



Colloque international – 10 et 11 Oct. 2017 – Toulouse

# Le climat a besoin d'Espace

## DE LA CONTRIBUTION DE LA MESURE DES AEROSOLS DEPUIS L'ESPACE A L'ETUDE DES INTERACTIONS AEROSOLS-CLIMAT

**Pierre Nabat**

*Chercheur, Météo-France, CNRM*

On a parlé jusqu'à présent de CO<sub>2</sub>, de méthane, de nuages, de vent, je vais pour ma part traiter des aérosols, en illustrant quelques travaux réalisés grâce aux mesures spatiales sur les interactions entre les aérosols et le climat.

Pourquoi faut-il considérer les aérosols dans les études sur le climat ? Ils ont des effets très importants sur la météorologie et le climat parce qu'ils jouent à la fois sur le rayonnement et les nuages. Sur la partie gauche de la planche n°2 un schéma montre les interactions des aérosols avec le rayonnement : ils absorbent ou diffusent le rayonnement solaire incident, c'est ce qu'on appelle l'effet direct. Mais en l'absorbant ils modifient des propriétés de l'atmosphère, ce qui amène à des ajustements de la couverture nuageuse. Ce sont les effets semi-directs (vocabulaire utilisé par le Giec dans son 4<sup>e</sup> rapport, dans le 5<sup>e</sup> l'ensemble du processus est résumé sous le terme « interactions aérosols / rayonnement »). L'autre partie des effets des aérosols sur le climat concerne tous ceux sur la microphysique des nuages, à savoir l'effet indirect. Le premier modifie l'albédo du nuage, puisque les aérosols ont une incidence sur la taille des gouttelettes et donc sur la façon dont le nuage réfléchit le rayonnement vers l'espace. La 2<sup>e</sup> série d'effets indirects joue sur la durée de vie du nuage, ses propriétés intrinsèques, le processus de compensation et de formation de nouveaux noyaux de congélation et de condensation. D'autres effets peuvent être imputés aux aérosols, notamment ceux liés au dépôt : en se déposant sur des surfaces comme le manteau neigeux, les aérosols modifient leurs propriétés et donc leur albédo. On observe également des impacts sur la biogéochimie marine, puisque certains types d'aérosols servent de nutriments au phytoplancton.

Dans le dernier rapport du Giec, on a estimé la contribution des différents facteurs. Dans le tableau de la planche n°3 sur le forçage radiatif de chacun, deux lignes concernent les aérosols, la première les interactions aérosols / rayonnement (tendance négative), la seconde les effets indirects, soit les interactions des aérosols avec les nuages (négatif aussi). Cela contrebalance en partie les effets des gaz à effet de serre, mais on remarque une grande barre d'incertitude, plus importante que celle relative aux gaz figurant en haut du tableau. On a donc besoin de mieux contraindre l'effet des aérosols sur le climat.

Comment représente-t-on les aérosols dans les modèles de climat (planche n°4) ? Il y a deux grands types de représentation. Le premier consiste à utiliser des climatologies. On donne seulement une représentation spatiale et évolutive des aérosols, en utilisant généralement l'AOD (Aerosol Optical Depth), c'est-à-dire l'épaisseur optique des aérosols, soit une mesure intégrée sur une colonne atmosphérique de l'extinction du rayonnement par les aérosols. Pour les modèles plus sophistiqués, la représentation est plus pronostique, donc entièrement

interactive, les différents processus en jeu sont représentés (l'émission, le dépôt, le transport, les réactions chimiques). Les aérosols font partie intégrante du modèle et constituent des variables d'état de ces modèles.

Le tableau de la planche n°4 fait un point sur ce qui a été réalisé dans le CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). La première colonne rassemble les composantes principales du climat que sont l'atmosphère, la surface continentale, les océans et glaces de mer. Les aérosols apparaissent dans la deuxième, la colonne ESM (Earth System Model - les modèles du système Terre), aux côtés de la chimie atmosphérique, du cycle du carbone, de la biogéochimie marine. En orange foncé sont inscrits les modèles ayant déjà une représentation interactive des aérosols. Les modèles intermédiaires, en orange clair, disposent d'une représentation semi-interactive : ils ont généralement généré leur propre climatologie d'aérosol, mais pour des raisons de coût, ils utilisent ensuite des climatologies dans les simulations couplées. D'autres modèles enfin n'incluent pas du tout les aérosols. Le CMIP6 devrait compter davantage de modèles avec des aérosols interactifs. Au **CNRM** par exemple on le fera grâce notamment à l'augmentation de la puissance de calcul qui nous permet d'intégrer plus de composantes dans nos modèles de système Terre. Il est important d'y représenter les deux types d'interactions des aérosols : avec le rayonnement et avec les nuages.

A quoi les données satellites vont-elles nous servir (planche n°5) ? Pour évaluer les modèles de climat sur des périodes passées, on fait des simulations assez longues, multi-annuelles, multi-décennales, à plusieurs types de résolution. On a jusqu'à présent surtout parlé de modèles globaux, mais on utilise aussi des modèles régionaux de climat qui nous permettent de descendre à des résolutions jusqu'à 10 km voire plus, on dispose ainsi de premières simulations climatiques avec des modèles non-isostatiques de l'ordre de 2 km de résolution. Ça nous sert aussi lors des cas d'étude pour calibrer nos modèles sur des processus de manière plus précise.

Je vais vous présenter maintenant des exemples de trois types de travaux : évaluation des aérosols eux-mêmes, interactions aérosols / rayonnement, interactions aérosols / nuages. De nombreux instruments mesurent les aérosols, tel MODIS (planche n°6), à bord de satellite défilant. Le document montre les images de trois types d'aérosols, avec à gauche le visible et à droite l'infrarouge, car certains ne sont pas détectés dans toutes les longueurs d'onde. On voit tout d'abord des panaches de feux, en dessous des exports de poussières désertiques et enfin des aérosols de fumée que l'on distingue uniquement dans l'infrarouge et non dans le visible. Le document en haut à droite montre l'épaisseur optique, l'AOD, mesurée par MISR, avec une climatologie par saison pour voir les principaux panaches à la surface de la Terre. On dispose également des données de MSG, avec le radiomètre imageur SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Les images en bas à gauche de la planche n°6 montrent un épisode de poussières désertiques venant du Sahara et remontant sur l'Europe (France et Espagne). D'autres instruments, comme ceux de l'A-Train, permettent d'avoir simultanément plusieurs paramètres.

La planche n°7 présente un exemple d'évaluation de l'épaisseur optique (AOD) tiré du dernier rapport du Giec. C'est une comparaison entre la répartition spatiale des aérosols donnée par MODIS et MISR (en haut) et la moyenne des modèles CMIP5. On constate qu'il y a encore des biais importants, notamment sur l'Afrique équatoriale et les océans. Le graphique de droite illustre les différences entre modèles, en montrant, pour les modèles de CMIP5 comprenant des aérosols interactifs, l'évolution de l'épaisseur optique entre 1850 et 2010. On remarque une large gamme de valeurs. Les données satellites n'apparaissent qu'à la fin, pour essayer de

contraindre cette épaisseur optique. Ce serait évidemment mieux si on disposait de longues séries temporelles pour voir l'évolution et pas seulement le biais, parce qu'il y a une différence dans la moyenne entre les modèles mais également dans l'écart entre le préindustriel et aujourd'hui. Certains (comme le modèle orange) présentent un écart bien plus important que d'autres (tel le violet en bas). Les données satellites sont essentielles pour nous permettre d'évaluer nos modèles sur des périodes historiques.

Sur la planche n°8 figurent quelques exemples de ce qu'on peut faire avec le modèle du système Terre du CNRM. On reproduit relativement bien les différents panaches, peut-être un peu moins fort en intensité sur certaines régions, mais quelques différences existent déjà entre les données satellites, comme dans l'Atlantique Nord. A l'échelle régionale, avec des modèles de 10 à 50 km de résolution, on reproduit certains maxima locaux, telle la pollution sur l'Europe de l'Est ou des zones plus identifiées de source de poussières désertiques sur le Sahara.

Les nuages constituent une des limitations principales à l'utilisation des données satellites. La plupart des capteurs ne mesurent les aérosols qu'en condition de ciel clair. Or dans nos modèles, si on compare l'épaisseur optique entre la moyenne de tous les jours et celle des ciels clairs, on obtient de grandes différences, allant de 20 à 50 % localement de la moyenne totale de l'épaisseur optique. La planche n°9 montre l'épaisseur optique pour différents types d'aérosols. Les sels marins (en haut à gauche) sont générés par le vent lors de dépressions sur l'Atlantique Nord ; mais qui dit dépression dit aussi nuages, donc moins de mesures les jours où justement la production de sels marins est plus grande. C'est dommage. Même chose pour les remontées de poussières désertiques ; elles se produisent souvent en flux de Sud, ce qui implique des dépressions en Méditerranée et donc l'arrivée de nuages. Le cas des sulfates est un peu différent, mais lié au fait que les extinctions des aérosols sont plus importantes quand l'humidité de l'atmosphère l'est également, donc là aussi en présence de nuages. On peut par conséquent s'attendre à des épaisseurs optiques plus faibles en ciel clair qu'en présence de nuages.

On s'emploie par ailleurs à comparer les données AOD de différents capteurs pour une même région et une même période. Une étude publiée à laquelle j'ai participé (planche n°10) a reconstitué la moyenne, sur la période 2000-2010, pour différents capteurs MODIS, MISR, Parasol, MERIS, AVHRR de la **NOAA**, SeaWiFs, SEVIRI de MSG. On remarque de grandes différences, bien que les patterns spatiaux soient généralement les mêmes. Certains capteurs sont plus récents que d'autres, des progrès ont été faits. Le graphique de droite présente la moyenne sur une année, de janvier à décembre, de ces différents capteurs sur la mer Méditerranée. Tous notent un maximum au printemps et en été, lié à l'export de poussières désertiques et au fait que les aérosols restent plus longtemps dans l'atmosphère en été parce qu'il y a moins de dépôt et de lessivage. Cependant des comportements paraissent suspects sur certaines données : des contrastes terre / mer trop importants, des points anormaux ressortant bizarrement.

Le graphique principal de la planche n°11 donne l'évolution de l'épaisseur optique depuis 1980 jusqu'en 2010 sur la mer Méditerranée. Les traits continus représentent les différents capteurs satellites, les pointillés quelques sorties de modèles ou de réanalyses avec aérosols. Outre les différences entre capteurs, on voit (grâce notamment aux données de l'AVHRR de la NOAA) une diminution de l'épaisseur optique depuis les années 1980, diminution logique puisque les émissions d'aérosols en Europe ont nettement réduit durant la période en raison de nouvelles lois sur la qualité de l'air et des crises économiques en Europe de l'Est. On a pu également, grâce aux mesures de MeteoSat, retrouver l'épaisseur optique des aérosols, mais

la série MeteoSat reconstituée présente des breaks correspondant aux changements de plateforme. On a besoin de données homogènes sur de longues périodes pour mieux contraindre nos modèles de climat.

Voici (planche n°12) un cas d'étude permettant de mieux comprendre les processus en jeu : la campagne ChArMEx de l'été 2012, avec des séries provenant de quatre stations du bassin méditerranéen. La simulation du modèle du CNRM apparaît en rouge et les différentes observations satellites en petits points de couleur (violet pour MISR, bleu pour MODIS, vert pour Aerus-Geo, produit développé à partir de Seviri) ; les croix noires sont les points au sol (mesures AERONET servant de référence). On constate que les modèles et les satellites s'en sortent bien, parvenant à reproduire les différents pics qui correspondent dans cette région à des exports de poussières désertiques liées à des flux importants de Sud. Sur le diagramme radar de droite, on voit les scores des différents modèles. L'objectif de ces diagrammes est d'être le plus près possible de la référence, on aurait alors un écart type, celui des observations, et une corrélation représentée par l'angle entre l'axe des abscisses et celui qui passe par le point la plus proche possible de 1. En moyenne, les données de MODIS et de MISR sont plutôt bonnes, de même que notre modèle, mais demeurent des différences importantes, notamment dans certaines estimations (chaque chiffre représente une station différente, la croix la moyenne de toutes les stations).

Le lidar est également très utile pour les aérosols, tel celui embarqué sur Caliop, qui donne une idée de la distribution verticale des aérosols, transportés ici sur l'Atlantique (planche n°13). Cela permet une évaluation un peu plus précise que la seule épaisseur optique (qui est un contenu intégré sur toute l'atmosphère). Caliop a aussi l'avantage de fournir une spécification par type d'aérosol. Le graphique (en bas à gauche) figure les poussières désertiques en marron, les aérosols marins en bleu (plus près de la surface en moyenne), les fumées et le feu en jaune, les sources sur les continents en vert, la pollution sur continent en violet. C'est important pour nos modèles, car les aérosols ont des propriétés différentes et sont généralement regroupés par types, qu'il nous faut pouvoir valider. A droite du document, il y a un exemple de coupe sur une étude de cas présentant un export de poussières désertiques. Les aérosols sont séparés par type (poussières en jaune), c'est le résultat de deux simulations qui montrent que le modèle est capable de reproduire l'altitude de cet export de poussières désertiques.

La planche n°14 traite des interactions des aérosols avec le rayonnement. Les aérosols constituent généralement un problème pour les fabricants de produits de rayonnement pour les satellites, qui cherchent à les estimer pour mieux estimer le rayonnement. Jusqu'à présent, dans de nombreux produits les aérosols n'étaient pas très bien pris en compte, ce qui provoquait des biais, notamment dans des endroits où il y en a beaucoup. A droite du document, on voit les courbes de données dans différentes stations, dont une simulation du modèle du CNRM Aladin, et leurs biais par rapport aux mesures au sol. Les courbes violette, orange et rouge représentent différents produits satellites de rayonnement. Dans certaines régions les satellites présentent un biais très important, parfois même plus fort que le modèle qui lui dispose d'une représentation interactive des aérosols. La courbe verte figure la réanalyse ERA-Interim du centre européen, laquelle a une représentation assez limitée des aérosols, une climatologie relativement ancienne. A gauche du document est représenté le cycle moyen de rayonnement mesuré par différents capteurs satellites ou non. On remarque des différences entre les produits, qui s'expliquent en partie par des différences de climatologie d'aérosols.

Les données satellites peuvent par ailleurs nous servir à estimer le forçage radiatif des aérosols. Pour cela il faut combiner des mesures satellites, de MODIS par exemple, avec l'utilisation de modèles de transferts radiatifs. La figure de la planche n°15 est extraite d'un papier publié estimant le forçage radiatif de tous les aérosols sur la région méditerranéenne. En haut est représenté le forçage au sommet de l'atmosphère, au milieu dans l'atmosphère, et en bas en surface, avec à chaque fois une estimation en ciel clair et en toutes conditions (*All-sky*). Les données satellites permettent également d'avoir des contraintes sur des types particuliers d'aérosols. Un papier publié récemment (planche n°16) s'appuie sur des données MODIS et MISR ainsi que des données au sol pour contraindre l'épaisseur optique des poussières désertiques. Dans les modèles de climat, l'écart entre les modèles est très important, jusqu'à un facteur 5. Le graphique du haut donne la moyenne de l'épaisseur optique pour les poussières désertiques, du modèle le plus faible jusqu'au modèle le plus important, il y a un facteur 5 entre les deux. Dans ce travail, on a débiaisé les données MODIS et MISR à l'aide de mesures au sol et on les a combinées à certaines simulations, afin d'extraire uniquement le signal lié aux poussières désertiques. On a ainsi évalué une sorte de *best estimate* pour l'épaisseur optique des poussières désertiques ; cette estimation est un peu plus importante que la moyenne multi-modèle de simulation représentée par le trait en pointillés. Cela nous donne une idée, en dessous de la variabilité interannuelle, des poussières désertiques.

La planche n°17 s'intéresse aux tendances sur plusieurs décennies. Depuis les années 1980, les émissions d'aérosols ont nettement diminué, faisant suite à une période inverse, entre 1950 et 1980, qui a vu les émissions d'aérosols augmenter. Les deux périodes sont donc totalement distinctes en termes de rayonnement. De 1950 à 1980, période dite de *dimming*, le rayonnement a diminué en surface en raison de l'augmentation des aérosols ; *a contrario* de 1980 à 2000, période de *brightening*, le rayonnement a augmenté du fait de la diminution des aérosols. C'est vrai aux Etats-Unis et en Europe ; mais dans les pays émergents, comme la Chine ou l'Inde, le phénomène est décalé dans le temps, on est resté, au moins jusqu'en 2000, dans une période de diminution de rayonnement. C'est très important à prendre en compte dans les modèles. Le document expose deux simulations régionales, celle de gauche ne prend pas en compte la tendance des aérosols, celle de droite oui (les points correspondent à des observations au sol). La prise en compte de la tendance d'évolution des aérosols permet d'être beaucoup plus proche des mesures au sol. Le problème c'est que plusieurs données satellites n'incluent pas la variation des aérosols, de même que des réanalyses comme ERA-40 ou ERA-Interim, elles sont par conséquent incapables de reproduire la tendance de rayonnement.

Venons-en aux interactions aérosols / nuages. De nombreux travaux estiment la quantification du premier effet indirect des aérosols : l'effet sur l'albédo des nuages. La planche n°18 présente l'extrait d'un papier comparant plusieurs modèles. Le graphique de gauche fait la corrélation entre le nombre de gouttelettes dans le nuage et l'épaisseur optique, sur continent et sur océan, selon les données Modis et les différents modèles. Sur océan, même si on observe des différences entre les modèles, on est dans le bon ordre de grandeur, en revanche il y a une surestimation importante sur continent. Pour comprendre le second effet indirect on utilise d'autres paramètres, que l'on met en corrélation avec l'épaisseur optique : le contenu en eau liquide, la couverture nuageuse, le sommet du nuage, l'albédo planétaire et le rayonnement à onde longue (*long wave*) qui ressort au sommet de l'atmosphère. On constate des différences entre les modèles ; il y a toujours beaucoup d'incertitudes dans la

modélisation du deuxième effet indirect des aérosols. Si on disposait de davantage de mesures ça pourrait nous aider. Concernant les interactions du premier effet indirect, on dispose des estimations du nombre de gouttelettes nuageuses réalisées par plusieurs capteurs, tels CERES, MODIS ou Calipso (planche n°19). Mais des différences demeurent, on aurait besoin de meilleures contraintes. C'est ce qui a été fait tout récemment dans un papier publié dans Nature par Florent Malavelle (planche n°20). Il utilise l'éruption d'un volcan islandais en 2014-2015, car on s'est aperçu qu'elle agissait uniquement sur la taille des gouttelettes nuageuses et donc fournissait un cas parfait pour évaluer les modèles. Si, par le biais des données Modis sur le rayon moyen des gouttelettes nuageuses (en bas du document), on fait la différence entre l'année 2014, qui a vu l'éruption, et la moyenne des années 2000-2013, on remarque une diminution du rayon médian, en raison de la génération d'aérosols. Avec les modèles c'est plus simple, il suffit de débrancher l'éruption ou pas, on peut donc faire la comparaison sur la même année, en 2014, avec ou sans l'éruption. On se rend compte que certains modèles surestiment ou sous-estiment cet effet. La colonne de droite restitue la même chose pour les anomalies de contenu intégré en eau liquide.

En conclusion (planche n°21), mon intervention a cherché à montrer en quoi les données satellites sont essentielles pour évaluer nos modèles ; on profite de leur couverture spatiale et temporelle (à l'exception des longues périodes de temps qui pour l'instant sont limitées) et de la diversité des paramètres.

J'aimerais apporter quelques suggestions. Il serait bon d'améliorer l'homogénéité sur de longues périodes et de faire plus attention à la représentation des aérosols dans les données de rayonnement (mais ça s'est amélioré récemment). De nouveaux produits plus adaptés aux sorties de modèles de climat seraient bienvenus, avec l'épaisseur optique par type d'aérosols, les propriétés d'absorption, de même que des produits d'inversion au-dessus des nuages (on commence à en utiliser), et plus de données 3D. Du côté des modèles, il faut faire des efforts pour mieux se rapprocher des données fournies par les satellites, faire davantage de calculs au niveau des paramètres au sommet du nuage par exemple, ou inclure des simulateurs dans nos modèles qui permettraient de se rapprocher de la façon dont les capteurs réalisent l'échantillonnage de l'atmosphère.