



Colloque international – 10 et 11 Oct. 2017 – Toulouse

Le climat a besoin d'Espace

LES EVALUATIONS EMPIRIQUES SPATIOTEMPORELLES DES FLUX DE CO₂ A PARTIR D'OBSERVATION DE LA SURFACE ET DE L'ATMOSPHERE

Cyril Crevoisier

Laboratoire de météorologie dynamique (LMD-CNRS)

Revenons au premier gaz anthropogénique à effet de serre, le CO₂. Depuis le début de l'ère industrielle les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère ont augmenté, comme le montre la courbe rouge sur le graphique de la planche 2, qui présente les trois gaz à effet de serre anthropiques qu'il est important de suivre (CO₂, méthane et N₂O). Contrairement au méthane qui stagne ces dernières années sans qu'on comprenne bien pourquoi, la concentration du CO₂ dans l'atmosphère augmente de manière continue malgré quelques fluctuations d'une année sur l'autre. Cette augmentation de la concentration des gaz à effet de serre ajoute un effet de serre additionnel à l'effet naturel ; c'est important de rappeler que dans le climat il y a toujours un aspect naturel et un aspect forcé par les activités humaines. Si on regarde (sur la figure de droite) la répartition de l'effet de serre additionnel dû à l'augmentation des gaz à effet de serre, on voit que la contribution du CO₂ est de loin la plus forte ; c'est pourquoi le CO₂ est considéré comme le premier gaz à effet de serre anthropogénique. La contribution additionnelle à l'effet de serre de tous ces gaz ne représente qu'une petite partie (en orange sur la figure) de l'effet de serre qui est lui naturel et dû principalement à la vapeur d'eau et pour 26 % au CO₂. Ça donne tout de suite une idée du challenge, lorsqu'on parle de perturbations anthropiques on s'intéresse à des tous petits signaux par rapport aux cycles naturels que l'on va étudier. Pour comprendre l'évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, il importe de comprendre les sources et les puits qui la régissent. Pour ce faire, on utilise les inventaires d'émission, les connaissances a priori sur les sources et les puits, des modèles de transport et des observations.

Les deux principales sources d'émissions de carbone sont la combustion des fuels fossiles (planche 3), qui représente à peu près 90 % des émissions de CO₂ et de carbone dans l'atmosphère, et les changements d'utilisation des sols (10 %), principalement la déforestation, qui modifient les échanges de carbone dans les écosystèmes. A peu près la moitié du CO₂ émis va rester dans l'atmosphère, 46 % sur la période 2000-2012, le reste sera absorbé par des puits à la surface. L'océan réabsorbe à peu près 26 % du carbone anthropogénique émis ; le puits des écosystèmes continentaux 28 % (cette dernière estimation est obtenue par la différence entre ce qui a été émis d'un côté et ce qui est absorbé par l'océan ou reste dans l'atmosphère). Il est important de comprendre que ce puits sur les écosystèmes terrestre est calculé par résidu de tout ce qui a été émis moins ce qu'on connaît assez bien. On connaît la quantité de CO₂ qui reste dans l'atmosphère grâce à des mesures de la concentration de CO₂ en différents points du globe ; on dispose également de bons points de mesure concernant le CO₂ réabsorbé par l'océan, combinés à des modèles admis bien connus, ils permettent d'avoir une bonne estimation de ce puits océanique. C'est pour cette raison que l'incertitude indiquée pour le puits de l'écosystème est de loin la plus grande sur l'ensemble des réservoirs de CO₂ évoqués.

Lorsqu'on parle de changement climatique et du rôle du CO₂ dans ce changement, deux questions vont nous intéresser, qui sont complètement liées : la première est de comprendre et suivre les émissions de CO₂, notamment les émissions anthropogéniques, ces 90 % et 10 % d'émissions qui nécessitent de développer des systèmes de suivis. La deuxième, également très importante, est de comprendre les puits associés au cycle du carbone et qui finalement contrôlent la quantité de CO₂ restant dans l'atmosphère. Ce sont deux problèmes qu'il faut considérer ensemble ; la part anthropogénique et la part naturelle, les émissions et les puits sont essentiels si l'on veut comprendre le rôle du CO₂ sur les évolutions futures du climat.

La planche 4 retrace les évolutions des émissions de carbone (partie haute du graphe) et des puits (partie basse) en fonction de l'année depuis le début de l'ère industrielle (1750) jusqu'en 2010, où l'on voit une forte augmentation des émissions totales, et la réponse des différents puits (océan, atmosphère, et le puits terrestre : les écosystèmes). On remarque que ce puits sur les écosystèmes continentaux est extrêmement variable d'une année sur l'autre et fortement lié à des signatures climatiques telles que les événements El Niño, notamment par l'émission de CO₂ très forte en raison des feux. En 1997 par exemple, année où El Niño était particulièrement fort, il y a eu énormément de feux dans la région tropicale et en Indonésie, ce qui a induit beaucoup d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère et une réponse assez forte sur l'atmosphère et les puits continentaux associés. Ces puits continentaux sont également très fortement impactés par les anomalies météorologiques, lesquelles ne sont pas encore très bien connues. Pour comprendre l'évolution de ces puits, notamment sur les continents, il est primordial d'avoir une bonne connaissance de données auxiliaires comme la météorologie.

L'approche top-down, appelée également inversion atmosphérique, constitue un moyen d'améliorer notre connaissance des puits de surface. La planche 5 illustre cette approche : on part de la connaissance de flux, ça peut être des flux naturels (ici sur l'océan), des inventaires d'émissions donnant le CO₂ émis en différents endroits de la planète. Ces différents flux sont utilisés en entrée d'un modèle de transport atmosphérique qui va nous permettre de simuler les champs 3D de la concentration du CO₂ ; on compare ensuite ces simulations à toutes les observations disponibles, que ce soit des observations au sol, aéroportées ou satellitaires. En chaque point où l'on dispose d'observations, on compare la différence entre simulation et observation. On va alors optimiser les distributions de flux qu'on utilise en entrée des modèles de transport pour obtenir des flux optimisés qui se rapprochent de la vérité. C'est possible car l'atmosphère est un très bon intégrateur de toutes les émissions et des puits de CO₂ à la surface ; en suivant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère on peut remonter et extraire l'information qui nous permet d'aller jusqu'aux émissions ou aux puits de CO₂ à la surface. Cette approche est déjà utilisée à l'échelle globale, régionale et locale avec un certain succès. Pour qu'elle fonctionne, on a besoin de modèles de transport (qui parfois donnent des réponses différentes, mais qui s'améliorent petit à petit) et d'observations. Sur la planche 6 on a représenté quantité d'observations provenant de réseaux internationaux au sol : chaque point rouge représente une station de mesure de la concentration de CO₂ à la surface, les points jaunes des mesures par avion, les points bleus par bateau. C'est donc un réseau relativement important même si certaines régions ne sont pas ou peu couvertes ; il y a ainsi peu d'observations disponibles dans les tropiques et sur les océans notamment. A l'échelle régionale, le réseau européen ICOS combine des stations de mesures atmosphériques (les points rouges sur la carte de l'Europe, planche 6), de mesures des flux des écosystèmes (points verts), etc. En s'appuyant sur ces réseaux d'observation au sol on peut améliorer notre connaissance de la variation du CO₂ dans l'atmosphère et dans les écosystèmes,

et les utiliser ensuite en les couplant avec différents modèles de végétation ou de transport atmosphérique.

Depuis quelques années l'observation spatiale nous a également apporté de nombreux renseignements sur l'évolution des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Toujours sur la planche 6 (à droite), sont listées différentes missions spatiales pourvoyeuses d'informations sur les CO₂ et parfois sur le méthane : Sciamachy lancé en 2002 à bord d'EnviSAT, Tanso en 2009, OCO-2 en 2014. Ces trois missions opèrent des mesures dans le proche infrarouge, ce qu'on appelle le SWIR (short wave infrared). D'autres missions opèrent plutôt dans l'infrarouge thermique, le TIR, avec AIRS et IASI. Ces différentes missions spatiales nous ont permis d'obtenir des cartes globales, ce qui est très intéressant pour couvrir les régions qui ne le sont pas par les réseaux d'observation à la surface. La planche 7 montre un exemple obtenu à partir de l'instrument IASI dans l'infrarouge thermique, qui permet de mesurer la variation de la concentration de fond du CO₂ dans l'atmosphère mais essentiellement dans la moyenne troposphère (à 6-7 km). Sur les dix années d'opération de IASI, on voit une très forte augmentation du CO₂, que l'on retrouve assez bien avec des variations connues selon la latitude et un cycle saisonnier lié au cycle de la végétation assez marqué. C'est un résumé des signaux globaux qu'on est capable de mesurer depuis l'espace.

On peut également s'intéresser à des signaux plus régionaux. Le document en bas de la planche 7 donne un exemple assez frappant en 2010, année de sécheresse en Amazonie, à une période liée à un événement El Niño qui a vu de très nombreux départs de feux dans la zone appelée zone de l'arc de déforestation. On assiste à une combinaison entre un événement climatique (la sécheresse) et l'activité humaine (la déforestation) qui a entraîné de très nombreux départ de feux (retrouvés par l'imager MODIS) et de très fortes émissions de CO et de CO₂ assez bien observées depuis l'espace. C'est ce genre de signaux qu'on va essayer d'extraire et d'interpréter en termes de source à la surface.

Un autre signal important, toujours en 2010, a permis de remonter à une estimation assez intéressante d'un puits de carbone (planche 8). Grâce à des mesures d'indice de végétation depuis l'espace, on a mis en évidence une très forte anomalie de production primaire nette (NPP) en Australie, c'est-à-dire un très fort puits espéré à partir de mesures d'indices de végétation observés soit par des réseaux d'observation au sol soit depuis l'espace. Dans une étude menée dans le cadre du Climate Change Initiative porté par l'ESA pour les gaz à effet de serre, différentes sources de mesures ont été utilisées dans une approche top-down d'inversion atmosphérique pour tenter de simuler un puits de CO₂ particulier dans cette région en 2010. On a pris des mesures réalisées à la surface, un produit CO₂ retrouvé à partir de Sciamachy et deux produits de CO₂ retrouvés à partir de Gosat, fait tourner l'approche inversion atmosphérique et obtenu l'évolution de 2004 à 2013 du flux de carbone en Australie attendu à partir de l'inversion de ces mesures (figure de droite, planche 8). Sur le graphe, on constate que le réseau de surface (en marron) n'a pas capturé cette très forte anomalie de CO₂ observée en Australie en 2010. Pourquoi ? Simplement parce qu'il n'y a pas dans cette région de station de mesure du CO₂, on n'a donc pas pu extraire d'information des observations. On voit ici l'avantage d'avoir disposé d'observations depuis l'espace, celles de Sciamachy (en vert), qui s'est malheureusement arrêté juste au moment du creux de ce puits important, puis de Gosat qui a pris la relève. Ces observations réalisées depuis l'espace et utilisées dans une inversion atmosphérique ont permis de montrer qu'effectivement il y avait bien un puits de CO₂ à la surface en Australie, corroborant l'observation de la végétation également obtenue depuis l'espace. C'est un exemple concluant, il faut néanmoins reconnaître que dans beaucoup de cas ça ne marche pas aussi bien.

Frédéric Chevallier du LSCE a fait le même genre d'exercice (planche 9), mais en regardant spécifiquement l'année 2010 et en utilisant des observations réalisées dans des estimations de colonnes totales de CO₂ mesurées à partir de Gosat et retrouvées par deux équipes, une américaine, ACOS, et une de l'université de Leicester en Grande-Bretagne. Il a également utilisé en entrée des observations de surface. Pour chacune des régions étudiées (l'Amérique du Nord, l'Eurasie et la région boréale, les régions tempérées européennes, l'Europe en elle-même), il a observé les différents flux de carbone retrouvés à partir de différentes sources d'observation. Il s'est ensuite servi de deux modèles de transport atmosphérique, un modèle de l'université d'Edimbourg et le modèle LMDZ utilisé au LSCE. On remarque, en observant les différentes courbes montrant ces estimations de flux, que suivant le jeu de données et le modèle de transport utilisés, les résultats peuvent être assez différents. Pour l'Amérique du Nord par exemple, le résultat donné par les observations à la surface (en orange ou rouge) diffère avec des valeurs d'environ 0.2 gigatonnes de carbone par mois au-dessus de ce que nous donnent les observations spatiales. On a par ailleurs utilisé les observations satellitaires de Gosat mais elles ont été traitées par deux équipes indépendantes ; on a donc pris exactement les mêmes observations, avec le même instrument, mais utilisé des méthodes différentes de traitement pour remonter aux colonnes totales de CO₂. Cela s'est traduit par des différences au niveau de la colonne totale qui ont une incidence sur l'estimation du flux qui en découle. Cela montre que ce n'est pas uniquement l'instrument spatial en lui-même qui est important, mais également la chaîne de traitement qui derrière permet de passer des radiances aux colonnes de CO₂ retrouvées. En effet, on retrouve toutes les difficultés mentionnées jusqu'à présent : l'impact de l'a priori utilisé dans les méthodes d'inférences, la modélisation du transfert radiatif, en ciel diffusant notamment, c'est à dire en présence d'aérosols et de nuages (lesquels sont à l'origine des principales différences entre les algorithmes utilisés par des équipes différentes). Moralité : il est très important d'avoir des instruments présentant de très bonnes performances, mais au-delà toute l'algorithmique et le traitement des observations le sont tout autant. Il y a actuellement encore des questions à leur sujet. Concernant les flux en eux-mêmes, puisque c'est ce qui nous intéresse in fine, l'ensemble des résultats montrent une bonne cohérence des estimations en termes de phase, on trouve les émissions et les puits à peu près en même temps, en revanche l'amplitude diffère, or c'est précisément ce qui nous intéresse, il reste donc beaucoup de chemin à parcourir pour arriver à une estimation fiable des flux naturels.

Pourquoi est-ce que c'est si difficile, à partir de mesures de colonnes totales depuis l'espace, d'extraire un signal qui nous informe sur ce qui se passe à la surface ? Une animation (planche 10 et 11), produite à partir de réanalyses fournies par le système Cams (Copernicus atmospheric monitoring service), trace la variation de la colonne totale de CO₂ en ppm superposée à des informations sur les sources et les puits (points roses pour les émissions anthropogéniques et triangles pour les émissions par les feux). Les principales variations de CO₂ dans l'atmosphère montrées par cette figure sont essentiellement pilotées par des champs météorologiques. Il est intéressant de comparer cette animation avec celle montrée par Bernard Pinty tout à l'heure, qui représentait non pas la concentration totale comme ici en ppm, mais une différence entre ce qu'apporterait une émission anthropogénique et un puits. L'échelle que montrait Bernard variait entre - 4 et 4 ppm, ici le tracé varie entre 380 ppm et 410 ppm ; on voit tout de suite l'ordre de grandeur qu'il y a entre la concentration absolue que l'on va mesurer et le signal extrêmement petit qui nous intéresse. C'est là toute la difficulté, on parle d'un signal extrêmement faible à l'intérieur de mesures de colonnes totales qui intègrent toute la variation du CO₂ sur la colonne. Ça veut dire qu'en ce qui concerne la mesure de colonne totale notamment depuis l'espace, la précision requise est extrêmement forte. Le Greenhouse Gas Climate Change Initiative de l'ESA (ESA GHG-CCI) estime que les biais systématiques associés à ces émissions devaient être inférieurs à 1,25 pour 1000.

Pour vous convaincre un peu plus de la difficulté d'extraire ces signaux de la mesure de la colonne totale, on va revenir à la surface (planche 12). Des mesures de concentrations sont réalisées par deux stations ICOS, une station située à Paris et une autre à Trainou, à côté d'Orléans. Les concentrations de CO₂ mesurées par ces deux sites entre 2011 et 2018 sont tracées sur le graphe (en vert pour Trainou et en noir pour Paris). La station de Paris étant plus récente nous n'avons que deux années d'observation. On remarque une variation saisonnière du CO₂, le cycle de végétation, et une différence entre le site urbain, Paris, avec de fortes amplitudes de CO₂, et le site de Trainou, en pleine forêt, où il n'y a pas beaucoup d'émissions anthropogéniques. En revanche, si on regarde les colonnes totales mesurées par des spectromètres à transformée de Fourier du réseau TCCON, installés également à Paris et Trainou, on obtient deux courbes (bleue pour Trainou et noire pour Paris) plus difficiles à distinguer l'une de l'autre. Lorsqu'on s'intéresse à des colonnes totales et plus seulement à des mesures de concentration de surface, il est beaucoup plus dur de voir la différence entre Paris et Trainou, malgré la forte différence de concentration de CO₂ à la surface qu'il y a entre ces deux stations, ceci en raison de la variation du CO₂ le long de la verticale.

En avril 2016, nous avons réalisé une campagne multi-instruments sur le site de Trainou (planche 13), combinant des mesures réalisées par les stations ICOS, les sites TCCON et des vols ballons avec un échantillonneur atmosphérique (le Aircore) qui ont permis de mesurer la variation verticale de la concentration du CO₂ à Trainou. En avril 2016, on obtient une différence d'environ 75 ppm entre Paris et Trainou lorsqu'on fait uniquement des mesures à la surface. Mais si on regarde les mesures de colonnes totales (les deux petits carrés sur la figure), la différence n'est que de 6 ppm, car la variation verticale du CO₂ est extrêmement faible. Lorsqu'on s'intéresse à des colonnes totales, ce qui nous est donné par les observations spatiales, on intègre le CO₂ sur un signal dans la troposphère libre très constant ; une forte variation proche de la surface se retrouve mélangée à des informations qui viennent de toutes les altitudes. D'où la complexité d'extraire de ces mesures de colonne totale la mesure proche de la surface qui nous intéresse.

Regardons plus en détail cette variation le long de la verticale. La planche 14 présente des mesures réalisées à nouveau par l'échantillonneur atmosphérique Aircore, cette fois-ci lors d'une campagne BSO du CNES réalisées en août 2014 à Timmins au Canada. On voit une variation typique du CO₂ le long de la verticale, relativement constant le long de la troposphère libre avec en moyenne 5 ppm de variation, et une très forte décroissance du CO₂ proche de la surface (nous sommes en août, la végétation marche à plein régime et absorbe du CO₂ à la surface). On note également une décroissance assez bien connue dans la stratosphère du CO₂, qui sert à calculer ce qu'on appelle l'âge de l'air de la stratosphère à partir des mesures de concentration de CO₂. Ces mesures nous donnent une meilleure connaissance des variations du CO₂ dans la verticale, c'est très intéressant parce que ça va nous permettre de valider les simulations réalisées par les modèles atmosphériques, part essentielle de l'estimation des sources et des puits à la surface. Dans ce cas on superpose différentes simulations réalisées par des modèles de transport (chaque couleur représente un modèle de transport différent utilisé par la communauté internationale). Chacun de ces profils a été colocalisé spatio-temporellement avec la mesure faite. On constate que chaque modèle de transport donne une simulation assez différente, parfois même très différente de la mesure in situ que l'on a réalisée avec l'échantillonneur atmosphérique. Un biais systématique, on peut essayer de l'enlever, ce qui est plus gênant c'est que certains modèles vont très bien fonctionner dans une partie de la troposphère (tel le modèle orange sur la figure qui colle très bien au modèle noir), mais plus du tout ailleurs. Cela va introduire des biais qui seront mélangés dans le calcul de la colonne totale. Se pose alors la question : lorsqu'on va vouloir

interfacer les simulations par les modèles de transport et les observations de colonne totale réalisées depuis l'espace, comment traiter ces différents biais venant de la verticale ?

Le problème n'est pas simple. Enormément de questions restent à résoudre, mais d'un point de vue global, on peut dire qu'on a une assez bonne connaissance des émissions anthropiques de CO₂, lesquelles nous servent pour calculer ce résidu qui nous permet d'estimer le puits de carbone sur les écosystèmes continentaux. En réalité cette affirmation n'est plus vraie depuis quelques années. La planche 15 revient sur l'évolution des émissions anthropogéniques de CO₂ pour les six principaux contributeurs à l'échelle globale (Chine, Etats-Unis, Europe, Inde, Russie, Japon). Les estimations de la Chine ont un peu dépassé en valeur absolue les émissions des autres contributeurs mondiaux. Mais l'intérêt réside dans la partie grisée qui entoure la valeur moyenne de ces émissions et donne l'incertitude qui y est associée. Depuis quelques années l'incertitude associées aux émissions rapportées annuellement augmente, nous sommes en train de perdre la bonne connaissance qu'on avait jusqu'à présent des émissions de CO₂ rapportées par les différents pays, notamment dans le cas des pays émergents. Une étude récente a montré une réduction de 14 % des émissions annoncées en Chine, un changement de 14 % en termes d'émissions de CO₂ se traduit par un changement d'à peu près 30 % du puits des écosystèmes continentaux que l'on peut calculer par ces méthodes d'inférence. Cela montre l'importance de bien connaître les émissions à l'échelle globale.

L'échelle régionale compte également. La planche 16 présente deux cartes d'émissions de CO₂ de la méga-cité de Londres, une provient d'un inventaire d'émission produit par l'université de Stuttgart à partir de données génériques de facteurs d'émission, et l'autre des données nationales fournies par le Royaume uni. On remarque une grande différence entre ces deux inventaires d'émission. Notez bien l'échelle logarithmique qui concerne la dernière partie en rouge, là les émissions sont très différentes. Ceci pose problème pour contraindre les processus d'inversion atmosphérique qui nous permettent de remonter aux puits naturels, mais également pour le suivi des émissions que l'on veut réaliser. Quel inventaire faut-il privilégier pour le rapport qui servira au suivi de l'évolution des émissions ?

S'engage là une vraie réflexion : comment améliorer notre connaissance de l'émission du CO₂ par la surface, mais également des puits naturels du CO₂ à partir de l'observation spatiale ? Cela passe par l'amélioration des différents instruments envoyés dans l'espace. La planche 17 rappelle les caractéristiques et couvertures géographiques des missions passées, Sciamachy, Gostat, OCO-2, de même que celles de Microcarb, la mission actuellement portée par le CNES avec une contribution de l'agence spatiale anglaise (lancement prévu en 2021). Elle montre également les caractéristiques envisagées du futur imageur européen. Ce dernier devrait offrir une couverture géographique assez importante, avec des tailles de pixels inférieurs à 3 km, et une précision individuelle et des biais systématiques extrêmement faibles afin d'extraire les informations nécessaires.

Mais encore une fois n'oublions pas la partie inventaire bottom-up (planche 18), puisque c'est la combinaison des inventaires d'émissions, des observations spatiales, des observations au sol et des modèles de transport atmosphériques qui nous permet d'améliorer notre connaissance du cycle du carbone.

Pour finir, j'aimerais rappeler qu'il ne faut pas séparer le naturel de l'anthropogénique (planche 19). Certaines questions sont spécifiques à chacune de ces parties mais il est possible de traiter les deux ensemble. Cela passe par la combinaison de plusieurs types d'observations. Il est primordial de maintenir nos capacités à observer depuis le sol ou par des moyens aéroportés l'évolution des

concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Il existe également une forte demande d'observation des CO₂ depuis l'espace, avec une amélioration de la couverture spatiale, des précisions et des importants biais systématiques, et donc des instruments et de toute l'algorithmie qui permet d'exploiter ces observations. Enfin, les modèles d'inversion eux-mêmes doivent être améliorés, ainsi que les modèles de transport atmosphérique à haute résolution. Tout cela dans un contexte de plus en plus opérationnel qui peut s'inscrire dans la suite du développement du système Copernicus.