz pour adapter la production intermittente des énergies éoliennes et solaires à la demande.

La question fondamentale est donc la rentabilité de l'entreprise. La collecte, la fermentation et la récupération du gaz doivent être organisées avec des tarifs adaptés de rachat de l'électricité produite par cogénération. Le rapport du CGEDD-CGIET (2010) préconise ainsi la « fixation d'un tarif de rachat du biogaz épuré, dans des conditions comparables à celles du rachat de l'électricité produite à partir de formes d'énergies renouvelables » afin de stimuler cette production en réduisant les nuisances actuelles d'une biomasse utilisée uniquement pour la fertilisation. Suivant ces recommandations, en novembre 2011, le tarif de rachat du biométhane

injecté a été fixé, en tenant compte de l'épuration du gaz (perte de 5 % environ) et de la consommation de gaz pour chauffer les digesteurs. Pour une unité de puissance équivalente à 500 KW électrique, le prix de rachat est de 12 centimes KW gaz soit 3 à 4 fois plus que le prix du KW gaz fossile conventionnel.

Un certain nombre d'industriels investissent dans le développement de biodigesteurs économiquement rentables. Ces biodigesteurs suivent le schéma de la figure 6.4 pour produire du méthane. Plusieurs sociétés françaises se sont données pour mission de développer cette activité, en permettant par exemple de valoriser les résidus de l'élevage et des agro-industries sous forme de bio-gaz, en minimisant la quantité de chaleur autoconsommée par le procédé et en maximisant la valorisation de chaleur auprès d'un ou plusieurs repreneur(s) de chaleur partenaire(s).

Dans les pays émergents et dans le cadre des mécanismes de développement propre, un projet de 7MW a été développé dans le sud de l'Inde et a donné lieu à 20.000 CER (*Certified Emission Reduction*). Du fait que la situation n'est pas la même dans les pays développés et dans les pays émergents, l'investigation devra être menée plus loin avant de parvenir à de possibles recommandations.

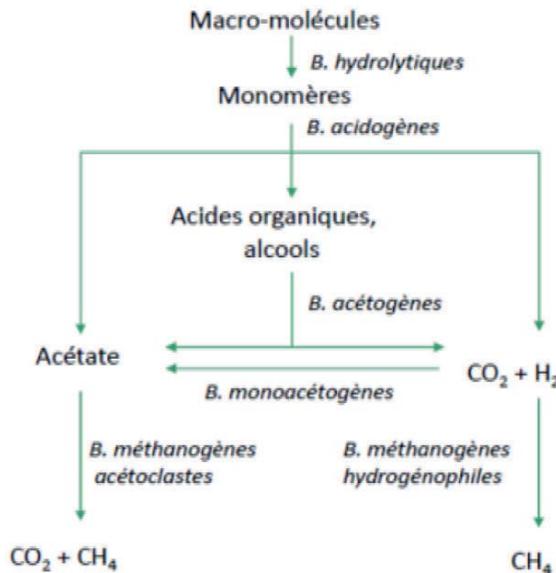


Figure 6.4 : Fonctionnement schématique d'un biodigesteur. Tiré de Steyer [2011].

## Évolutions en matière de combustibles fossiles

### Le charbon

Le charbon est exploité de façon différente selon les sites. Les contraintes concernant les émissions de méthane sont très variables selon les pays. Nous avons vu qu'il est possible et financièrement accessible de drainer le méthane et de l'exploiter ou, lorsque les émissions sont faibles et irrégulières, de le torcher de façon à le transformer totalement en CO<sub>2</sub><sup>24</sup>.

Il semble inévitable que des réglementations imposent à l'échelle planétaire des règles contraignantes pour les émissions de méthane. En co-bénéfice, le drainage et la collecte du méthane diminuent considérablement les risques d'explosion dans les mines qui sont encore fréquentes aujourd'hui dans certains pays.

### Le gaz naturel

Le gaz naturel est constitué essentiellement de méthane. Par conséquent, toutes les fuites, tous les dégazages, toutes les purges libèrent du méthane. Une bonne partie de ce gaz émis pourrait ainsi ne pas l'être. Aujourd'hui, l'incitation à ne pas perdre ce gaz est faible puisque le coût du gaz est en grande partie associé à son coût de transport. Une perte de gaz près du puits n'a pas beaucoup de valeur économique. Éviter cette fuite n'est donc pas rentable, sauf à donner une valeur au gaz émis dans l'atmosphère.

Comme pour le charbon, mais de manière probablement moins coûteuse, on devra recourir à des mesures réglementaires internationales pour inciter les producteurs à la vertu climatique. Il faudra ensuite faire appliquer ces règlements.

### Le pétrole

Le « Partenariat mondial pour la réduction des gaz torchés » (en anglais GGFR<sup>25</sup>) a lancé des projets de réduction du torchage dans huit pays et la majorité de ses

<sup>24</sup> Ceci s'applique moins bien aux mines de charbon de taille modeste qui se développent en Asie, mines qui ne semblent optimales ni en terme de sécurité, ni en terme d'application de méthodes de drainage du méthane, étant donné leur coût de mise en œuvre.

<sup>25</sup> Création à Johannesburg en 2002.

partenaires ont approuvé une norme mondiale pour la réduction des gaz torchés. Le partenariat offre son assistance à l'Algérie, au Cameroun, à la Guinée équatoriale, au Kazakhstan, au Nigeria et au Qatar afin de leur permettre d'atteindre un niveau d'émission nul ou minime d'ici certaines dates butoirs.

L'ensemble des projets actuels de ce partenariat devrait permettre d'éliminer au total près de 32 millions de tonnes/an de gaz à effet de serre. Le premier moyen de réduire le torchage du gaz naturel est de ne pas le produire, en améliorant au cas par cas les conditions de gestion ; ces conditions sont fréquemment associées à l'écoulement biphasique des hydrocarbures :

- ▶ à Farmington (Nouveau-Mexique), sur un puits à gaz présentant une quantité variable de condensats, une meilleure gestion a permis d'éviter les mises à l'air ou mises à la torche intempestives par un meilleur pilotage des surpressions ;
- ▶ sur le site de Kokdumalak, un meilleur pilotage du débit d'huile a permis de réduire la quantité de gaz associé extraite, améliorant ainsi le pourcentage de récupération et la durée de vie du puits.

C'est le volume et la composition du gaz associé qui vont orienter son emploi. Si le gaz est disponible en grandes quantités, il va justifier financièrement d'installer une usine de purification et un gazoduc, éventuellement en cumulant la production de plusieurs puits voisins. Si les quantités de gaz associé sont insuffisantes pour le vendre, on peut envisager les emplois suivants :

- ▶ réinjection dans le gisement : cette méthode est classiquement utilisée dans le cadre de la récupération assistée du pétrole ; elle permet de maintenir une pression de fond plus élevée et, donc, d'améliorer le pourcentage de récupération du pétrole, ce qui rend l'opération rentable ; cependant, si le gaz est acide (présence de  $\text{CO}_2$  ou d' $\text{H}_2\text{S}$ ), il exige des matériels et canalisations résistants à la corrosion. Du point de vue de l'exploitant, ce gaz n'est pas perdu, il est simplement stocké et reste disponible à l'exploitation quand le puits aura épuisé son liquide ;
- ▶ génération d'énergie *in situ* : le gaz non traité alimente une turbine génératrice d'électricité pour les besoins du site de production ;
- ▶ craquage du gaz naturel pour la production de méthanol : cette méthode aboutit à un produit de grande consommation facile à transporter, mais exige des unités de craquage de petite taille, encore rares.

## LES ZONES ARCTIQUES ET LEUR ÉVOLUTION À LONG TERME

Des émissions massives locales de méthane ont été observées récemment dans les eaux du plateau sibérien oriental, qui laissent penser que les estimations antérieures étaient très sous-estimées (cf. chapitre 2). Ces données ne sont pas forcément extrapolables à plus grande échelle. On a également vu au chapitre 4 qu'il est très difficile de quantifier tant la quantité de méthane qui proviendra du dégel du pergélisol que la durée ou l'ampleur de ces émissions. Il en est de même pour les hydrates de méthane marins. Cela dit, le suivi atmosphérique actuel du méthane dans la région Arctique ne montre pas d'augmentation continuellement plus importante que les autres régions du monde. Il semble donc que nous ne vivons pas pour le moment une déstabilisation du méthane arctique.

Le problème est que, de toute façon, il n'y a actuellement pas de remède pour limiter d'éventuelles émissions, le seul conseil reste donc de multiplier les observations dans les régions arctiques pour quantifier une éventuelle déstabilisation. Une action importante est aussi entreprise pour faire prendre en compte ces phénomènes dans les modèles de climat couplés océan-atmosphère-biosphère, ce qui est rendu difficile par la complexité des interactions entre climat, pergélisol, humidité des sols, couverture neigeuse et végétation. C'est encore, à l'évidence, une des limitations dans la modélisation actuelle du système Terre qu'il convient de réduire le plus rapidement possible.

## RECOMMANDATIONS DE TYPE MÉTHODOLOGIQUE

À partir des différentes évolutions en cours décrites *supra*, un certain nombre de recommandations de type méthodologique ou métrologique peuvent être formulées, visant à permettre de mieux comprendre l'évolution des émissions de méthane et, donc, de proposer ensuite des actions concrètes de réduction sur une base mieux informée du point de vue scientifique :

- ▶ **forêts** : réaliser des mesures régulières de la composition de l'atmosphère au-dessus des grandes zones forestières de la planète, selon les épisodes secs et humides, afin de comprendre et de prévoir l'évolution du comportement « méthane » des forêts ;

- ▶ **zones agricoles** : réaliser de même des mesures régulières de la composition de l'atmosphère au-dessus des grandes zones agricoles (cultures et prairies) selon les épisodes secs et humides, à modéliser zone par zone en fonction de l'évolution du climat local (température et saturation des sols) ;
- ▶ **zones humides naturelles arctiques** : intensifier les recherches sur les zones arctiques où le dégel du sol est de plus en plus prolongé, afin de comprendre et de prévoir l'évolution des émissions de méthane à venir. L'extension de ces recherches au passé récent (ère quaternaire) permettra de borner la dynamique de ces zones en conditions climatiques changeantes ;
- ▶ **culture du riz** : encourager l'étude et l'amélioration des pratiques culturales, permettant non seulement de sécuriser les récoltes, mais encore de réduire les émissions de méthane grâce à un moindre usage de l'engorgement ;
- ▶ **charbon de bois** : la technologie de récupération du méthane étant opérationnelle, mais la faisabilité économique n'étant pas assurée, il paraît raisonnable d'attendre soit des progrès de productivité, soit des changements du contexte économique (prix du carbone, notamment) ;
- ▶ **digestion des ruminants** : poursuivre les recherches pour maîtriser la grande complexité des interactions entre limitation des émissions de méthane, préservation de la santé animale, viabilité économique et écologique ;
- ▶ **émissions anthropiques** : un travail plus approfondi sur les facteurs d'émissions du méthane dans chaque secteur d'activité, à l'aide de campagnes de mesures sur le terrain, permettrait de réduire les incertitudes sur les flux de méthane anthropique ;
- ▶ **modélisation** : améliorer la prise en compte des émissions de méthane par les systèmes naturels dans les modèles mécanistes de végétation. Améliorer le calcul des émissions anthropiques par les modèles statistiques (inventaires). Ces modèles permettent de mieux comprendre les mécanismes d'émissions à l'œuvre, de se doter d'outils d'intégration des observations directes disponibles, et de se projeter dans l'avenir climatique.

## ACTIONS À METTRE EN ŒUVRE À COURT TERME « SANS REGRET »

Les actions recommandées ci-dessous sont dites « sans regret » car elles ont prouvé leur utilité et leur pertinence par l'expérience dans différents pays.

- ▶ **zones humides** : dans les zones humides utilisées en terres agricoles, présentes et à venir, soutenir les actions de drainage (sans altérer la biodiversité protégée par les accords de Ramsar) car le drainage peut permettre simultanément d'améliorer la production agricole, de diminuer la consommation d'eau et de diminuer les émissions de méthane ;
- ▶ **décharges** :
  - i) dans les pays en développement : encourager l'utilisation des crédits carbone dans le cadre des mécanismes de développement propre, pour développer la récupération du méthane, tout en mobilisant des moyens de transition « sociale » pour ne pas pénaliser les populations vivant actuellement des décharges ;
  - ii) dans les pays développés : faire le point actualisé et quantifié des émissions résiduelles de méthane et procéder à la mesure réelle du rendement de la captation du méthane ;
- ▶ **fumiers et lisiers** : poursuivre le développement des technologies de récupération du méthane en s'appuyant sur les mécanismes de développement propre et les crédits carbone, tant dans les pays développés que dans les pays émergents et en s'adaptant aux contextes économiques et écologiques différents ;
- ▶ **termites** : poursuivre la lutte anti-termite, car il ne semble pas y avoir d'inconvénient à leur limitation, alors que les dégâts qu'ils provoquent dans le bâti de tous les pays sont considérables. La lutte contre les termites n'est pas guidée par la réduction des émissions de méthane, mais par le coût socio-économique des dégradations causées ;
- ▶ **mines et centrales à charbon** : améliorer le cadre réglementaire international pour limiter les émissions de méthane, d'autant que le drainage et la collecte du méthane diminuent considérablement les risques d'explosion dans les mines, encore fréquentes aujourd'hui dans certains pays ;
- ▶ **gaz** : améliorer le cadre réglementaire international, comme pour le charbon, mais de façon probablement moins coûteuse, et en parallèle donner de

la valeur au gaz « lâché » dans l'atmosphère, afin d'inciter les pollueurs à réduire leurs émissions ;

- ▶ **pétrole** : soutenir l'action des pays et des entreprises membres du GGFR pour réduire le plus possible les gaz torchés.

## CONCLUSIONS

L'exploitation des énergies fossiles est associée à l'émission de méthane dans l'atmosphère. La quantité de méthane émis augmente rapidement avec l'augmentation de la consommation. Si la décarbonation des activités paraît inéluctable, les prochaines décennies connaîtront pourtant encore une augmentation de la consommation de combustibles fossiles qui dominera la tendance. Si cette exploitation émet inévitablement du CO<sub>2</sub>, les émissions de méthane ne sont quant à elles pas une fatalité. Elles sont en très grande partie évitables à un coût parfaitement compatible avec les données économiques de ces combustibles. Il est évident que c'est en priorité dans ces domaines qu'il faut faire porter les efforts. Certains industriels soucieux de leur responsabilité et de leur réputation le font déjà en grande partie. Établir des règles communes et les faire respecter va dans le sens de l'équité et de la solidarité planétaire.

La question des zones humides, et plus globalement des sols, est de première importance et représente un grand enjeu. Les variations des émissions au cours des siècles ont été fortes et le plus souvent associées aux variations du climat qu'elles ont pu amplifier. Il s'agit là de rétroactions difficiles à contrôler ; il convient donc d'éviter autant que faire se peut d'initier de telles rétroactions. Dans cet esprit, et bien que ce soient les zones tropicales qui émettent actuellement le plus, les zones boréales sont à suivre avec beaucoup d'attention et de prudence, car il convient là encore d'éviter d'éventuelles nouvelles émissions par des mesures d'exploitation du méthane stocké (pergélisols et clathrates marins).

D'une façon générale, le rôle du méthane comme gaz à effet de serre est très important et doit être davantage pris en compte, mais son coefficient d'équivalence avec le CO<sub>2</sub> est très dépendant de l'échéance à laquelle on se place. À cet égard, le fait de changer sans précaution ce coefficient d'équivalence pour pouvoir parler, notamment au niveau des négociations internationales, de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>,

modifierait l'équilibre des politiques comparées des différents pays ayant ratifié le protocole de Kyoto et pourrait s'avérer contre-productif. Une réflexion sur la manière dont l'équivalence CO<sub>2</sub> du méthane doit évoluer pendant les prochaines décennies pour optimiser les politiques climatiques doit néanmoins être conduite.

## RÉFÉRENCES

1. AFD (Agence française de développement), « Réduire le méthane : l'autre défi du changement climatique », Document de travail n°68, 2008.
2. Arrouays D. and Pélissier P., *Changes in carbon storage in temperate humic loamy after forest clearing and continuous corn cropping in France, Link Plan and Soil* 160, 215-223, DOI: 10.1007/BF 00010147, 1994.
3. Arrouays D., Kicin J.L., Pélissier Ph. et Vion I., *Évolution des stocks de carbone des sols après déforestation : Analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique, INRA Etude et gestions des sols* 2, 1994.
4. CGEDD-CGIET, « Le méthane, gaz à effet de serre : mesures de réduction et de valorisation des émissions anthropiques ». CGEDD n°006993-01 [ou 2009/24/CGIET/SG], 2010.
5. FAO - Agriculture mondiale : horizons 2015-2030, Y3557, 2002.
6. Neill C., Piccolo M.C., Melillo J.M., Steudler P. A. and Cerri C.C., *Nitrogen dynamics in Amazon forest and pasture soils measured by N-15 pool dilution, Soil Biol. Biochem.* 31 (4), 567– 572, 1999.
7. Ratnadass A., Randriamanantsoa R., Rajaonera T.E., Rafamatanantsoa E., Ramahandry F., Ramarofidy M., Michellon R.. 2008. *Impacts d'un système de culture à base de riz pluvial et de semis direct sur couverture végétale (SCV) sur la macrofaune du sol à Madagascar, avec référence particulière aux effets sur la production du riz Terre malgache* (26) : 39-41. Séminaire International Les sols tropicaux en semis-direct sous couvertures végétales, 2007-12-03/2007-12-08, Antananarivo, Madagascar.
8. Steyer J.P., Laboratoire de biotechnologie de l'environnement Valoriser les effluents et la biomasse. Rencontres INRA Salon international de l'agriculture 25 février 2011.



## ANNEXES

### ANNEXE A : LES PRAIRIES COMME PUIITS DE CARBONE<sup>26</sup>

Même si le rôle de l'agriculture et de l'élevage dans la lutte contre le changement climatique est désormais largement reconnu, une comptabilisation fine des émissions et des capacités de réduction par secteur est indispensable pour décliner les mesures à entreprendre. Il faut raisonner en terme de bilan, en considérant à la fois les sources de GES et leur compensation via les puits de carbone. Au début des années 2000, des études de grande ampleur ont été menées pour évaluer l'état des sols et de leurs stocks de matière organique, que ce soit à l'échelon national (Arrouays *et al.*, 2002) ou à l'échelon international (FAO). Les sols représentent le puits de carbone, naturel et à long terme (50 à 100 ans) le plus important sur les surfaces continentales. Limiter l'effet de serre peut être obtenu en augmentant le stock de carbone dans les sols mais aussi et avant tout, en protégeant les puits de carbone terrestres existants (forêts primaires ou anciennes, écosystèmes prairiaux et tourbières). La diminution des stocks est principalement causée par les changements d'affectation des terres (déforestation, mise en culture des prairies),

<sup>26</sup> Sur le stockage du carbone dans les prairies (INRA, 2011)

et secondairement par la réduction des apports de matières organiques, l'intensification du travail du sol et l'érosion des sols agricoles.

Le stockage de carbone par les prairies constitue une voie prometteuse pour contrebalancer les émissions de GES. Une synthèse réalisée dans le cadre des projets européens GreenGrass1 et CarboEurope2, à partir des résultats de vingt-huit sites en Europe, montre que la productivité primaire brute des prairies est comparable à celle des forêts et que les prairies (permanentes et temporaires) constituent des puits nets pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique, stockant 500 à 1 200 kg carbone/ha/an selon les modalités de gestion (chargement animal, mode d'utilisation, fertilisation)<sup>27</sup>. L'étude montre aussi que des pratiques d'élevage peu intensives augmentent l'efficacité de stockage de carbone tout en diminuant les émissions de GES (N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>). La quantité de carbone stockée par la prairie permet de compenser la quantité de méthane émise par les animaux valorisant cette prairie. Une récente synthèse utilisant une « analyse cycle de vie » montre que le stockage de carbone sous les prairies et les haies permet une compensation de 5 à 30 % des émissions de GES en système laitier, soit 10 à 70 % des émissions de méthane entérique (par les bovins).

Par ailleurs, le pâturage permet de stocker davantage de carbone que la fauche via un apport direct de matière organique par les déjections et moins d'exportation de carbone du fait de l'herbe résiduelle. Les cultures annuelles ne permettent pas de maintenir des stocks de carbone aussi élevés que sous cultures pérennes (prairies, forêts), principalement parce qu'elles restituent moins de carbone organique au sol. En dehors d'un changement d'usage du sol, différentes options sont possibles pour enrichir ou maintenir le stock de carbone du sol : augmenter les restitutions de résidus de culture, améliorer l'efficacité de recyclage des produits résiduels organiques (fumiers, boues, composts...), favoriser les plantes à enracinement profond ou pluriannuelles, réduire l'intensité de travail du sol, introduire des cultures « intercalaires » non récoltées (cultures intermédiaires, couverture végétale permanente).

En ce qui concerne la réduction du travail du sol par des techniques « simplifiées » incluant la suppression du labour, une majorité d'études conduites dans les

<sup>27</sup> Une partie importante du carbone ainsi stocké peut ne l'être que de façon temporaire (comme par exemple avec des fourrages ensuite récoltés).

années 1990 à 2000 concluait à un effet bénéfique sur le stockage de carbone avec un stockage moyen supplémentaire de l'ordre de 200 kg carbone/ha. Cependant ces conclusions sont en partie remises en cause par des métaanalyses récentes qui montrent que les techniques de semis direct ou de travail superficiel s'accompagnent aussi d'un déstockage de carbone en profondeur qui peut annuler l'effet de stockage en surface. Par ailleurs ces techniques peuvent également accroître les émissions de N<sub>2</sub>O du fait du compactage et de la diminution de porosité du sol. L'introduction de cultures non récoltées dans les systèmes de culture favorise toujours le stockage de carbone. C'est le cas des cultures intermédiaires (incluant les repousses de la culture principale) ou des techniques SCV<sup>28</sup> avec couverture végétale permanente. Une étude récente de Klumpp et Mary (2011) montre que la pratique répétée (sur 15 ans) de cultures intermédiaires conduit à une augmentation très significative du stock de carbone organique du sol, avec un « rendement » d'humification égal ou supérieur à celui des pailles de céréales.

## Références

1. Arrouays *et al.*, 2002, *Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles en France ?* sur <http://www.inra.fr>.
2. Arrouays D. et Jolivet C., *Effet de la déforestation sur le stockage en carbone des sols. Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ?*, 2002.
3. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F. et Stengel P., Expertise scientifique collective, ISBN 2-7380-1054-7, Paris : INRA éditions, pp 332, 2002.
4. Klump, K., et Mary, B., *Stocker du carbone dans les sols ?*, INRA, Rencontre 25 février 2011, Salon International de l'agriculture, 2011.

<sup>28</sup> Semis direct sur couverture végétale

## ANNEXE B : AGIR SUR L'ALIMENTATION DES RUMINANTS<sup>29</sup>

L'INRA a organisé en février 2011 une rencontre dans le cadre du Salon de l'agriculture. Les rations riches en aliments concentrés permettent de réduire les émissions de méthane, mais cela va à l'encontre d'une valorisation maximale des ressources fourragères. La présente annexe montre la grande complexité des interactions entre limitation des émissions de méthane, préservation de la santé animale et humaine, viabilité économique et écologique. Les recherches doivent donc être poursuivies avant toute action à grande échelle. Ci-après une longue citation des conclusions de cette rencontre.

« Les rations riches en aliments concentrés permettent de réduire les émissions de CH<sub>4</sub>, mais cela va à l'encontre d'une valorisation maximale des ressources fourragères par les ruminants, qui est une composante de la durabilité des systèmes de production de lait et de viande. En outre, la production des aliments concentrés, qui nécessite en particulier des apports d'engrais et l'acheminement de ces aliments sur la ferme, se traduit par des émissions importantes de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub> qui compensent en partie la plus faible émission de CH<sub>4</sub> d'origine digestive. Ils peuvent aussi accroître la consommation d'énergie fossile et/ou d'autres impacts environnementaux comme l'eutrophisation. Mais ces tendances doivent être confirmées. Il y a peu de variation d'émissions de CH<sub>4</sub> digestif entre des rations à base de fourrages verts pâturés, ensilés ou fanés, mais elles semblent plus fortes avec ces fourrages qu'avec l'ensilage de maïs. La réduction de la fertilisation azotée des fourrages permet de limiter les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O. Les différences d'émissions de CH<sub>4</sub> liées à l'apport de concentrés glucidiques (céréales, sous-produits comme la pulpe de betteraves) sont modérées, mais l'utilisation d'aliments riches en matières grasses s'est révélée efficace pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub>. La graine de lin en particulier a un effet significatif d'autant plus intéressant qu'elle tend à accroître la teneur en oméga 3 de la viande. Mais d'autres aliments doivent être recherchés, car le lin seul ne peut suffire à grande échelle. La graine de tournesol serait à étudier. On sait que l'huile de coprah est particulièrement efficace pour réduire le CH<sub>4</sub>, mais

<sup>29</sup> Tiré de « Nouvelles pistes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre en agriculture : changer l'alimentation des ruminants ? » (Doreau, 2011)

elle accroît la teneur en acides gras à chaîne moyenne dans le lait et la viande, ce qui n'est pas recommandé pour la santé humaine.

Une voie prometteuse est l'utilisation d'additifs alimentaires ou de biotechnologies permettant de modifier l'écosystème microbien de la panse, et donc les fermentations. Celles-ci doivent être acceptables par la société, ce qui conduit à privilégier les additifs naturels (extraits de plantes et huiles essentielles, plantes riches en tanins ou en saponines). Certains d'entre eux sont efficaces *in vitro*, tel l'extrait d'ail, mais leur efficacité *in vivo* sur le long terme n'est pas prouvée. L'introduction de microorganismes spécifiques (bactéries, levures) dans la panse est une piste pour l'avenir, des essais préliminaires ont été probants, mais là encore les recherches sont en cours. L'effet de l'alimentation sur l'émission de CH<sub>4</sub> dans les effluents est beaucoup plus limité que celui du type d'effluent (bouses et crottes sur la pâture, fumiers, lisiers) et du type de fumier ou de lisier. En revanche, la limitation de l'apport azoté dans la ration permet de réduire l'azote présent dans l'urine, et donc l'émission de N<sub>2</sub>O. Cette limitation doit toutefois être raisonnée de manière à éviter une baisse de la production. Ces quelques pistes de modulation de l'alimentation des ruminants ne doivent pas occulter la nécessité de réfléchir plus globalement à d'autres leviers d'action, en particulier en changeant les systèmes d'élevage et les modes de production.

Ainsi l'accroissement de productivité des animaux permet une réduction des émissions de CH<sub>4</sub> par kg de lait ou de viande, car l'augmentation des quantités d'aliments ingérées réduit la production de CH<sub>4</sub> par kg d'aliment; cette réduction est toutefois en grande partie compensée par l'augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub>. L'agriculture biologique, qui réduit différents impacts environnementaux, ne modifie que peu les émissions de GES : la moindre productivité accroît les émissions de CH<sub>4</sub> par kg de lait ou de viande, mais l'absence de recours aux engrais minéraux, en particulier, réduit les émissions des deux autres gaz.

D'une manière générale, l'utilisation maximale d'aliments produits sur l'exploitation et les circuits courts réduisent les émissions. Éviter une consommation excessive d'engrais azotés ou limiter la consommation d'énergie au niveau de la ferme sont des solutions efficaces pour réduire les émissions de GES tout en améliorant les performances économiques de l'exploitation. Deux remarques pour terminer. Tout d'abord, l'évaluation des systèmes de production de ruminant par rapport aux GES doit tenir compte non seulement des émissions, mais aussi de la captation du carbone par les sols, et à ce titre l'effet de l'herbe, en particulier des

prairies permanentes, est bénéfique par rapport aux cultures annuelles. Enfin, les émissions sont souvent rapportées au kg de lait ou de viande produit. Cette nécessaire vision "productive" doit être complétée par une vision plus "environnementale": le bilan émissions-captation doit également être évalué par hectare, et dans ce cas les systèmes moins productifs apparaissent plus favorables».

## Référence

1. Doreau M., *Nouvelles pistes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre en agriculture: changer l'alimentation des ruminants?*, INRA, 2011, Rencontres 25 février 2011 Salon International de l'Agriculture.

## ANNEXE C : MÉTHANISATION ET HYDROGÉNISATION À LA FERME

Exemple de méthanisation à la ferme en Inde

Construction d'un digesteur.



Alimentation en bouse de vache.



Photographies B. Tardieu Académie des technologies.

Le gaz arrive à la cuisine.



Photographie B. Tardieu Académie des technologies.

### Étude de l'Inra sur la production d'hydrogène par des écosystèmes microbiens (Steyer, 2011)

Au cours des rencontres INRA en février 2011, cette approche a été analysée et élargie :

« Parmi les principales voies de production de bioénergie à partir de déchets, deux approches sont tout particulièrement intéressantes et seront discutées lors de cette présentation. La première est relativement ancienne et liée à la production de méthane par digestion anaérobie. La seconde, beaucoup plus récente et innovante, repose sur la production d'hydrogène par des écosystèmes microbiens.

La digestion anaérobie est une transformation de la matière organique carbonée en biogaz sous forme de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$ . Cette transformation réalisée par des microorganismes est observée spontanément dans les marais et dans les écosystèmes anaérobies (tractus digestifs des ruminants, sols) ; elle a été maîtrisée industriellement pour réaliser la dépollution carbonée des effluents et compte parmi les plus anciennes méthodes de traitement des eaux usées. La digestion anaérobie est utilisée pour la digestion des boues de stations d'épuration, et plus

généralement pour la digestion des déchets solides organiques (par exemple les résidus agricoles issus des élevages et des cultures), pour le traitement d'effluents industriels concentrés tels que ceux des industries agro-alimentaires.

Le rêve d'utiliser l'hydrogène comme source inépuisable d'énergie a quant à lui commencé avec Jules Verne. Dans son roman « L'Île Mystérieuse » (1874), il imagina en effet l'hydrogène comme un substitut du charbon. Bien plus tard, l'hydrogène a été utilisé comme combustible, entrant à 50 % dans le mélange de gaz de ville fourni aux grandes métropoles jusque dans les années 1950. Ce gaz est d'ailleurs toujours utilisé en Chine, en Afrique du Sud et dans tous les lieux où le gaz naturel est cher. Devant son potentiel, l'hydrogène a reçu une attention particulière ces dernières années car il présente une combustion propre, produisant uniquement de l'eau, et possède un grand pouvoir calorifique [*i.e.*, 122 kJ/g]. Il est ainsi considéré comme étant le vecteur énergétique idéal car il permet le stockage et le transport d'énergie sur des courtes, moyennes et longues durées et distances. De plus, toutes les énergies renouvelables sont transformables en hydrogène, ce qui renforce d'autant son attrait.

Nous montrerons que cette production peut être obtenue par voie anaérobie à partir de divers résidus organiques issus de l'agriculture. Ceci étant, quelle que soit la sortie énergétique envisagée, elle ne peut être dissociée d'une valorisation matière et doit donc s'inscrire dans un concept de bioraffinerie environnementale. Nous illustrerons ces aspects sur différents exemples concrets où la méthanisation a un rôle central (*e.g.*, production de molécules à haute valeur ajoutée, couplage à des installations utilisant le CO<sub>2</sub> comme les micro-algues, valorisation agronomique des digestats, ...) et nous positionnerons la place de la France dans le contexte mondial ».

## Références

1. Steyer J.P., *Laboratoire de biotechnologie de l'environnement, Valoriser les effluents et la biomasse*. Rencontres INRA Salon international de l'agriculture, 25 Février 2011.



## MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

### Principaux auteurs de ce rapport

**Jean-Claude ANDRE,**

*Membre fondateur de l'Académie des technologies,  
Membre correspondant de l'Académie des sciences*

**Olivier BOUCHER,**

*Directeur de recherche au CNRS,  
Laboratoire de météorologie dynamique, Paris*

**Philippe BOUSQUET,**

*Professeur à l'Université de Versailles Saint-Quentin,  
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Gif sur Yvette*

**Marie-Lise CHANIN,**

*Membre fondateur de l'Académie des technologies,  
Membre correspondant de l'Académie des sciences*

**Jérôme CHAPPELLAZ,**

*Directeur de recherche au CNRS,  
Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, Grenoble*

**Bernard TARDIEU,**

*Membre fondateur de l'Académie des technologies,  
Président de la Commission «Energie et changement climatique»*

**Secrétaire scientifique**

Jean Denège

Rapport de l'Académie des technologies

**Le méthane : d'où vient-il et quel son impact sur le climat ?**

---

## DICTIONNAIRE

### **ALCANES**

Hydrocarbures saturés ne comportant que des atomes carbone et des atomes hydrogène.

### **ANAÉROBIE**

Se dit d'un processus exigeant l'absence totale d'oxygène.

### **ANOXIQUE**

Milieu dépourvu d'oxygène.

### **ANTHROPISATION**

Transformation d'un paysage ou d'un écosystème sous l'action de l'homme.  
anthropisé Qualificatif d'un écosystème ainsi transformé.

### **ANTHROPOGÉNIQUE**

Ayant pour origine l'activité humaine.

### **ARCHÉES**

Important groupe de microorganismes unicellulaires. Ce groupe a été séparé de celui des bactéries, leurs caractéristiques s'en distinguant nettement. Elles constituent aujourd'hui un des trois domaines du vivant (archées, bactéries, eucaryotes).

### **BIODIGESTEUR**

Dispositif permettant de produire par fermentation anaérobie du biogaz à partir de la matière organique dont on le charge.

### **BIOFUEL**

Combustible liquide ou gazeux obtenu à partir de matière organique, le plus souvent végétale par divers procédés chimiques en fonction de la matière organique source et du produit recherché (bioéthanol, biodiesel, etc.)

### **BIOGAZ**

Gaz (méthane), obtenu par fermentation anaérobie de matière organique, végétale ou animale – lisiers et bouses)

### **BIOGÉNIQUE**

Produit par le vivant.

### **BIOGÉOCHIMIQUE**

Qualifie des cycles complexes ayant des phases géologiques, biologiques et chimiques et conduisant à la production de nombreux produits naturels comme le gaz naturel, le pétrole, etc.

**BIOMÉTHANE**

Méthane produit par fermentation à partir de sources organiques.

**BIOÉNERGIE**

L'énergie provenant de l'exploitation de la biomasse.

**BOURGOUTIÈRE**

Prairies naturelles pâturables inondées selon le rythme des saisons par les crues (Delta du Nil et Niger, par exemple). Le nom vient du fait que leur végétation naturelle contient en forte proportion du bourgou (*Echinochloa stagnina*).

**CARBONÉ**

Se dit des molécules organiques contenant des chaînes carbonées.

**CARBOXYLIQUE**

Qualifie des molécules contenant un groupement carboxyle ( $-\text{C}(\text{O})\text{OH}$ ).

**CLATHRATE**

Composé chimique constitué d'un complexe d'inclusion formé de molécules d'eau piégeant en son sein un gaz, pour ce qui concerne ce document, du méthane.

**COLOBE**

Mot vernaculaire désignant plusieurs espèces de singes d'Afrique au pouce atrophié par rapport aux autres doigts de la main.

### **DEUTÉRIÉ**

Qualifie un composé hydrogéné dans lequel un hydrogène est remplacé par un deutérium (eau lourde par exemple). Cette substitution, faite volontairement, peut servir de marqueur pour étudier la diffusion d'une molécule dans la nature.

### **DIGESTEUR**

Essentiellement cuve de fermentation de l'industrie biochimique. Les digesteurs sont utilisés pour exploiter la biomasse végétale ou animale (lisiers et bouses) aux fins, par exemple, de production de méthane et d'hydrogène.

### **ENNOIEMENT**

Se dit de la mise en eau saisonnière volontaire de champs comme les rizières, étape normale du cycle de culture concerné.

### **ENNOYÉ**

Se dit d'un champ, comme une rizière, lors des phases inondées du cycle de production.

### **GLUCIDIQUE**

Qui a rapport aux glucides, c'est-à-dire aux sucres.

### **GÉOMEMBRANE**

Film étanche utilisé à grande échelle dans les travaux publics pour isoler le substrat des infiltrations de surface.

### **HÉMICELLULOSE**

Composantes des bois au même titre que la cellulose. Alors que le monomère de la cellulose est le glucose, les monomères de l'hémicellulose peuvent être le xylose, le lactose...

**INTERANNUEL**

Phénomène d'étendant sur plusieurs cycles annuels.

**INTERPOLAIRE**

Dans ce document « entre les deux pôles géographiques ».

**ISOTOPOLOGUE**

Désigne une espèce chimique différent d'une autre par substitution sur un atome d'un isotope par un autre (par exemple substitution d'un carbone 14 à un carbone 12).

**MÉCANISTIQUE**

Employé dans ce document au sens de « purement mécanique ». Cette utilisation est sans référence à la signification philosophique de ce mot.

**MÉTHANOGÈNE**

Qualifie des organismes producteurs de méthane, comme nombre d'archées.

**MÉTHANOGÉNÈSE**

[aussi biométhanation] Désigne les voies métaboliques se concluant par la production et la libération de méthane.

**MÉTHANOTROPHES**

Catégorie d'organismes primitifs, par nécessité aérobies, vivant de l'oxydation du méthane en formaldéhydes.

**MÉTHANOTROPHIE**

Le fait, pour un microorganisme, de consommer du méthane.

### **MOLLISOL**

Sols superficiels formés sous les pâturages, gelant en hiver et dégelant en été, très riches en matières organiques ; rencontrés aux latitudes moyennes. Les États-Unis en possèdent une superficie importante.

### **MONOGASTRIQUE**

Animal à un seul estomac (porc, volaille), par opposition aux ruminants qui disposent de quatre poches gastriques spécialisées.

### **PARAMÉTRISATION**

Le mot provient des mathématiques où on représente des courbes par leurs équations paramétriques. Dans le contexte des modélisations physiques il s'agit de représenter une réalité complexe par un nombre réduit de paramètres significatifs.

### **TALIK**

Couches de sol intermédiaires toujours décongelées mais situées entre du pergélisol permanent en-dessous et une couche active au-dessus.

### **YEDOMA**

Pergélisol riche en matières organiques datant du pléistocène.

## SIGLES UTILISÉS

<b>CER</b>	<i>Certified Emission Reduction</i>
<b>CGEDD</b>	Conseil général de l'environnement et du développement durable (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)
<b>CGIET</b>	Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies (Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie)
<b>CCNUCC</b>	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
<b>FTIR</b>	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre (GHG, Greenhouse Gas en anglais)
<b>GGFR</b>	<i>Global Gas Flaring Reduction</i> (Partenariat mondial pour la réduction des gaz torchés) (Johannesburg 2002)
<b>GIEC</b>	Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
<b>ICOS</b>	<i>Integrated Carbon Observing System</i> (en français : Système intégré d'observation du carbone)
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (GIEC en français)
<b>LSCE</b>	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
<b>MDP</b>	Mécanisme de développement propre
<b>NOAA</b>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (USA)
<b>OMM</b>	Organisation météorologique mondiale

<b>PDG</b>	Pouvoir de dommage global (GDP, <i>Global Damage Potential</i> en anglais)
<b>PRG</b>	Pouvoir de réchauffement global (GWP, <i>Global Warming Potential</i> en anglais)
<b>PTG</b>	Pouvoir de changement de température global (GTP, <i>Global Temperature change Potential</i> en anglais)
<b>UE</b>	Union européenne
<b>UNFCCC</b>	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> , Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique

## BIBLIOGRAPHIE

### PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

#### AVIS DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

1. *L'introduction de la technologie au lycée dans les filières de l'enseignement général*, décembre 2012, <http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/avis-et-recommandations/posts/avis-sur-l-introduction-de-la-technologie-au-lycee-dans-les-filieres-de-l-enseignement-general>
2. *Les bons usages du principe de précaution*, <http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/avis-et-recommandations/posts/avis-sur-les-bons-usages-du-principe-de-precaution>
3. *L'évaluation de la recherche technologique publique*, juin 2013, <http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/avis-et-recommandations/posts/l-evaluation-de-la-recherche-technologique-publique-avis-de-l-academie-des-technologies-fevrier-2013>

#### RAPPORTS DE L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

4. *L'enseignement professionnel*, octobre 2010.
5. *PME : le moment d'agir, pour un Small Business Act français*, à paraître

6. *Le transport de marchandises*, Jean-Claude Raoul, 2009, <http://www.academie-technologies.fr/blog/categories/rapports/posts/le-transport-des-marchandises-par-la-commission-mobilite-et-transport>

### COMMUNICATIONS À L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

7. *La technologie, école d'intelligence innovante*, B. Decomps, A. Hatchuel et G. Roucairol
8. *Les Usages du principe de précaution*, Yves Farge, mai 2011, Paris-éditions-le-manuscrit-2011
9. *Le soft power*, Pascal Morand, <https://www.youtube.com/watch?v=VTwU6fj98zk>

### AUTRES

10. P. Artus et L. Fontagné, *Évolution récente du commerce extérieur*, CAE, octobre 2006, <http://www.cae-eco.fr/Evolution-recente-du-commerce-exterieur-francais.html>
11. Rapport de la commission « libérer la croissance » présidée par Jacques Attali, janvier 2008, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/084000041/index.shtml>
12. J.-L. Beffa, *La France doit choisir*, Seuil, Paris, 2012
13. Rapport Berger-Lefebvre sur l'épargne financière, avril 2013, <http://proxy-pubminefi.diffusion.finances.gouv.fr/pub/document/18/14663.pdf>
14. Suzanne Berger, *Making in America : From Innovation to Market*, MIT Press, août 2013
15. Jean-Luc Beylat et Pierre Tambourin, *L'innovation, un atout majeur pour la France*, avril 2013. [http://www.redressement-productif.gouv.fr/files/rapport\\_beylat-tambourin.pdf](http://www.redressement-productif.gouv.fr/files/rapport_beylat-tambourin.pdf)
16. Thibaut Bidet-Mayer et Louisa Toubal, *À quoi servent les filières ?* Presses des mines, 2013
17. Mathieu Bordigoni, *L'impact du coût de l'énergie sur la compétitivité de l'industrie manufacturière*, working paper du CERNA, <http://www.cerna.ensmp.fr/>

18. O. Costa et A.S. Behm, *Les députés connaissent-ils l'entreprise ?* En temps réel, décembre 2013, <http://entempsreel.com/les-deputes-connaissent-ils-lentreprise-2/>
19. Olivier Coste, [http://www.la-fabrique.fr/app/webroot/uploads/tiny/Laissez\\_moi\\_embaucher.pdf](http://www.la-fabrique.fr/app/webroot/uploads/tiny/Laissez_moi_embaucher.pdf)
20. Michel Dahan, *Une guerre économique d'une violence inédite*, Annales de l'École de Paris du management, 2014
21. DGCIS: « le 4 pages de la DGCIS » (direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services), Juillet 2012. <http://www.dgcis.gouv.fr/etudes-et-statistiques/bien-queleve-dans-chaque-secteur-leffort-r-d-des-entreprises-francaises-petit>
22. Michel Didier et Gilles Koléda, *Compétitivité France Allemagne*, Le grand écart Economica, Paris, 2011
23. Louis Gallois, *Pacte pour la compétitivité de l'industrie française*, novembre 2012, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/124000591/0000.pdf>
24. P.-N. Giraud et T. Weil, *L'industrie française décroche-t-elle ?* La documentation française, 2013
25. IPEMED, *Pour une stratégie euro-méditerranéenne de colocalisation*, document de travail, décembre 2012, [http://www.ipemed.coop/adminlpemed/media/fich\\_article/1355244510\\_Ipemed\\_NOTE\\_colocalisation\\_30112012\\_DocTravail.pdf](http://www.ipemed.coop/adminlpemed/media/fich_article/1355244510_Ipemed_NOTE_colocalisation_30112012_DocTravail.pdf)
26. W. Chan Kim, Renée Mauborgne, *Stratégie océan bleu*, Pearson, Paris, 2010 [original: Harvard Business School Press, Cambridge, 2005]
27. S. Fernandez-Walch et F. Romon, *Management de l'innovation*, Vuibert, Paris, septembre 2013
28. D. Fixari, J.C. Moisdon et F. Pallez, *L'évaluation des chercheurs en questions 1992-2009*, Presses des Mines, 2009
29. Daniel Kaplan, *Faire vraiment coopérer chercheurs et industriels*, Annales de l'École de Paris du management, 1998
30. Dorothée Kohler et Jean-Daniel Weisz, *Pour un nouveau regard sur le Mittelstand*, La Documentation française, 2012
31. K.L. Kraemer, G. Linden et J. Dedrick, *Capturing value in global networks: Apple's iPad and iPhone*, U. of California at Irvine, 2011, [http://pcic.merage.uci.edu/papers/2011/Value\\_iPad\\_iPhone.pdf](http://pcic.merage.uci.edu/papers/2011/Value_iPad_iPhone.pdf)

32. Eric Labaye *et al.*, *French employment 2020: five priorities for action*, McKinsey Global Institute, mars 2012
33. P. Le Masson, B. Weil et A. Hatchuel, *Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entreprises*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2006
34. McKinsey Global Institute, *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business and the global economy*, 2013
35. Benoît Mulkay et Jacques Mairesse, *Évaluation de l'impact du crédit d'impôt recherche*, janvier 2012, [http://media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/Rapports/94/8/evaluation-impact-cir-mulkay-mairesse\\_203948.pdf](http://media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/Rapports/94/8/evaluation-impact-cir-mulkay-mairesse_203948.pdf)
36. Veneta Nikolova Ramirez, *La notion d'opportunité technologique : analyse théorique et empirique*, Doctorat, Université Paris-Dauphine, 2009
37. T. Peters et R. Waterman, *Le prix de l'excellence*, Dunod, 2004
38. Jim Porras, *Built to last*, Harper Collins Books, 2002
39. Walter W. Powell, *Neither Market nor Hierarchy: Network Forms of Organization*. Research on Organizational Behavior, 1990
40. Claudia Senik, *The French Unhappiness Puzzle: the cultural dimension of happiness*, CEPREMAP Working Papers (Docweb) 1113, CEPREMAP, <http://www.cepremap.fr/depot/docweb/docweb1113.pdf>
41. Louisa Toubal, *Le co-développement avec l'Afrique en huit questions*, La Fabrique de l'industrie, novembre 2013
42. T. Weil, Des histoires de la Silicon Valley, *Entreprises et Histoire*, n°58, p.129-149, 2010
43. T. Weil, *Le management de l'innovation en réseau, une technologie au service des entreprises et des territoires*, 2012, téléchargeable sur <http://www.cerna.ensmp.fr/index.php/fr/>
44. Gérard Worms, *Recommandations pour favoriser le développement des entreprises innovantes*, Futuris, 2005, <http://spire.sciences-po.fr/hdl:/2441/7o52iohb7k6srk09mitbo4d9n/resources/cae-note006.pdf>

## PUBLICATIONS DE L'ACADÉMIE

Les travaux de l'Académie des technologies sont l'objet de publications réparties en quatre collections<sup>1</sup> :

- ▶ Les rapports de l'Académie : ce sont des textes rédigés par un groupe de l'Académie dans le cadre du programme décidé par l'Académie et suivi par le Comité des travaux. Ces textes sont soumis au Comité de la qualité, votés par l'Assemblée, puis rendus publics. On trouve dans la même collection les avis de l'Académie, également votés en Assemblée, et dont le conseil académique a décidé de la publication sous forme d'ouvrage papier. Cette collection est sous couverture bleue.

<sup>1</sup> - Les ouvrages de l'Académie des technologies publiés entre 2008 et 2012 peuvent être commandés aux Éditions Le Manuscrit (<http://www.manuscrit.com>). La plupart existent tant sous forme matérielle que sous forme électronique.  
- Les titres publiés à partir de janvier 2013 sont disponibles en librairie et sous forme de ebook payant sur le site de EDP sciences (<http://www.edition-sciences.com>). À échéance de six mois ils sont téléchargeables directement et gratuitement sur le site de l'Académie.  
- Les publications plus anciennes n'ont pas fait l'objet d'une diffusion commerciale, elles sont consultables et téléchargeables sur le site public de l'Académie [www.academie-technologies.fr](http://www.academie-technologies.fr), dans la rubrique « Publications ». De plus, l'Académie dispose encore pour certaines d'entre elles d'exemplaires imprimés.

- ▶ Les communications à l'Académie sont rédigées par un ou plusieurs Académiciens. Elles sont soumises au Comité de la qualité et débattues en Assemblée. Non soumises à son vote elles n'engagent pas l'Académie. Elles sont rendues publiques comme telles, sur décision du Conseil académique. Cette collection est publiée sous couverture rouge.
- ▶ Les « Dix questions à ... et dix questions sur ... » : un auteur spécialiste d'un sujet est sélectionné par le Comité des travaux et propose dix à quinze pages au maximum, sous forme de réponses à dix questions qu'il a élaborées lui-même ou après discussion avec un journaliste de ses connaissances ou des collègues (Dix questions à ...). Ce type de document peut aussi être rédigé sur un thème défini par l'Académie par un académicien ou un groupe d'académiciens (Dix questions sur ...). Dans les deux cas ces textes sont écrits de manière à être accessibles à un public non-spécialisé. Cette collection est publiée sous une couverture verte.
- ▶ Les grandes aventures technologiques françaises : témoignages d'un membre de l'Académie ayant contribué à l'histoire industrielle. Cette collection est publiée sous couverture jaune.
- ▶ Par ailleurs, concernant les Avis, l'Académie des technologies est amenée, comme cela est spécifié dans ses missions, à remettre des Avis suite à la saisine d'une collectivité publique ou par auto saisine en réaction à l'actualité. Lorsqu'un avis ne fait pas l'objet d'une publication matérielle, il est, après accord de l'organisme demandeur, mis en ligne sur le site public de l'Académie.
- ▶ Enfin, l'Académie participe aussi à des co-études avec ses partenaires, notamment les Académies des sciences, de médecine, d'agriculture, de pharmacie...

Tous les documents émis par l'Académie des technologies depuis sa création sont répertoriés sur le site [www.academie-technologies.fr](http://www.academie-technologies.fr). La plupart sont peuvent être consultés sur ce site et ils sont pour beaucoup téléchargeables.

Dans la liste ci-dessous, les documents édités sous forme d'ouvrage imprimé commercialisé sont signalés par une astérisque. Les publications les plus récentes sont signalées sur le site des éditions. Toutes les publications existent aussi sous forme électronique au format pdf et pour les plus récentes au format ebook.

**AVIS DE L'ACADÉMIE**

1. Brevetabilité des inventions mises en œuvre par ordinateurs : avis au Premier ministre – juin 2001
2. Note complémentaire au premier avis transmis au Premier ministre – juin 2003
3. Quelles méthodologies doit-on mettre en œuvre pour définir les grandes orientations de la recherche française et comment, à partir de cette approche, donner plus de lisibilité à la politique engagée ? – décembre 2003
4. Les indicateurs pertinents permettant le suivi des flux de jeunes scientifiques et ingénieurs français vers d'autres pays, notamment les États-Unis – décembre 2003
5. Recenser les paramètres susceptibles de constituer une grille d'analyse commune à toutes les questions concernant l'énergie – décembre 2003
6. Commentaires sur le Livre Blanc sur les énergies – janvier 2004
7. Premières remarques à propos de la réflexion et de la concertation sur l'avenir de la recherche lancée par le ministère de la Recherche – mars 2004
8. Le système français de recherche et d'innovation (SFRI). Vue d'ensemble du système français de recherche et d'innovation – juin 2004
  - Annexe 1 – La gouvernance du système de recherche
  - Annexe 2 – Causes structurelles du déficit d'innovation technologique. Constat, analyse et proposition.
9. L'enseignement des technologies de l'école primaire aux lycées – septembre 2004
10. L'évaluation de la recherche – mars 2007
11. L'enseignement supérieur – juillet 2007
12. La structuration du CNRS – novembre 2008
13. La réforme du recrutement et de la formation des enseignants des lycées professionnels – Recommandation de l'Académie des technologies – avril 2009
14. La stratégie nationale de recherche et l'innovation (SNRI) – octobre 2009
15. Les crédits carbone – novembre 2009
16. Réduire l'exposition aux ondes des antennes-relais n'est pas justifié scientifiquement : mise au point de l'Académie nationale de médecine, de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies – décembre 2009
17. Les biotechnologies demain – juillet 2010
18. Les bons usages du Principe de précaution – octobre 2010
19. La validation de l'Acquis de l'expérience (VAE) – janvier 2012

20. Mise en œuvre de la directive des quotas pour la période 2013–2020 – mars 2011
21. Le devenir des IUT – mai 2011
22. Le financement des start-up de biotechnologies pharmaceutiques – septembre 2011
23. Recherche et innovation : Quelles politiques pour les régions ? – juillet 2012
24. La biologie de synthèse et les biotechnologies industrielles (blanches) – octobre 2012
25. Les produits chimiques dans notre environnement quotidien – octobre 2012
26. L'introduction de la technologie au lycée dans les filières d'enseignement général – décembre 2012
27. Évaluation de la recherche technologique publique – février 2013
28. L'usage de la langue anglaise dans l'enseignement supérieur – mai 2013
29. Le rôle de la technologie et de la pratique dans l'enseignement informatique – mai 2014

#### **RAPPORTS DE L'ACADÉMIE**

1. Analyse des cycles de vie – octobre 2002
2. Le gaz naturel – octobre 2002
3. Les nanotechnologies : enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche – décembre 2002
4. Les progrès technologiques au sein des industries alimentaires – Impact sur la qualité des aliments / La filière lait – mai 2003
5. \*Métrologie du futur – mai 2004
6. \*Interaction Homme-Machine – octobre 2004
7. \*Enquête sur les frontières de la simulation numérique – juin 2005
8. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – la filière laitière, rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – 2006
9. \*Le patient, les technologies et la médecine ambulatoire – avril 2008
10. \*Le transport de marchandises – janvier 2009 (version anglaise au numéro 15)
11. \*Efficacité énergétique dans l'habitat et les bâtiments – avril 2009 (version anglaise au numéro 17)
12. \*L'enseignement professionnel – décembre 2010
13. \*Vecteurs d'énergie – décembre 2011 (version anglaise au numéro 16)

14. \*Le véhicule du futur – septembre 2012 (publication juin 2013)
15. \*Freight systems (version anglaise du rapport 10 le transport de marchandises) – novembre 2012
16. \*Energy vectors – novembre 2012 (version anglaise du numéro 13)
17. \*Energy Efficiency in Buildings and Housing – novembre 2012 (version anglaise du numéro 11)
18. \*Les grands systèmes socio-techniques / Large Socio-Technical Systems – ouvrage bilingue, juillet 2013
19. \* Première contribution de l'Académie des technologies au débat national sur l'énergie / First contribution of the national academy of technologies of France to the national debate on the Future of energies supply – ouvrage bilingue, juillet 2013
20. Renaissance de l'industrie : construire des écosystèmes compétitifs, fondés sur la confiance, et favorisant l'innovation – juillet 2014

#### **COMMUNICATIONS DE L'ACADÉMIE**

1. \*Prospective sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement – avril 2004, MàJ décembre 2004
2. Rapports sectoriels dans le cadre de la Commission énergie et environnement et changement climatique :
3. Les émissions humaines – août 2003
  - Économies d'énergie dans l'habitat – août 2003
  - Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre – août 2003
  - Le cycle du carbone – août 2003
  - Charbon, quel avenir ? – décembre 2003
  - Gaz naturel – décembre 2003
  - Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> – mars 2005
  - Les filières nucléaires aujourd'hui et demain – mars 2005
  - Énergie hydraulique et énergie éolienne – novembre 2005
  - La séquestration du CO<sub>2</sub> – décembre 2005
  - Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut ? – mars 2007
4. Pour une politique audacieuse de recherche, développement et d'innovation de la France – juillet 2004
5. \*Les TIC : un enjeu économique et sociétal pour la France – juillet 2005
6. \*Perspectives de l'énergie solaire en France – juillet 2008

7. \*Des relations entre entreprise et recherche extérieure – octobre 2008
8. \*Prospective sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle, synthèse de la Commission énergie et environnement, version française et anglaise, réactualisation – octobre 2008
9. \*L'énergie hydro-électrique et l'énergie éolienne – janvier 2009
10. \*Les Biocarburants – février 2010
11. \*PME, technologies et développement – mars 2010.
12. \*Biotechnologies et environnement – avril 2010
13. \*Des bons usages du Principe de précaution – février 2011
14. L'exploration des réserves françaises d'hydrocarbures de roche mère (gaz et huile de schiste) – mai 2011
15. \*Les ruptures technologiques et l'innovation – février 2012
16. \*Risques liés aux nanoparticules manufacturées – février 2012
17. \*Alimentation, innovation et consommateurs – juin 2012
18. Vers une technologie de la conscience – juin 2012
19. Profiter des ruptures technologiques pour gagner en compétitivité et en capacité d'innovation – juin 2012 (à paraître)
20. Les produits chimiques au quotidien – septembre 2012
21. Dynamiser l'innovation par la recherche et la technologie – novembre 2012
22. La technologie, école d'intelligence innovante. Pour une introduction au lycée dans les filières de l'enseignement général – octobre 2012 (à paraître)
23. Recueil d'analyses spécifiques – septembre 2014 (à paraître)
24. Réflexions sur la robotique militaire (à paraître)

#### **DIX QUESTIONS POSÉES À...**

1. \*Les déchets nucléaires – 10 questions posées à Robert Guillaumont – décembre 2004
2. \*L'avenir du charbon – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – janvier 2005
3. \*L'hydrogène – 10 questions posées à Jean Dhers – janvier 2005
4. \*Relations entre la technologie, la croissance et l'emploi – 10 questions à Jacques Lesourne – mars 2007
5. \*Stockage de l'énergie électrique – 10 questions posées à Jean Dhers – décembre 2007
6. \*L'éolien, une énergie du XXI<sup>e</sup> siècle – 10 questions posées à Gilbert Ruelle – octobre 2008

7. \*La robotique – 10 questions posées à Philippe Coiffet, version franco-anglaise – septembre 2009
8. \*L'intelligence artificielle – 10 questions posées à Gérard Sabah – septembre 2009
9. \*La validation des acquis de l'expérience – 10 questions posées à Bernard Decomps – juillet 2012
10. Les OGM - 10 questions posées à Bernard Le Buanec - avril 2014

### **GRANDES AVENTURES TECHNOLOGIQUES**

1. \*Le Rilsan – par Pierre Castillon – octobre 2006
2. \*Un siècle d'énergie nucléaire – par Michel Hug – novembre 2009

### **HORS COLLECTION**

1. Libérer Prométhée – mai 2011

### **CO-ÉTUDES**

1. Progrès technologiques au sein des industries alimentaires – La filière laitière. Rapport en commun avec l'Académie d'agriculture de France – mai 2004
2. Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation des grains et des graines sur la qualité des aliments. Rapport commun avec l'Académie d'agriculture de France – février 2006
3. \*Longévité de l'information numérique – Jean-Charles Hourcade, Franck Laloë et Erich Spitz. Rapport commun avec l'Académie des sciences – mars 2010, EDP Sciences
4. \*Créativité et Innovation dans les territoires – Michel Godet, Jean-Michel Charpin, Yves Farge et François Guinot. Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies – août 2010 à la Documentation française
5. \*Libérer l'innovation dans les territoires. Synthèse du Rapport commun du Conseil d'analyse économique, de la Datar et de l'Académie des technologies. Créativité et Innovation dans les territoires Édition de poche – septembre 2010 – réédition novembre 2010 à la Documentation française
6. \*La Métallurgie, science et ingénierie – André Pineau et Yves Quééré. Rapport

commun avec l'Académie des sciences (RST) – décembre 2010, EDP Sciences.

7. Les cahiers de la ville décarbonée en liaison avec le pôle de compétitivité Advancity
8. Le brevet, outil de l'innovation et de la valorisation – Son devenir dans une économie mondialisée – Actes du colloque organisé conjointement avec l'Académie des sciences le 5 juillet 2012 éditions Tec & doc – Lavoisier