



Colloque International – 10 & 11 Oct. 2017 – Toulouse

Le climat a besoin d'Espace

L'OBSERVATION DU VENT A UNE ECHELLE GLOBALE : COMMENT, ET QUEL BENEFICE POUR LA PREVISION DU TEMPS ET DU CLIMAT ?

Alain Dabas

Météo-France, CNRM

Je vais parler de l'intérêt d'observer le vent pour les études climatiques, puis je montrerai les systèmes opérationnels dont on dispose pour ce faire et la place du spatial : qu'est-ce qu'il apporte par rapport au reste ? Reste-t-il des manques dans l'observation ? Enfin je dirai quelques mots sur une des manières d'utiliser des données d'observation depuis le sol ou l'espace.

Pourquoi doit-on s'intéresser au vent (planche n°2) ? C'est assez naturel pour qui a fait de la prévision du temps. Quand on parle de climat, on mentionne principalement les gaz à effet de serre, l'humidité, la température de surface aux océans... ; le vent apparaît peu, bien qu'il soit présent en filigrane dans beaucoup de choses. Il faut s'intéresser au vent en premier lieu, et tout bêtement, parce que c'est une variable primaire de l'atmosphère. Lorsqu'on étudie l'atmosphère, on cherche d'abord à caractériser le champ de pression (qui donne les dépressions, les anticyclones, etc.), le champ de température, l'humidité, puis le vent. La planche n°4 présente la photographie d'une station de mesure de surface équipée comme toutes les stations d'un anémomètre. A côté il y a un émagramme, un graphe sur lequel on reporte les profils verticaux mesurés par des radiosondes (sondes sous ballon) ; on voit les vents qui ont été mesurés par cette sonde. Le vent constitue une information de base pour caractériser l'atmosphère.

Une deuxième raison nous incite à l'observer. Le vent a un impact, pas seulement néfaste, sur les activités humaines. La planche n°5 montre qu'il peut détruire (voir les dévastations causées par le cyclone Irma à Saint-Martin), perturber certaines activités de transport, notamment aérien, quand il y a un trop fort vent de travers (on a vu récemment un A380 atterrir en Allemagne sous la tempête, le film est assez impressionnant), mais aussi produire de l'énergie (éoliennes, moulins à vent). Si le vent a un impact sur les activités humaines, il y a un intérêt à le prévoir. Anticiper l'arrivée d'un cyclone permet de se protéger et de mettre en place des moyens de sécurité civile à l'avance. Concernant la navigation aérienne, rappelons-nous que la météorologie s'est beaucoup développée avec l'aéronautique, pendant longtemps Météo-France était un service de la navigation aérienne. Un aéroport a intérêt à connaître à l'avance et avec précision l'arrivée d'une tempête pour organiser au mieux ses opérations. Même chose pour l'éolien, déterminer la nature du vent à venir aide à mieux gérer le productif.

L'intérêt de la prévision entraîne un besoin d'étude climatique. On l'a vu avec les questions générées par le cyclone Irma : Est-ce le produit du réchauffement climatique ? Si c'est le cas, cela veut-il dire qu'il y aura demain de plus en plus de cyclones sur ces régions ? Seront-ils plus forts ? Comment reconstruire ? A l'identique ou en plus dur... ?

Le vent transporte l'énergie et la matière. Sur la planche n°6, on voit une photographie satellite de MeteoSat. Le cercle tracé dessus met en évidence un nuage d'aérosols, lesquels

sont observés depuis l'espace grâce à des capteurs comme Modis. Ici ce sont des poussières désertiques venues du Sahara et reprises par un *jet stream*, un courant de vent puissant appelé le courant d'Est africain, qui se situe à peu près au milieu de l'atmosphère. Pour qu'il y ait production d'aérosols, il faut un arrachement de poussières de la surface, donc que la surface s'y prête, et des vents forts. Il est par conséquent nécessaire de connaître précisément les vents proches de la surface dans ces régions désertiques, où il n'y a par ailleurs que très peu d'observations, et ce avec une bonne résolution spatiale.

La planche n°7 présente un autre exemple de l'effet que peut avoir le vent, avec le phénomène El Niño dans le Pacifique. En temps normal, les vents soufflent de l'Amérique du Sud vers le Pacifique, poussant les eaux chaudes de surface vers l'Indonésie, ce qui provoque par compensation des remontées d'eaux froides le long des côtes de l'Amérique du Sud. Ces eaux froides, riches en nutriments, remontent à la surface, favorisant un développement biologique bon pour la pêche. Mais de temps en temps, le vent est moins fort, et les eaux chaudes au lieu de gagner l'Asie du Sud Est restent au milieu, et les remontées d'eau froide ne se font pas. C'est catastrophique pour l'activité de pêche au large des côtes d'Amérique du Sud ; d'autres répercussions sont observées à l'échelle globale. Si on s'intéresse à ces phénomènes, il nous faut étudier le vent à proximité de la surface, là où l'air est en contact avec l'eau.

L'organisation météorologique mondiale (WMO) répertorie sur le site <https://www.wmo-sat.info/oscar/> les spécifications, sans cesse réévaluées, concernant les besoins de mesures. J'ai sélectionné sur la planche n°8 quelques applications relatives au vent, mais le site liste des spécifications pour de multiples variables. Le tableau indique à chaque fois trois valeurs, via trois couleurs, de niveau d'observation : le bleu c'est ce qu'on aimerait avoir, le vert ce qui serait satisfaisant, l'orange la limite exigée pour que l'observation soit utile et nous apprenne quelque chose. C'est une réponse à l'ordre 0, je ne suis pas allé dans le détail ; mais sur le site de la WMO, les tables font des distinctions selon l'altitude, proche du sol, au milieu de la troposphère ou dans la stratosphère.

Quels systèmes permettent de mesurer le vent (planche n°10) ? On dispose de stations de surface équipées d'anémomètres, nombreuses sur les continents, mais aussi sur les océans, grâce à des bouées. Pour les mesures en altitude on utilise des radiosondes ; placées sur des ballons gonflés à l'hélium, elles donnent la température, l'humidité et, grâce à leur GPS, leur mouvement, duquel on déduit le vent. C'est un système très ancien, certaines sondes sont lancées chaque jour à la même heure, souvent à 0 h et 12 h, d'autres à 6 h et 18 h. Elles fournissent des profils verticaux de vent, mais aussi de pression, de température, d'humidité, généralement entre 10 et 20 km d'altitude, sur quelques points deux à quatre fois par jour. Ces dernières années, on s'est mis à équiper des avions de ligne avec des systèmes de mesure météo appelés AMDAR. On trouve ensuite des choses plus anecdotiques, comme le radar au sol montré sur la planche n°11, il donne des profils de vent avec une résolution temporelle excellente sur des altitudes d'à peu près 7000 mètres. Mais ce sont des instruments relativement coûteux ; seulement quelques pays, telle l'Allemagne, les ont développés en réseau.

Les cartes de la planche n°12 donnent une idée de la couverture du globe offerte par chacun de ces systèmes d'observation. Y sont pointées des mesures disponibles pour une prévision du modèle français, faites dans une fenêtre de six heures et transmises suffisamment rapidement (ça ne veut pas dire que sur 24 h on aurait quatre fois plus de données, car certaines ne sont pas mesurées en permanence). Le réseau de 0 h montré ici est plutôt favorable, avec de nombreuses mesures réalisées. Concernant les observations menées au

sol, on remarque quantité de points rouges, mais ils sont concentrés sur les zones habitées, en particulier dans les pays riches, l'Europe est ainsi très bien couverte. Il reste de grands trous, notamment dans des régions intéressantes d'un point de vue météorologique, comme l'Afrique ; au Groenland il n'y a quasiment aucun point de mesure. La deuxième carte répertorie les mesures réalisées par des bouées ; il y en a pas mal, elles couvrent assez bien les océans, mais encore une fois ce sont des mesures de surface. Le troisième planisphère pointe les profils verticaux de vent réalisés par radiosondage ou lâchers de ballon ; ils sont très dispersés, bien des régions ne disposent pas de mesures, on ne sait donc pas ce qui se passe en altitude. Les AMDAR, fixés sur les avions, constituent en revanche une bonne source de données pour cela. On reconnaît sur la quatrième carte les routes aériennes. Ces données permettent notamment de mieux prévoir la consommation en carburant des avions, mais elles se limitent à l'altitude de vol, sauf à proximité des aéroports, au moment de la montée ou de la descente. En définitive, les moyens conventionnels de mesures, y compris à la surface, ne couvrent pas tout le globe et ne donnent pas grand-chose sur la verticale, excepté à l'altitude de vol des avions. Il reste donc de gros trous dans la raquette.

La planche n°13 présente un système fournissant des informations en altitude grâce à des radars du réseau météorologique. En croisant les données du réseau radar qui détecte les nuages, on parvient à restituer des mesures de vents avec des résolutions très fines, mais uniquement dans les nuages. C'est toutefois un peu anecdotique car ce système est très développé en France mais pas dans d'autres pays.

J'en viens maintenant au spatial. Il fournit des données concernant le vent en surface en particulier grâce aux diffusiomètres, ce sont des radars, tel le scatteromètre ASCAT sur METOP (planche n°14). Le principe consiste à mesurer la capacité de la surface des océans (ça marche uniquement sur les océans) à réfléchir l'onde électromagnétique émise. Cela dépend de la rugosité de surface, que l'on relie au vent. Les deux satellites Metop équipés de ces instruments nous délivrent des cartographies de vent. Un satellite observe un point deux fois par jour, avec deux satellites on dispose de quatre observations par jour, avec des résolutions relativement bonnes, 25 km, dans des zones intéressantes, c'est-à-dire où le couplage avec l'océan se fait. C'est une mesure très pertinente. La planche n°15 montre la couverture, plutôt bonne, que l'on peut obtenir. Ces mesures ont toutefois été relativement difficiles à utiliser, des travaux sur le débruitage des données ont été nécessaires. Ce sont des données indirectes mais elles commencent à avoir une très bonne qualité.

La source principale actuelle de mesure de vent depuis l'espace est ce qu'on appelle les AMV (*Athmospheric motion vectors*). On voit sur la planche n°16 une image MeteoSat et les nuages se déplacer (on pourrait tout aussi bien observer des champs d'humidité) ; grâce à leur mouvement on déduit des vents (planche n°17). Cependant tous les nuages ne se déplacent pas avec le vent, certains sont liés à l'orographie, ils ne bougent pas, il faut donc les éliminer. La deuxième source d'incertitude, et principale source d'erreur, de ce type de produit vient du fait qu'il faut associer la mesure de vent à une altitude, ce qui implique de déterminer l'altitude du sommet du nuage. Ça a été une bataille pour améliorer cette estimation mais on a progressé. On utilise des satellites géostationnaires, et de plus en plus des satellites défilants. La planche n°18 montre des mesures produites suivant deux canaux ; ces canaux peuvent être haut dans l'atmosphère ou plus bas, mais rarement à proximité du sol.

Ces vents déduits des nuages ont un impact sur la qualité de la prévision météorologique. Le graphique de la planche n°19 représente la réduction d'erreur relative à une prévision de décembre 2014 à février 2015, pour un modèle global de Météo-France mesurant l'apport de

chaque scène d'observation. Les flèches rouges montrent la contribution des *Atmospheric motion vectors*, notamment de l'américain GOES.

Concernant le futur, la mission Aeolus (planche n°20) enverra le premier Lidar Doppler dans l'espace en 2018. Satellite lancé par l'Agence spatiale européenne, il portera un seul et unique instrument : un Lidar fait à Toulouse chez Airbus, et suivra une orbite polaire relativement basse, 320 km d'altitude. Réalisé pour la prévision du temps, il a une durée de vie de trois ans. Le document montre une idée de l'échantillonnage au sol des mesures. Le principe de base est celui de tout lidar (planche n°21) : on émet une impulsion lumière à partir d'un laser, celle-ci se propage dans un faisceau et au cours de la propagation se diffuse sur tout ce qui peut diffuser. Nous sommes ici dans l'ultraviolet, on diffuse donc sur les molécules d'air et les aérosols. La lumière revient ensuite sur les instruments, on la détecte, on la mesure, et dans le cas présent on mesure le décalage en fréquence entre l'émission et la réception, ce qui donne par effet Doppler une mesure de la composante du vent le long de l'axe optique de l'instrument. Aeolus fonctionne dans l'ultraviolet. Il met en œuvre deux voies de détections. A droite du document est représenté le spectre de la lumière diffusée par l'atmosphère, avec deux composantes très différentes : une très large est due aux molécules, qui ont une agitation thermique assez importante, et un petit pic très étroit est dû aux aérosols, et plus généralement aux particules. Le spectromètre donne la même chose ; on a deux voies de détection, une adaptée au spectre large, l'autre au spectre étroit. La planche n°22 explique le fonctionnement de la partie moléculaire du spectre (la voie Rayleigh) : deux fils interférentiels sont appareillés, quand le spectre est entre les deux, à peu près autant de lumière passe par l'un et par l'autre ; mais s'il bouge, un fil passera un peu plus de lumière et l'autre un peu moins, c'est comme ça qu'on mesure le vent. Si on mesure la différence de lumière en sortie des deux interféromètres et qu'on normalise par la somme totale, on a ce qu'on appelle la réponse, laquelle est reliée au décalage Doppler par des couples d'étalonnage qu'il faut déterminer. Ce système a été conçu à la fin des années 1980, début 1990, il est relativement bien maîtrisé au sol. Dans l'espace c'est un peu plus compliqué. La planche n°23 explique quant à elle le système plus novateur du canal à la fréquence médiane dédié aux particules, qui utilise un interféromètre de Fizeau. Quand on éclaire avec une onde électromagnétique monochromatique plane, une frange se forme dans une position qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement. On image la frange sur une barrette de CCD, et à partir de ce qui est compté sur la barrette, on détermine la position de la frange, remontant ainsi à la longueur d'onde et au décalage Doppler.

La planche n°24 donne une idée de la géométrie de mesure d'Aeolus. Satellite en orbite héliosynchrone, donc défilant Nord-Sud, il tirera sur le côté avec un angle de 35°. Il mesurera une seule composante de vent (Est-Ouest), sur une distance d'à peu près 90 km. On dispose en altitude de 24 espaces de mesures, ce qui permet de couvrir différemment sur les deux voies une bonne partie de l'atmosphère, la voie Rayleigh permet d'aller assez haut, jusqu'à 25 km éventuellement.

Comment utilise-t-on les données ? Nous sommes dans un contexte de prévision du temps, mais on cherche à résoudre les équations d'évolution de l'atmosphère (planche n°26). On s'aperçoit que l'état de l'atmosphère à l'instant t dépend d'abord de l'instant initial t_0 et ensuite d'une intégration. L'intégrale est faite par le modèle, il faut aussi déterminer l'instant initial, ça n'est pas évident parce qu'on a beaucoup de degrés de liberté et relativement peu d'informations. On combine la prévision précédente et des observations. La prévision précédente n'est certes pas parfaite, mais elle n'est pas non plus complètement fautive, si à

un moment donné elle dit qu'il y a une dépression sur l'Atlantique, que les vents sont à peu près de x mètres par seconde, on sait que le lendemain on retrouvera cette dépression un peu plus loin. On cherche à minimiser un écart à la prévision précédente ainsi que l'écart aux observations. Les planches n°27 et 28 représentent cette assimilation des données concernant le vent de manière plus graphique.

Ce procédé a été développé essentiellement pour la prévision météorologique, mais on fait la même chose pour le modèle climatique, c'est ce qu'on appelle des réanalyses (planches n°29). On prend un moment donné, avec une version d'un modèle climatique actuelle dans laquelle on a mis tout ce qu'on savait faire de mieux sur le climat, puis on reprend des séries de mesures, évidemment hétérogènes, sur des périodes les plus longues possibles, on fait l'assimilation et détermine la meilleure estimation possible de l'état de l'atmosphère sur de longues périodes. Sur la page Web du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), il y a de nombreux produits de réanalyses, certaines couvrent une centaine d'années. Evidemment les observations étaient très différentes il y a 100 ans de celles d'aujourd'hui. Dans la réanalyse, on introduit une connaissance qui vient du modèle, donc si ce dernier n'est pas bon, on retrouvera ses défauts dans les sorties. Ça peut être gênant pour certaines applications, mais on peut aussi mesurer ces erreurs, les comparer en permanence aux observations, ce qui permet de détecter les défauts du modèle et donc de les corriger, et ainsi améliorer le modèle et repartir pour un cycle (planche n°30).