



Colloque international – 10 et 11 Oct. 2017 – Toulouse

# Le climat a besoin d'Espace

## LE PROBLEME COMPLEXE DU METHANE ATMOSPHERIQUE

**Philippe Bousquet**

*LSCE*

On s'intéresse au méthane pour différentes raisons (planche 2). C'est le deuxième gaz à effet de serre anthropique responsable, par ses concentrations, d'à peu près 20 % du réchauffement climatique. Sa part anthropique a beaucoup augmenté ; modeste au début de la révolution industrielle, elle est passée à plus de 60 % aujourd'hui. En parallèle, la concentration de méthane dans l'atmosphère a été multipliée par 2.5. Le CH<sub>4</sub> est également une bonne cible pour l'atténuation du changement climatique, car on peut agir sur ses sources d'émission, y compris en générant de l'activité économique. De plus il a une durée de vie de 9 ans, ce qui correspond à peu près à deux mandats électifs ; l'avoir comme objectif de changement peut donc être intéressant pour un politicien. C'est un composé qu'on mesure dans l'atmosphère, il a un rôle en chimie atmosphérique aussi.

On a donc observé une augmentation très rapide. On dispose à son égard d'une grande richesse de mesures. Il y a, bien entendu, à l'instar du CO<sub>2</sub>, beaucoup de difficultés mais peut-être un peu moins. On trouve ainsi les mesures du réseau sol, évidemment, celles de Sciamachy (planche 3) (satellite assez extraordinaire dans la communauté, il a un peu révolutionné notre vision de la répartition spatiale du méthane de 2003 à 2012). Ensuite est arrivé Gosat, et depuis quelques années ces colonnes, ces carottes d'air de méthane, et Aircores, grand pourvoyeur d'informations. Ces réseaux présentent des capacités différentes : le réseau sol a des biais très faibles et des précisions excellentes, mais on ne peut pas mesurer partout pour diverses raisons. Sciamachy, le premier satellite, nous a donné une bonne vision spatio-temporelle, mais il avait des problèmes de biais notamment et peu de choses sur les hautes latitudes. Avec Gosat on a un peu amélioré les biais même si des problèmes demeurent. Il nous a beaucoup appris, mais encore une fois peu sur les hautes latitudes. Aircores fournit également des mesures très précises, on les récupère et on les analyse au sol, c'est ponctuel et un peu moins cher que ce dont on parle autour de ça.

On a essayé, au niveau du LSCE, de piloter un gros effort international de synthèse des bilans de méthane, c'est ce que je vais vous présenter puis je finirai sur les satellites et vous montrerai les challenges relatifs à ces questions de méthane.

Dans l'ensemble présenté sur la planche 4, sont rassemblées toutes les composantes permettant d'analyser le cycle global du méthane. Il y a tout ce qui est observations atmosphériques, les inventaires d'émission, les comptages en approche montante des émissions dans les différents secteurs d'activité, les modèles de biochimie, pour les zones humides par exemple ou le fonctionnement des termites... Une spécificité du méthane, qu'on ne retrouve pas pour le CO<sub>2</sub>, ce sont les puits, notamment le puits atmosphérique qui enlève à peu près 90 % du méthane présent dans l'atmosphère. Quand on agrège le tout, on fait des synthèses bottom-up des bilans de méthane, mais on peut également faire des synthèses top-down en utilisant des méthodes inverses où l'on combine de façon optimale, au sens bayésien du terme, à la fois les inventaires, les modèles, les puits dans un modèle de chimie transport atmosphérique pour essayer, à partir des concentrations, de remonter aux émissions qui les ont causées.

Je vais passer en revue quelques challenges que l'on rencontre sur ces questions. Le premier est de boucler le bilan de méthane. La planche 6 montre les différentes sources d'émission du méthane, il y a trois grands blocs principaux : ce qui est lié à l'extraction des combustibles fossiles et aux fuites de gaz naturel qu'elle peut entraîner par exemple (à peu près 105 téragrammes (Tg) (millions de tonnes)), un flux lié à l'agriculture et aux déchets, activité microbienne de décomposition de la matière organique en milieu sans oxygène qui produit du méthane de source anthropique, et une source naturelle très importante, les zones humides, elles aussi à l'origine d'un processus microbien mais en milieux plus naturels. Ensuite on observe un gros puits atmosphérique, OH, le radical qui va enlever une grande partie du méthane de l'atmosphère. On observe également un petit flux lié à la combustion de biomasse ; quand la combustion se fait dans un milieu pauvre en oxygène, un peu de méthane sort (environ 60 millions de tonnes). Le total des émissions fait à peu près 560 millions de tonnes par an. Les petits caractères en dessous mentionnent les incertitudes en millions de tonnes (minimum moins maximum de toutes les études qui existent, ça ne représente pas un sigma, c'est très important bien sûr, même si on calculait un sigma on aurait des choses très importantes). Contrairement au CO<sub>2</sub>, on a sur ces flux en vision top-down de grosses incertitudes, y compris dans la partie anthropique, et donc matière à amélioration peut-être plus facilement que sur un inventaire de CO<sub>2</sub> avec 5 % d'erreur à l'échelle planétaire.

La vision bottom-up est un peu différente (planche 7) : le chiffre d'émissions totales est beaucoup plus important (730 Tg), car il n'est pas contraint par l'atmosphère, alors que le modèle top-down l'est puisque la somme des sources et des puits est à peu près contrainte si on croit aux évolutions de OH qu'on trouve. Dans le modèle bottom-up ce n'est pas le cas, chacun fait un peu ses estimations dans son coin. Une grande différence visible entre les graphes 6 et 7 est la flèche des autres émissions naturelles, y figurent les Fresh water systems (lacs, rivières, barrages), les sources géologiques, les dégazages naturels de la planète qui se font depuis notamment le dernier maximum glaciaire, les sources océaniques, le permafrost etc. Le total des estimations de ces autres émissions naturelles dans le modèle bottom-up est de 199 millions de tonnes (contre 64 dans le précédent). Si on regarde dans le détail, on constate que la principale contribution vient des lacs et rivières, arrivent ensuite les sources géologiques. Les estimations des émissions provenant des rivières sont très complexes à réaliser. La planche 8 présente une des classifications possibles adoptées ; le problème c'est qu'il n'y en a pas une unique, chaque communauté a la sienne pratiquement, les gens qui travaillent sur les lacs n'utilisent pas la même classification que ceux qui étudient les wetlands, les barrages ou les rivières ; donc au final un risque de double comptage demeure. De plus, il y a peu de données pour contraindre les facteurs d'émissions ; qu'est-ce qui à l'échelle d'un lac va émettre ? Et puis selon la taille du lac ça varie beaucoup. Il faut travailler sur l'harmonisation des classifications.

Des complexités supplémentaires sont également à prendre en compte concernant la détection des zones humides depuis l'espace : toutes les zones humides ne sont pas des wetlands. Un wetland est un écosystème avec des plantes adaptées, ce n'est pas forcément de l'eau recouvrant une surface temporairement. Ensuite tous les wetlands ne sont pas inondés, il peut y avoir un niveau hydrologique juste en dessous du niveau détecté depuis l'espace. Il y a également la question des lacs thermo-karstiques, ces lacs qui se forment quand le permafrost dégèle ; ce sont de gros émetteurs potentiels de méthane, on le pense aujourd'hui, il faut donc les surveiller, sachant que plus le lac devient petit plus a priori on a de chances d'avoir de fortes émissions de méthane, selon une loi qui a tendance à être log-logistique, donc ça va assez vite derrière.

La planche 9 montre un exemple d'erreur possible concernant l'extension des zones humides, ici en Sibérie occidentale, en comparant différentes estimations de la fraction inondée des cellules des modèles. L'inventaire Giems réalisé par Catherine Prigent à l'Observatoire est beaucoup utilisé en modélisation des wetlands méthane, mais il y en a d'autres, vous voyez que c'est assez différent. Cette carte a quelques années, on progresse, mais on a encore beaucoup de travail sur l'extension des wetlands, sur la densité de flux, c'est-à-dire comment à l'échelle de chaque pixel on va émettre. Différents processus existent, des modèles, on ne les représente pas tous très bien ; il y a là un véritable enjeu.

A propos des sources géologiques on était un peu tranquille, on évaluait leurs émissions entre 30 et 56 millions de tonnes par an selon les différentes estimations, faites à partir de l'extrapolation de quelques dizaines de données réparties dans les volcans de boue, dans les zones de fuites, micro-fuites etc. Or un papier est sorti récemment (planche 10) ; grâce au 14C (c'est une mesure onéreuse, difficile à faire en quantité) les auteurs de l'étude ont analysé un événement abrupt paléo et sont arrivés à un chiffre autour de 15 millions de tonnes par an maximum de dégazage naturel de la Terre. Il y a beaucoup d'incertitudes, on est en train de changer, on sort même de l'échelle qu'on avait trouvée avant.

Le deuxième challenge est la réduction des incertitudes des bilans de méthane à l'échelle régionale. Sur la carte de la planche 12, on a les bilans top-down et bottom-up de différentes régions du globe pour diverses catégories : wetlands, fuels fossiles, agriculture, etc. A l'échelle régionale les barres d'erreur sont très grandes. Ce n'est pas étonnant, si à l'échelle globale elles sont déjà importantes, à l'échelle régionale du point de vue de l'atmosphère ça ne va pas s'arranger. Il y a un vrai enjeu à mieux contraindre l'échelle régionale, notamment en termes de processus. En Chine on voit que les inversions trouvaient moins d'émissions que ce que les inventaires donnaient, même s'il y a des grosses barres d'erreur. Effectivement on a vu apparaître cette année une nouvelle version de l'inventaire largement utilisé dans la communauté des inverseurs atmosphérique, l'inventaire Edgar. Sur la planche 13, on voit la contribution de la Chine dans l'ancien inventaire et celle dans le nouveau, on observe à la fois une diminution du total et surtout une diminution de la pente d'augmentation au cours des années 2000. Ça a été un vrai dialogue – un peu forcé, parce que nos collègues inventaristes ont voulu sortir de nos papiers disant qu'en Chine il y a trop d'émissions ; ils ont revisité et retravaillé leurs facteurs d'émissions. On voit bien sur le différentiel la baisse forte des émissions liées à la Chine ; baisse trouvée et confirmée par des inventaires régionaux faits par des collègues chinois. En même temps les inventaristes ont ré-augmenté ce qui est lié aux décharges. Cet aller et retour entre inventaire, inversion et utilisation des données sol ou spatiales (les deux étant présentes dans ces estimations) est important.

Le troisième challenge est de comprendre les évolutions récentes. Vous avez sur la planche 15 l'évolution de la concentration moyenne de méthane dans l'atmosphère. Ce n'est pas un long fleuve tranquille, on observe une stagnation dans les années 2000 puis une augmentation qui s'est accélérée à partir de 2014-2015. Le diagramme du bas (en latitude/temps) montre que sur la période 2007-2012 le signal était en grande partie tropical, et que depuis 2014-2015 il y a une anomalie globale au niveau des concentrations (attention ce ne sont pas des émissions mais des concentrations, à cause du transport c'est un peu plus compliqué de remonter aux émissions). Ce document montre bien le genre de signaux qu'on peut avoir, partant d'un signal très bas, avec un minimum en 2004-2005, qu'on voit

dans une zone bleue qui marque des taux de croissance relativement faibles. Sur la planche 16, on essaie d'analyser le signal entre cette période de stagnation (en 2004) et 2010, (on n'a pas encore été jusqu'à 2014). On fait la différence entre les deux et on regarde à quoi l'anomalie est due. D'abord on observe que régionalement les graphiques en barres sont variables, avec au niveau global une anomalie de 20 millions de tonnes par an, on trouve donc que les émissions augmentent entre les deux périodes d'environ 20 millions de tonnes par an. On constate que les visions top-down et bottom-up se rejoignent, c'est très incertain mais la moyenne est assez correcte. En revanche au niveau régional elles divergent. Les approches montantes vont trouver les plus gros contributeurs plutôt dans les moyennes latitudes, les approches descendantes davantage dans les tropiques liés à l'Amérique du Sud et un peu à l'Asie. Avec la revisite des inventaires ça va diminuer un peu, mais pour l'instant il n'y a pas vraiment d'accord à l'échelle régionale.

Si on s'intéresse aux processus qui expliquent cette augmentation, c'est encore plus difficile, car vu de l'atmosphère comment les séparer ? On ne le fait pour l'heure pas très bien et ça se voit sur le graphe de la planche 17, puisque de nouveau les visions top-down et bottom-up, pour chaque processus (les zones humides, les autres sources naturelles, l'agriculture et les déchets, la biomasse, la combustion de biomasse, fuel fossile), ne sont pas d'accord ; on a donc du mal à sortir quelque chose de définitif concernant l'anomalie. Ce qu'on peut dire c'est qu'à cause de signaux en  $^{13}C$  on a plutôt une source microbienne, donc la somme des wetlands et de l'agriculture et des déchets peut représenter une bonne partie de cette anomalie globale de 20 Tg. On peut également remarquer que la contribution fuel fossile est très incertaine entre les deux approches ; elle est toujours possible même d'un point de vue isotopique si on croit en cette petite diminution d'émission de méthane par la combustion de biomasse (observée par les deux approches). Mais à quel niveau sont réellement les fuels fossiles c'est un peu compliqué à dire aujourd'hui. Le meilleur scénario reste une source d'anomalie un peu microbienne, avec possiblement du fuel fossile dans la mesure où la production de biomasse a un peu baissé dans le système. Mais on est encore loin d'avoir des réponses définitives.

Autre chantier : le travail sur les puits. Un papier récent sur ce sujet (planche 19) montre l'augmentation du radical OH dans l'atmosphère dans un modèle de chimie atmosphérique sur les processus chimiques. OH c'est compliqué. Il y a beaucoup de sources et de puits, donc c'est assez tamponné comme on dit en chimie. On observe une stagnation de OH à partir de la fin des années 2000 qui pourrait être liée à la variation des oxydes d'azote en Asie, (c'est une hypothèse de source liée au OH). Ça pourrait expliquer en partie, si le puits s'atténue un peu, pourquoi le méthane augmente un peu plus vite dans l'atmosphère. Une autre étude (planche 20) publiée récemment sur ces variations de OH, représente entre 2000 et 2010 une augmentation puis une diminution. Ce genre de variation pourrait limiter l'anomalie de source nécessaire pour expliquer ce qui se passe dans l'atmosphère, puisque le fait que le puits augmente dans les années 2000 peut expliquer pourquoi le méthane stagne un peu ; à l'inverse quand le OH diminue le puits diminue, ce qui peut expliquer pourquoi la concentration de méthane augmente plus vite dans l'atmosphère. Il y a là encore du travail à faire sur cette question.

Le cinquième challenge concerne le modèle de transport, à savoir l'outil qui nous permet de passer des émissions aux concentrations. Ces modèles de transport, puisqu'on en utilise plusieurs, ont pas mal de problèmes. La planche 22 présente deux illustrations. La différence entre les hémisphères Nord et Sud en méthane (les observations viennent du réseau de surface). Les modèles ne sont pas trop en désaccord sur la pente, dans le temps les choses sont assez cohérentes, par contre la valeur absolue

de la différence n'est pas très bien contrainte aujourd'hui. Aircores fournit quelque chose d'assez extraordinaire, des profils verticaux jusqu'à 30 km d'altitude (en noir sur la planche). Voyons ce que font nos modèles. Ce n'est pas trop mal, la pente est assez juste, par contre dans la stratosphère les modèles ne sont pas très bons, c'est lié à un problème récurrent dans les modèles climatiques de transport entre la troposphère et la stratosphère, un problème de chimie probablement et peut-être de résolution. Le modèle en jaune paraît super mais c'est un modèle où on a assimilé des données, donc ça colle, c'est normal. Les autres ont du mal, même des modèles très bien résolus. Ça fournit des contraintes très intéressantes.

Pour aller plus loin nous avons besoin de contraintes additionnelles, mais n'oublions pas, ce qui nous tue ce sont les biais. (Planche 24) Les contraintes additionnelles, le 13C, l'éthane, peuvent apporter des informations supplémentaires pour contraindre les émissions. Toute mesure sur la verticale, les avions, Aircores (planche 25) (c'est nouveau, très intéressant, ça nous a beaucoup excités l'année dernière), fournit aussi des multi-contraintes puisqu'on peut avoir du CO, des isotopes..., quantité de choses qui vont nous aider à contraindre le système.

J'en arrive aux satellites (planche 26). Ils devraient pouvoir nous aider à clôturer le budget global de méthane. Il y a beaucoup d'incertitudes donc du travail pour les réduire, mais c'est moins difficile que pour le CO<sub>2</sub> puisqu'on ne part pas de valeurs d'incertitude déjà faibles. Concernant les budgets régionaux, ce sera plus difficile, il faudra coupler avec autre chose puisqu'on a du mal à séparer les processus, mais c'est déjà le cas avec le réseau sol, donc ça ne sera pas trop différent. Si on s'engage vers de fortes réductions des émissions, on s'attend à ce que les effets se voient assez rapidement concernant le méthane, on devrait donc être en mesure de suivre les tendances grâce à d'éventuelles missions récurrentes. Ensuite, après application d'une méthode inverse, atmosphérique, flux, on devrait aller jusqu'aux émissions, donc améliorer les incertitudes les concernant ; ce qu'on fait déjà couramment, on l'a fait avec Schiama, Gosat, on le fera avec les missions futures. Les satellites nous permettront également de réduire les incertitudes sur les tendances, et peut-être d'aller jusqu'aux émissions de sites ou de villes, mais là je mets un point d'interrogation car c'est un point à débattre.

Plusieurs missions sont en vol ou prévues : Gosat, Tropomi sera bientôt lancé, IASI, Gosat2, ISASI-NG (en 2021-2022), Merlin, des satellites géostationnaires et Sentinel 5 plus tard. Si on veut tirer profit des données satellitaires, on a besoin de synergie avec les autres réseaux d'observation (planche 27), il ne faut pas les opposer, bien que ça arrange les financeurs de mettre l'accent seulement sur le satellite ou le réseau sol. Si on veut que ce soit efficace, même en termes de dépense publique, on a besoin de ces synergies. Les réseaux de surface et basse atmosphère sont nécessaires pour la calibration absolue et le long terme, eux seuls sont en mesure de nous offrir quarante ans de données calibrées, robustes, constituant une base solide pour calibrer tout le reste. On a ensuite besoin de télédétection depuis le sol, il y a le réseau TCCON et les Aircores (pour la validation satellite et l'amélioration des modèles de transport). Les mesures avions aident quant à elles à la validation satellite spécifique dans certaines zones atmosphériques et à l'amélioration des modèles de transport.

Merlin (planche 28) est une belle mission franco-allemande prévue en 2022. C'est un démonstrateur de mesure du méthane par une technique LIDAR, ce sera la première fois qu'on mesurera le méthane par une technique active Lidar dans l'espace. Notre ambition concernant l'erreur random est de 27 ppb, un standard par rapport à ce qui se fait aujourd'hui. Mais la grande ambition de la mission, au-delà de l'importante innovation technologique, est d'avoir des biais faibles, car c'est ce qui nous a tués lors des précédentes missions et qui continue à nous tuer dans le CO<sub>2</sub> ; notre objectif est un biais

inférieur à 3.7 ppb. On a fait un premier bilan d'erreur complet dans lequel en préliminaire on respecte ces limitations, car encore une fois c'est l'erreur systématique qui nous limite. Nous avons formulé certaines hypothèses concernant la distribution d'erreurs systématiques ; l'instrument n'étant pas encore construit, on ne sait pas encore l'évaluer proprement. Tout cela sera affiné plus tard, mais nous avons des combinaisons d'erreur systématique si on la distribue sur l'albédo et la pression de surface par exemple, variables assez classiques pour distribuer l'erreur systématique, et qui sont très pénalisantes pour les performances d'un instrument. Nous avons fait le même exercice pour Gosat ; les performances que l'on obtient avec l'étude préliminaire dont je viens de parler sont pour la plupart des régions meilleures que celles de Gosat. La planche 29 présente une carte de ce qui a été fait pour Merlin, afin d'illustrer les réductions d'incertitudes auxquelles on peut s'attendre en pourcentage sur les émissions. On part avec certaines incertitudes, on passe les données à la moulinette et on arrive à la fin à une incertitude normalement réduite pour la plupart des régions continentales (le rouge sur la carte indique une réduction d'erreur positive, ça veut dire que la mission permet d'apprendre des choses sur ces régions). Ceci est un des trente scénarios que nous avons élaborés, il ne faut pas tirer de conclusions statistiques dessus, c'est seulement une illustration. Avec la distribution d'erreur qu'on a faite sur l'albédo par exemple, on s'aperçoit que pour les zones désertiques la réduction d'erreur est négative, ce qui signifie qu'on dégrade l'information puisque l'erreur systématique contrebalance l'apport des données, on n'apprend donc pas grand-chose. Mais concernant le méthane, sur les zones désertiques ce n'est pas dramatique, et puis c'est l'hypothèse que l'on a aujourd'hui sur cette distribution d'erreur, laquelle est encore largement inconnue. Il faut cependant s'habituer à avoir ce genre de carte ; des cartes où tout serait positif, avec 90 % de réduction d'erreur sur une mission spatiale sur les gaz à effet de serre, c'est impossible. Il nous faut intégrer l'erreur systématique pour voir les erreurs auxquelles on s'attend, car c'est celle qui nous fera du mal à la fin. Quand on fait ce travail préliminaire, qu'on affinera ensuite, on apprend énormément de choses sur les flux. On sait que dans certaines régions on risque d'avoir des problèmes, on a donc tout intérêt à les travailler en amont pour essayer de réduire ces erreurs systématiques et améliorer nos processus avant la mission.

Je voudrais délivrer deux messages pour finir. Si on veut rester dans les deux degrés d'augmentation de la température, il faudra attaquer tous les gaz à effet de serre, et non pas se contenter du seul CO<sub>2</sub>. Le méthane est une cible qui me semble moins compliquée que le CO<sub>2</sub> ; beaucoup d'actions sont menées en ce moment pour réduire les émissions, simplement on le voit pas encore, il va falloir un jour que ça se concrétise. Et pour réduire les incertitudes concernant les émissions de méthane depuis l'espace, il nous faut des missions à bas biais, c'est ce qu'on a appris des missions passives qu'on a réalisées jusqu'à présent. Enfin, et j'insiste, il faut des synergies entre les systèmes d'observation pour la validation et le long terme, puisque les missions satellites sont des séries, peut-être avec des instruments différents. Nous avons besoin d'une référence absolue, de validation dans l'épaisseur de l'atmosphère, ça marche en synergie, l'un sans l'autre on perd beaucoup, en revanche on gagne à les avoir tous ensemble.