



Colloque international – 10 et 11 Oct. 2017 – Toulouse

Le climat a besoin d'Espace

MESURES SPATIALES DANS UN CADRE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE MONDIAL

Roland Sférian

Chercheur à Météo-France

Je vais dans cette présentation apporter des éléments de contexte, en me focalisant sur l'apport des mesures spatiales dans la compréhension du changement climatique et sur les questions de modélisation.

Tout d'abord, un bref historique. Le premier grand challenge a été la prévision numérique du temps, cœur de métier de Météo-France. Le premier à avoir introduit le concept est Vilhelm Bjerknes avec « Weather can be predicted », puis il y a eu les premières tentatives infructueuses de Richardson. Depuis ce moment-là et l'utilisation de la prévision numérique du temps par Von Neumann et son équipe, l'utilisation de données satellitaires via l'assimilation a permis d'accroître la capacité prédictive des modèles. C'est ce qu'on peut voir sur la planche 2 qui compare les observations de l'humidité de l'air vues par Meteosat 9 et celles simulées par le modèle du centre européen (ECMWF).

Le deuxième grand challenge est celui de la prévision climatique. Les premiers évaluateurs de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère ont été Fourier et Arrhenius, ils ont prédit ou évalué une augmentation de la température de l'ordre de 5°C pour un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique. Il a fallu attendre bien longtemps, les années 1950, pour que l'équipe de Philippe et Arakawa développe le premier modèle de circulation générale, et depuis la complexité et les rétroactions incluses dans les modèles de climat, comme le montrent les différents rapports du Giec, n'a cessé de s'accroître. La figure de la planche 3 présente le niveau de complexité attendu pour la future génération de modèles qui servira de base à l'évaluation du prochain rapport du Giec.

Le troisième grand challenge (planche 4), sans doute celui de ma génération, consiste à accompagner les parties prenantes vers la réduction des risques et l'adaptation au changement climatique. L'accord de Paris plante le décor de l'accompagnement des Etats à contrôler et à vérifier leurs engagements nationaux à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à suivre les impacts du changement climatique et à adapter les sociétés en conséquence.

La planche 5 résume ma présentation. Je ne parlerai pas des principes de vérification des gaz à effet de serre, ni de l'assimilation de données satellitaires, ni même des algorithmes qui permettent de dériver des variables à partir des satellites, ni non plus des procédures d'homogénéisation de certaines campagnes satellites entre elles. Je vais présenter un medley de résultats scientifiques en rapport avec la recherche sur le climat, et me concentrer sur l'évaluation des modèles, la compréhension de la variabilité et du changement climatiques et l'utilisation de mesures satellitaires pour contraindre les projections climatiques ; sujet brûlant aujourd'hui.

Je voudrais en premier lieu remercier la communauté satellite qui développe un certain nombre de variables utilisées aujourd'hui pour affiner et complexifier les modèles qui nous servent à étudier l'impact du changement climatique. Les nouvelles composantes qui intègrent les modèles sont

l'augmentation de la résolution et la description de la turbulence océanique. La planche 6 montre des estimations de la turbulence liée aux tourbillons océaniques capturés et estimés par le satellite Aviso, l'écoulement de la calotte Antarctique par la constellation de satellites européens ERS et les estimations du puits de carbone dans l'océan Austral dérivées de plusieurs campagnes satellites.

Une utilisation plus classique des données satellitaires résulte dans l'évaluation des modèles. La figure de la planche 7, tirée du chapitre 8 du dernier rapport du Giec, présente la comparaison d'une quarantaine de modèles ayant servi de base à l'évaluation de ce rapport en ce qui concerne plusieurs variables climatiques essentielles, telles que les flux radiatifs, les précipitations, la température et certaines variables dynamiques comme le géopotential et les vitesses de vents. Cette figure, appelée diagramme en portrait et introduite par Peter Gekler, montre l'écart entre les résultats de modèles et les données, soit in situ soit observées par satellite. On y voit tous les flux radiatifs dérivés de mesures satellitaires, c'est la mesure la plus pure qu'on peut utiliser aujourd'hui, elle nous permet de caractériser, qualifier la fiabilité de nos modèles à représenter le bilan énergétique de la Terre. La même chose existe pour les composantes du système Terre, mais on retrouve là moins de modèles dans la mesure où dans le dernier rapport du Giec seul un petit nombre de modèles étaient capables de reproduire le cycle du carbone global. C'est ce que fait le papier de Anav et al (planche 8) en évaluant les résultats de ces modèles par rapport à un certain nombre de mesures, en particulier le cycle du carbone. J'ai représenté par des flèches rouges les variables pour lesquelles les mesures satellitaires ont été d'un apport essentiel à l'évaluation de la capacité des modèles à reproduire le cycle saisonnier du carbone et son état moyen sur continent et océan. C'est le cas du LAI, de l'indice foliaire, de la GPP, qui est le flux de carbone associé à la photosynthèse pour la partie continentale, et sur l'océan de la température de surface. Grâce à ces mesures, les auteurs de cette étude ont pu qualifier l'état moyen des modèles et leur cycle saisonnier, et les classer par ordre de fiabilité.

Concernant la question de la compréhension du changement climatique et du rôle des différents forçages qui pilotent les tendances actuelles, je vous présente sur la planche 9 une étude à laquelle plusieurs chercheurs du CNRM ont contribué. Elle vise à comprendre ce qu'on observe par des mesures in situ et que les mesures satellitaires semblent suggérer, à savoir qu'on assiste à un verdissement des écosystèmes de l'hémisphère Nord (figure de gauche), avec une augmentation de l'indice foliaire vue par deux estimations satellites, le LAI3g et Geoland2. Ceci est reproduit par un bon nombre de modèles systèmes Terre ayant contribué au dernier rapport du Giec. Avec l'utilisation de données satellitaires, de résultats de modèles décomposant les différentes contributions du forçage et des procédures de statistiques avancées appelées détection attribution, il est possible d'attribuer le rôle d'un forçage en particulier au changement observé. C'est ce qui est présenté sur les distributions de droite de la planche 9, où on distingue la variabilité naturelle représentée en gris par rapport à celle associée au changement climatique et à l'augmentation des gaz à effet de serre (en rouge et vert). On peut s'apercevoir que la tendance actuelle du verdissement de l'hémisphère Nord est attribuée à part égale à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, qui stimule la photosynthèse et encourage le verdissement, et au changement climatique qui réduit la période végétative, permettant ainsi d'avoir une saison verte plus longue.

La compréhension du permafrost est un sujet brûlant pour lequel la mesure satellitaire constitue un véritable enjeu. Cette étude 2013 de Langer et al (planche 10) présente une manière d'estimer le cycle saisonnier de la couche active du permafrost en forçant un modèle complexe de dynamique d'eau du sol et de glace à partir de mesures satellitaires (ici les mesures satellites MODIS).

Un autre sujet brûlant, que je développe dans planches 11, 12 et 13, est la contrainte des projections climatiques données par les modèles de climat. A la différence des modèles météorologiques, qui disposent d'une vérification quasiment systématique de leurs prévisions, les modèles de climat prédisent des changements à un horizon de 50 à 100 ans, voire plus. Il faudrait donc attendre ce laps de temps pour vérifier la qualité de ces prévisions. L'incertitude des réponses des modèles doit être contrainte. Une des premières manières de contraindre ces projections est d'exclure les modèles d'un ensemble en qualifiant de manière réaliste ou irréaliste certaines rétroactions. L'étude de Malavelle et al publiée dans Nature en 2017 (planche 11) montre qu'il est possible d'utiliser les données satellitaires, en l'occurrence les données d'aérosols de MODIS-Aqua, pour qualifier la formation d'eau nuageuse liée à la présence d'aérosols (due ici aux éruptions islandaises effusives), et donc de caractériser à l'aide des données satellitaires et des résultats de modèles le contenu en eau. A partir de cette mesure, il est possible en comparant les estimations satellitaires et les résultats de modèles d'exclure de leur ensemble les modèles qui présentent une rétroaction irréaliste.

Une autre manière de contraindre ces projections consiste à faire appel aux statistiques bayésiennes, c'est ce qu'on appelle les contraintes émergentes. Sur la planche 12, je vous présente une étude à laquelle j'ai participé qui vise à contraindre l'impact du changement climatique sur l'absorption primaire de l'océan. L'absorption primaire est le flux de carbone absorbé par le phytoplancton, puits de carbone de l'océan. Au cours des dernières décennies, dans le Pacifique équatorial, l'absorptivité primaire a réagi aux variations interannuelles du phénomène Enso qui peut être contrôlé par des variations de la température de surface de l'océan. Sur la figure de gauche, je montre (en noir) les variations de l'indice EL Niño par les fluctuations de la température de la surface des océans, face à différentes estimations dérivées de mesures satellitaires pour l'absorptivité primaire. On constate que les variations de l'absorptivité primaire réagissent de manière quasiment systématique aux fluctuations du phénomène Enso. Pour une augmentation de la température, phénomène El Niño, on observe une décroissance de l'absorptivité primaire. Si on suppose que les processus ou la chaîne de mécanismes mis en jeu aux échelles de temps interannuelles liées au phénomène Enso sont les mêmes mécanismes qui pilotent la réponse des écosystèmes marins aux échelles de temps climatiques, en l'occurrence au changement climatique, il est possible de classer les modèles par rapport à leur réponse. Sur le diagramme en haut à droite, on représente les différents modèles par des points, et on voit que lorsqu'on les classe de cette manière, les modèles qui présentent la plus forte réponse aux échelles de temps interannuelles montrent également la plus forte réponse aux échelles de temps climatiques. Donc il est possible de tracer une droite de régression, on appelle ça une contrainte émergente, et de projeter la distribution observée ou dérivée par les mesures satellitaires sur les échelles de temps climatiques. C'est ce qu'on observe sur la figure en bas à droite avec le déploiement de statistiques bayésiennes. Ici la moyenne multi-modèle ou la distribution des modèles non contrainte, représentée en noir, montre une sensibilité d'à peu près 5 %, une réduction de 5 % de la productivité primaire par augmentation d'un degré ; alors qu'une mesure contrainte par l'utilisation de contraintes émergentes et de statistiques bayésiennes donne une estimation de l'ordre de 2.5 % par Kelvin.

Replaçons-nous dans le contexte du troisième challenge, c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour limiter dans la mesure du possible la hausse de la température à 2°C ou 1.5 °C. La communauté du climat se cristallise autour d'un enjeu : la connaissance et la contrainte de la sensibilité climatique et les budgets carbone associés (planche 13). J'illustre ce point avec l'étude de Schneider et al de 2017, qui montre qu'il est possible d'estimer la sensibilité climatique par rapport à la réflectance des nuages bas, que l'on peut observer et contraindre par des mesures satellitaires. Les

modèles représentant une atténuation de la rétroaction liée aux nuages bas ont tendance à avoir une sensibilité climatique plus faible, et inversement des modèles ayant une amplification de la rétroaction liée aux nuages bas présentent une sensibilité climatique plus forte. Donc si on fait la translation de la sensibilité climatique en termes d'émissions compatibles pour un seuil en température donné, on s'aperçoit qu'on a une contrainte directe sur les budgets carbone qui nous restent à émettre.

(planche 14) Je vous ai donc montré dans cette présentation comment les mesures satellitaires nous ont permis d'améliorer les modèles, de les évaluer de manière routinière, ainsi que de réduire les incertitudes en déployant des techniques de contraintes émergentes qui seront au cœur du prochain rapport du Giec, et de soutenir les différents rapports d'évaluation. Il y a cependant quelques goulots d'étranglement, en particulier le développement toujours plus complexe de mesures qu'en tant que modélisateurs nous mettons dans nos modèles. Pour les évaluer, il faut que la communauté satellite puisse nous fournir ou rendre accessibles ces données, assurer des missions continues et homogènes, afin de nous permettre de comprendre les tendances et de réellement attribuer quel forçage pilote les tendances observées. Enfin, on a besoin de moyens de calculs haute performance pour à la fois traiter des données satellitaires de plus en plus haute résolution et de plus en plus complexes et des résultats de modèles toujours plus étoffés.