



Colloque international – 10 et 11 Oct. 2017 – Toulouse

# Le climat a besoin d'Espace

## EXIGENCES RELATIVES A LA SURVEILLANCE DU CO2 DEPUIS L'ESPACE : EST-IL REALISTE DE VISER LE CONTROLE D'EMISSIONS ANTHROPOGENIQUES ?

**François-Marie Bréon**

*Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, LSCE-CEA*

Je vais centrer mon intervention sur cette question : Pourrons-nous apporter des choses utiles pour le suivi des émissions de carbone depuis l'espace ?

La planche 2 a déjà été présentée par Cyril Crevoisier. La partie haute de la figure montre les émissions de carbone dans l'atmosphère, elles sont annuellement de l'ordre de 40 milliards de tonnes. 90 % de ces émissions de CO<sub>2</sub> sont dues aux fuels fossiles, 10 % à la déforestation. Au début du XXe siècle, entre 1900 et 1920, moins de 5 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> étaient émises chaque année, avec une contribution à peu près égale entre les fuels fossiles et la déforestation. Environ un quart des émissions actuelles part dans l'océan et un autre quart dans la végétation ; seulement la moitié reste dans l'atmosphère. La partie absorbée par la végétation est estimée à partir de notre connaissance des 3 autres termes (émission, atmosphère et océan). On note une variabilité interannuelle très importante ; certaines années la végétation et l'océan absorbent pratiquement toutes les émissions humaines, quand d'autres la végétation reste quasi neutre, elle n'absorbe pas de carbone. On comprend seulement en partie les processus qui régissent ces variabilités interannuelles ; nous n'avons pas à l'heure actuelle de modèle nous permettant de les expliquer précisément. C'est une des raisons pour lesquelles nous ne sommes pas capables de prévoir avec exactitude l'amplitude et la vitesse du changement climatique au cours du XXIe siècle. Les principales incertitudes concernent la vapeur d'eau et les nuages ; l'autre incertitude importante est la manière dont les flux et les stocks de carbone vont réagir au changement climatique.

La planche 3 est une synthèse issue du dernier rapport du GIEC et montre les flux cumulés de carbone absorbés ces 150 dernières années par les océans et la végétation. L'océan a été un puits de carbone tout le temps, l'incertitude le concernant est limitée. En revanche, du côté de la végétation, deux termes se compensent partiellement : d'une part la déforestation (source d'émissions de carbone vers l'atmosphère), d'autre part le puits de carbone, car l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est bénéfique à la croissance de la végétation ce qui conduit à une absorption nette. Une très grande incertitude demeure quant à la somme de ces deux effets contraires. Les meilleures estimations concluent à un effet net de source de carbone lorsque la déforestation l'emportait, durant la première moitié du XXe siècle, et à un effet de puits de carbone pendant la seconde moitié du XXe siècle. La meilleure estimation pour le bilan net des émissions et absorptions passées est proche du neutre en 2000, mais avec une énorme incertitude.

L'IPCC a fait plusieurs scénarios d'évolution des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et donc de changement climatique d'ici à l'horizon 2100 (animation de la planche 3). Le RCP2.6 est le scénario optimiste dans lequel on parvient à stabiliser les concentrations et donc à limiter le changement climatique à 2°C. Au contraire, le RCP8.5 (en bas à droite) prévoit qu'on continue à

brûler tout le carbone présent dans le sous-sol et donc que les concentrations vont augmenter fortement, induisant un changement climatique jusqu'à 5°C. Ces différents scénarios prédisent comment les puits de carbone dans les océans et dans la végétation vont évoluer. Il y a peu d'incertitude concernant l'absorption par l'océan, qui demeurera un puits de carbone important, alors que pour la végétation les incertitudes sont très fortes.

Les missions spatiales lancées aujourd'hui pour observer le dioxyde de carbone se justifient parfaitement pour mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent les flux de carbone entre l'atmosphère et l'océan, mais surtout entre l'atmosphère et la végétation ; cela nous permettra de mieux anticiper la vitesse du changement climatique et de réduire l'incertitude entre climat et cycle. Ces missions sont aussi souvent justifiées par le fait qu'on a besoin de mesurer précisément les émissions de carbone. Le planisphère sur la planche 4 présente une estimation à grande échelle, un inventaire Edgar des émissions de dioxyde de carbone. Ces dernières sont très hétérogènes, on reconnaît les centres urbains (les hot-spots des émissions humaines), les routes maritimes (elles aussi sources de carbone). Attention tout de même, cette échelle est en échelle logarithmique. On voudrait de meilleurs inventaires de ce type, ou encore des inventaires des émissions de carbone à fine échelle, comme sur la figure en bas à droite (planche 4) qui représente un inventaire pour Paris généré par Airparif. Dans une intervention précédente, il a même été question de la nécessité de descendre à l'échelle du quartier.

On a un besoin d'améliorer la connaissance donnée par ces inventaires. Il y a déjà pas mal de missions de mesures du carbone (planche 5). Dès le début des années 2000, l'instrument Sciamachy, à bord du satellite Envisat, avec une technique d'absorption différentielle, a permis des premières estimations du méthane et du dioxyde de carbone, même si c'était des mesures très préliminaires qui n'avaient pas le niveau de précision de celles d'aujourd'hui. La mission **IASI** vole encore et fournit des mesures du dioxyde de carbone et d'autres gaz, mais avec une technique différente de celle de Sciamachy. Elle donne accès à seulement la partie haute de la troposphère qui est peu utile lorsqu'on cherche à mesurer les flux à la surface. Ensuite il y a la série des OCO. Le premier satellite a malheureusement été perdu au lancement. Puis les missions Gosat, par la **Jaxa**, OCO-2 pour la **NASA** (toujours en vol) ; la mission chinoise Tansat, en vol mais dont on n'a pas encore accès aux mesures... Tous ces instruments, à part IASI, utilisent la méthode de l'absorption différentielle : on mesure le spectre solaire (le rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère), lequel est réfléchi à la surface et remonte en direction du satellite. Sur le trajet, ce rayonnement est absorbé par un certain nombre de gaz, on va donc zoomer sur des régions spectrales où c'est essentiellement le dioxyde de carbone qui l'absorbe. Une très haute résolution spectrale permet de voir les raies individuelles du dioxyde de carbone, et leur profondeur nous informe sur la quantité de carbone présent dans l'atmosphère. Il est nécessaire de normaliser cette quantité de carbone par la masse d'air, laquelle est reliée à la pression de surface ainsi qu'à la présence d'aérosols dans l'atmosphère. C'est pourquoi on a également besoin de faire une mesure dans une bande de l'oxygène, (comme montré sur la petite figure du haut, planche 5).

Concernant le futur, Merlin est une mission active disposant elle aussi d'une technique différente, un **Lidar** qui permettra de mesurer le méthane. MicroCarb, mission du CNES, mesurera le CO<sub>2</sub> à partir d'un microsatellite. On parle par ailleurs beaucoup de la mission que j'appelle Sentinel-7 et qui vise à mesurer les flux anthropiques de dioxyde de carbone et de méthane.

L'objectif affiché de ces missions est de mesurer les flux anthropiques, mais le niveau de précision requis n'est pas clair (planche 6). La capacité des missions spatiales à répondre aux besoins va-t-elle dépendre de la précision fixée concernant ce besoin ? Les engagements de diminution des émissions

de gaz à effet de serre pris par les Etats sont de l'ordre de quelques pour cent à une dizaine de pour cent ; donc si l'objectif est de vérifier si les Etats les respectent on a besoin d'une précision elle aussi de l'ordre de quelques pour cent. Une mesure à 10 % près ne permettra pas de vérifier si un Etat respecte ou non ses objectifs de diminution. De plus, les échelles spatiales doivent être ici à l'échelle nationale et l'échelle temporelle être l'année. Si l'objectif de la mission est de vérifier le respect des traités internationaux, c'est ce dont on a besoin. Or mes collègues pensent qu'il est très difficile de réaliser ce genre de chose, en particulier parce que depuis l'espace on ne mesure pas les émissions anthropiques mais un mélange entre les émissions anthropiques et celles de la végétation. Dans bien des endroits, l'effet de la végétation est beaucoup plus important que les sources anthropiques, on aura donc du mal à distinguer les deux. Par conséquent, plusieurs missions ne vont pas regarder les échelles nationales mais des sources ponctuelles très intenses. Cet objectif paraît plus facile puisque d'une part le signal à mesuré est relativement important et, d'autre part, le signal naturel est faible en comparaison. Pour cet objectif, l'échelle est locale.

Se pose alors la question : Mesurer les émissions de sources ponctuelles uniquement nous donne-t-il une information réellement utile pour les échelles nationales et la vérification du respect des objectifs et engagements, puisqu'une part significative des émissions nationales ne sont pas sur des sources ponctuelles ?

Etudier la distribution et les émissions de ces points sources est toutefois intéressant. Les premières publications réalisées pour regarder si depuis l'espace on pouvait les mesurer se sont concentrées sur des points sources très importants, telles des centrales thermiques en Allemagne et en Pologne qui brûlent des quantités phénoménales de charbon chaque année, et produisent donc de très fortes émissions. Il y a en réalité des milliers de centrales thermiques dans le monde, qui produisent de l'électricité ou sont des industries importantes de sidérurgie par exemple ; la base de données Carma les recense. Je me suis intéressé à leur distribution. Le graphe de la planche 7 présente le nombre de sources ponctuelles (axe des abscisses) et les émissions de chacune en rouge (axe des ordonnées). Les plus fortes vont émettre jusqu'à 35 millions de tonnes de dioxyde de carbone chaque année, mais elles sont très peu nombreuses de ce calibre. La courbe bleue représente les émissions totales pour une émission inférieure à 5 millions de tonnes, c'est la somme cumulée de la courbe rouge. J'ai mis un trait à 15 mégatonnes de CO<sub>2</sub> par an ; en extrapolant un peu la courbe on peut mesurer une émission totale de l'ordre 1.5 milliards de tonnes de carbone par an pour l'ensemble des sources ponctuelles de ce gabarit (>15Mt), ce qui représente à peu près 15 % des émissions totales provenant des sources ponctuelles, sachant que ces sources totalisent environ 30 % des émissions mondiales. Il faut bien réaliser que même si on était capable - ce qui me paraît un objectif raisonnable - d'observer et mesurer toutes ces sources ponctuelles importantes, qui sur l'exemple donné émettent chacune plus de 15 mégatonnes de CO<sub>2</sub> par an, cela ne représenterait qu'une toute petite fraction des émissions mondiales, donc ne nous renseignerait pas sur l'ensemble des émissions.

Réaliser une mesure très précise, sans biais, du carbone depuis l'espace ne constitue qu'une partie du chemin ; je rejoins Bernard Pinty qui a parlé d'un tiers. Faire la mesure de la colonne totale de CO<sub>2</sub> est peut-être la partie la plus facile du travail. Le satellite mesure une concentration, or nous avons besoin d'un flux, soit une source soit un puits. J'ai parlé des émissions anthropiques, mais on peut s'intéresser aussi à la mesure des puits de carbone par la végétation. La planche 8 schématise très grossièrement (les choses sont plus complexes) le principe des flux. La différence entre la source et le puits sur le trajet est liée à la différence des concentrations sous le vent et au vent multipliée par la vitesse du vent ( $F_{source} - F_{sink} \approx P_{surf} (C_{up} - C_{down}) V_{wind}$ ). Ça veut dire qu'en supposant que vous ayez une mesure Cup et Cdown extrêmement précise, si vous voulez remonter à la source vous avez aussi besoin d'une

connaissance très précise du transport atmosphérique. Avec une incertitude sur la vitesse du vent de 20 % par exemple, l'erreur sur le flux sera de 20 % également. Or mesurer la vitesse du vent à quelques pour cent près (puisque l'objectif est de mesurer la source avec ce degré de précision) ne me semble pas possible aujourd'hui. On voit déjà là une limitation de notre capacité à mesurer les émissions anthropiques : notre incapacité à connaître le transport atmosphérique sur l'horizontal.

La planche 10 présente des travaux faits dans mon équipe au **LSCE**, en préparation à la mission CarbonSat, qui n'a finalement pas été sélectionnée mais qui ressemble à ce qui est envisagée pour la future mission Sentinel-7. On voit le Nord de la France, au centre Paris, un vent d'est et un panache rouge qui sort de la capitale. Avec un satellite mesurant à 2 km de résolution sur une zone de 500 par 500 km, on obtiendrait un résultat ressemblant à ce qui est présenté ici (a). Une image comme celle-ci permettrait de remonter à la source à partir de l'amplitude du panache. Mais en pratique la fauchée du satellite ne fait pas 500 km, mais plutôt 200 ou 250 km, et il y a des nuages, donc on aura plutôt quelque chose qui ressemble à l'image c sur le document. La première image (a) est une mesure sans bruit. Avec un bruit de l'ordre du ppm, typique de la mission CarbonSat, le signal de Paris semble disparaître complètement (image c). On a du mal à distinguer le panache à l'œil nu, mais avec des algorithmes mathématiques standards on peut extraire le signal du bruit, à condition de connaître certaines choses, comme la direction du panache a priori, en se servant d'une information météorologique donnant la direction du vent ou d'une mesure simultanée. On peut ainsi mesurer d'autres gaz, en particulier les oxydes d'azote, lesquels sont émis à peu près au même endroit et beaucoup plus faciles à mesurer que le dioxyde de carbone, en tout cas de manière relative. Une mesure du panache du dioxyde d'azote nous donnerait la direction de celui du dioxyde de carbone, facilitant ainsi l'interprétation de l'image transmise par le satellite. Il faut bien comprendre que si non bruités les signaux paraissent faciles à interpréter, le bruit de mesure est en réalité souvent du même ordre de grandeur, voire plus important, que le signal qu'on cherche à retrouver.

Avec les outils mathématiques que nous avons développés, nous avons regardé s'il était possible, avec une mission du type CarbonSat, d'apporter une information utile sur les émissions de Paris (planche 11). La réponse dépend en partie des hypothèses formulées. Une de ces hypothèses est la connaissance ou non de la distribution spatiale des émissions de Paris, puisque pour interpréter le panache lui-même on a besoin de connaître a priori sa forme. Autre hypothèse : Connaît-on bien la distribution spatiale des concentrations en amont de la ville ? Avec des hypothèses optimistes, on arrive à réduire notre incertitude sur les émissions de la ville de Paris jusqu'à 80 % pour les faibles vitesses de vent. En revanche, lorsque le vent est très fort, le panache est beaucoup moins important, il est complètement dilué dans l'atmosphère ; on n'arrive alors plus à l'extraire du bruit de mesure. Avec des hypothèses moins optimistes, dans lesquelles on ne dispose d'aucune information sur la distribution spatiale du panache (ce qui arrive) et la concentration en amont de Paris est complètement inconnue, en prenant en compte des biais de mesure, on n'arrive plus rien à faire. La vérité est probablement entre les deux. Il faut faire attention à des résultats obtenus avec des hypothèses très optimistes sur la connaissance a priori apportée au système, car en pratique il y a souvent beaucoup plus d'incertitudes.

Un autre aspect me dérange (planche 12). Le satellite mesure la lumière du soleil réfléchi par la surface de la Terre. Il doit donc voler entre 10h et 14h heure locale et ne pourra apporter des informations que sur les émissions produits entre 8h et 14h, pas sur celles de l'après-midi ni de la nuit. Les émissions de la région parisienne présentent un fort cycle diurne ; donc mesurer les émissions du matin ne nous donne pas les émissions de l'ensemble de la journée. On peut avoir une estimation de ce cycle diurne, mais avec une incertitude : les émissions de la nuit sont-elles deux fois ou trois fois

plus faibles que celles de la journée ? On est donc obligé de baser l'estimation sur des modèles du cycle diurne. Or, il me paraît peu probable que, si l'émission totale n'est pas bien connue, il en est de même du cycle diurne. Donc même si un satellite mesure très précisément les émissions du matin, ça ne nous donne pas les émissions de la journée, ni celles par tous les temps. Car il y a là aussi un problème : le biais de ciel clair (planche 13). La mesure du satellite ne fonctionne qu'en ciel clair, on ne peut mesurer les émissions de la ville que les jours où il n'y a pas de nuages. Or il y a toutes les raisons de penser que les émissions, en particulier celles dues au chauffage, sont différentes les jours clairs et les jours nuageux ; par conséquent le satellite ne donnera pas nécessairement les émissions moyennes annuelles représentatives.

Enfin, je vous ai expliqué qu'on avait une incertitude sur le vent horizontal, qu'en tout cas la connaissance du vent était essentielle pour avoir une estimation de la source avec une bonne précision. L'information sur le mélange vertical des émissions est également très importante (planche 14). Le vent a tendance à augmenter en s'élevant. Alors quel vent faut-il prendre en compte, celui de quelle altitude ? Choisir une altitude représentative pour le vent va dépendre du mélange vertical dans l'atmosphère, lequel est très difficile à déterminer ; d'autant plus qu'une source ponctuelle importante, comme dans l'exemple parisien, s'accompagne d'une production de chaleur qui perturbe la circulation atmosphérique et donc potentiellement modifie le mélange vertical. C'est donc là aussi une source d'incertitude très importante quand on veut passer d'une mesure satellitaire même parfaite aux flux à la surface.

En conclusion (planche 16), on a besoin de mesurer les émissions anthropiques depuis l'espace, mais à mon avis les gens ne se rendent pas compte de la difficulté que ça représente. La mesure de concentration apportée par le satellite n'est qu'un élément de cette difficulté; et tout ce qui concerne l'inversion du transport atmosphérique est extrêmement difficile et source d'incertitude importante. Et puis toutes les villes à très hautes latitudes, où il n'y aura jamais assez de lumière pendant l'hiver, alors que les émissions y sont les plus importantes, ne pourront pas être mesurées avec cette technique. Et de nombreux endroits sont, pendant plusieurs mois de l'année, recouverts d'une couverture nuageuse en permanence qui ne permet pas de faire des mesures satellitaires.