

L'utilisation des fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre

Par **Dominique MARBOUTY**

Météo et climat, société française de la météorologie et du climat

La toute récente Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR-WRC-19) qui s'est tenue à Charm el-Cheikh en novembre 2019 s'est conclue par un événement tout à fait inhabituel. Si l'identification de nouvelles bandes de fréquence pour la 5G était attendue, le fait que le secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale (OMM-WMO) ait jugé nécessaire d'adresser à son homologue de l'Union internationale des Télécommunications (UIT-ITU) un message très négatif, diffusé lors de la séance plénière de la CMR-19, et soutenu par un nombre important de délégations dont la France, l'était beaucoup moins. Ce message note en particulier, au sujet des conditions accompagnant l'identification pour la 5G de la bande 24.25-27.5 GHz, voisine de la bande 23,6-24 GHz allouée à l'observation de la Terre :

« Cette décision de la CMR-19 a le potentiel de dégrader significativement la précision des données collectées dans cette bande de fréquence, mettant ainsi en danger les opérations de systèmes de satellites d'observation de la Terre, essentiels aux activités de prévision et d'alerte des services météorologiques nationaux. Ces effets potentiels pourraient être ressentis dans de multiples domaines impactés, en particulier l'aviation, la marine marchande, l'agriculture et les annonces d'événements extrêmes, ainsi que notre capacité commune de surveiller l'évolution du climat à l'avenir. »

Nous nous proposons ici d'expliquer ce qui a pu conduire à cette démarche tout à fait inhabituelle et de voir comment elle peut mettre en péril le système d'observation de la Terre. Pour cela nous examinerons comment fonctionne et surtout comment est utilisé ce système d'observation, comment sont assurées l'attribution et la protection des fréquences qui lui sont nécessaires, quels sont les cas antérieurs de conflit concernant des fréquences allouées à l'observation de la Terre. Cet examen sera largement basé sur les systèmes d'observation météorologique qui, du fait de leur ancienneté et de leur caractère opérationnel, ont largement structuré le système d'observation de la Terre.

L'observation de la Terre

L'observation de la Terre couvre un domaine très large incluant l'atmosphère à tous les niveaux (troposphère, stratosphère, etc.), les océans, les surfaces continentales (couverture végétale, géologie, cours d'eau, constructions, etc.), la cryosphère (calottes polaires, glaciers), la biodiversité. Les premiers relevés systématiques concernant principalement vents et nuages remontent à l'Antiquité ; ils se sont intensifiés à partir du XVII^e siècle avec le développement d'instruments permettant les mesures (thermomètres, baromètres) et l'émergence de la notion de mesures en réseau. C'est dans la deuxième moitié du XIX^e siècle que cette notion de réseau se généralise et conduit à l'organisation de la première réunion d'un congrès météorologique international en 1873 à Vienne, qui évoluera ensuite jusqu'à l'Organisation météorologique mondiale (OMM) actuelle. Les mesures au sol sont progressivement complétées par quelques mesures en altitude (cerf-volant, ballons, avions) et c'est en 1959 qu'est lancé le premier satellite météorologique Vanguard-2. Si cette tentative est un échec, dès 1960, Tiros-1 entame une longue série d'observations spatiales qui ont réellement permis le développement de l'observation de la Terre dans toutes ses composantes.

Le rôle de l'observation de la Terre pour la prévision numérique du temps

La prévision météorologique a fortement progressé au cours des cinquante dernières années. Cela est dû à la conjonction de deux facteurs principaux : le développement des systèmes d'observation spatiaux et le développement de la prévision numérique, c'est-à-dire la capacité de modéliser l'atmosphère et de faire les calculs sur ordinateur. La réussite de la prévision numérique est elle-même la conséquence du développement d'une part des modèles, aussi bien dans leur composante prévision que dans la composante assimilation des données d'observation, d'autre part de la puissance de calcul des ordinateurs, passée de 100 000 additions par seconde sur le premier ordinateur utilisé pour la prévision numérique (l'ENIAC au début des années 1950) à des valeurs chiffrées aujourd'hui en petaflops (10^{15} opérations par seconde).

Cette progression est mise en évidence sur la figure 1 ci-dessous, qui montre l'évolution d'un score classique de prévision, du début des années 1980 à nos jours, pour plusieurs échéances, distinguant pour chaque échéance les scores pour les hémisphères Nord et Sud. On constate que la qualité des prévisions a progressé de trois à quatre jours sur la période : ainsi le score à sept jours en fin de période est supérieur au score à trois jours au début sur l'hémisphère Sud. Mais le point important est la forte progression sur l'hémisphère Sud par rapport à l'hémisphère Nord : la différence en début de période est due à la faible densité du réseau d'observation classique (sol et radiosondes) sur l'hémisphère Sud, qui est progressivement compensée par le développement de l'observation spatiale, surtout à partir de la mise en œuvre de la méthode d'assimilation variationnelle en 1996-1997.

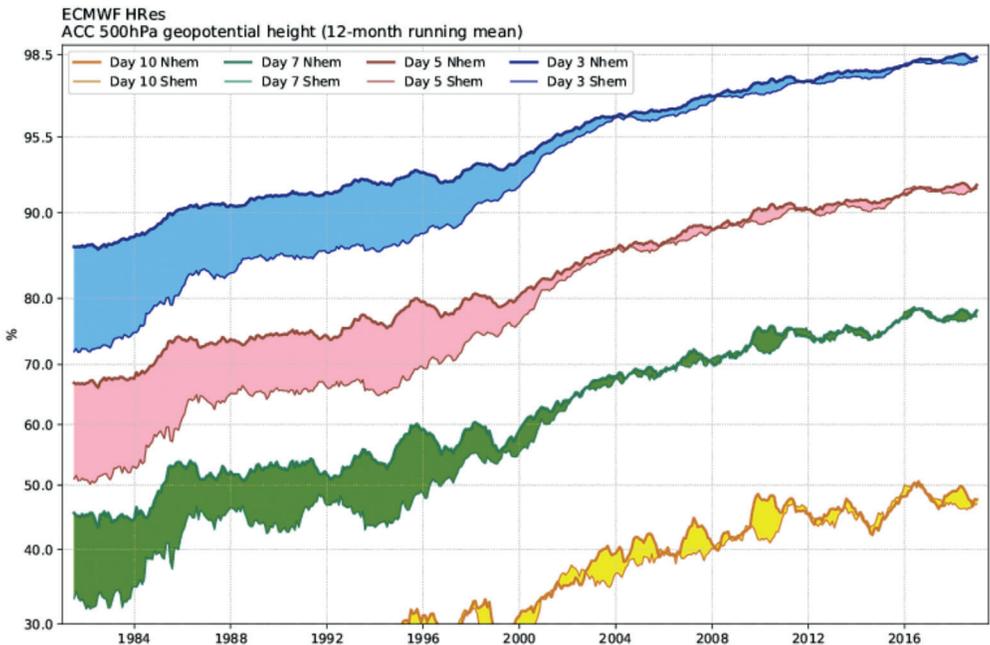


Figure 1 : Evolution de la qualité des prévisions du Centre européen pour les Prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT-ECMWF) entre 1981 et 2019. Le score utilisé est la corrélation d'anomalie au niveau 500 hPa : un score parfait atteint 100 %, on considère que la valeur minimale pour des prévisions utilisables est 60 %. L'évolution est représentée pour quatre échéances différentes : prévisions à trois jours (en bleu), à cinq jours (en rouge), à sept jours (en vert) et à dix jours (en jaune). Pour chaque échéance, le trait supérieur, en gras, correspond au score de l'hémisphère Nord, et le trait inférieur, normal, au score de l'hémisphère Sud. (©ECMWF).

Le graphe ci-après qui montre simplement l'évolution du nombre de satellites utilisés depuis 1996 permet de se faire une idée de l'importance prise par l'observation spatiale pour la prévision numérique. Aujourd'hui, une centaine de satellites sont utilisés opérationnellement ou en test, et

les données satellitaires représentent plus de 70 % des données assimilées. Cette évolution a été renforcée par le fait que les modèles de prévision numérique du temps, qui étaient des modèles d'atmosphère il y a vingt-cinq ans, sont devenus des modèles du système Terre intégrant des composantes océan, glace, chimie atmosphérique, interfaces sol (végétation) et océans (vagues). Ils font donc appel à toute la panoplie des systèmes d'observation de la Terre. Ces systèmes utilisent tous des ondes électromagnétiques et appartiennent à deux grandes familles, les systèmes passifs et les systèmes actifs.

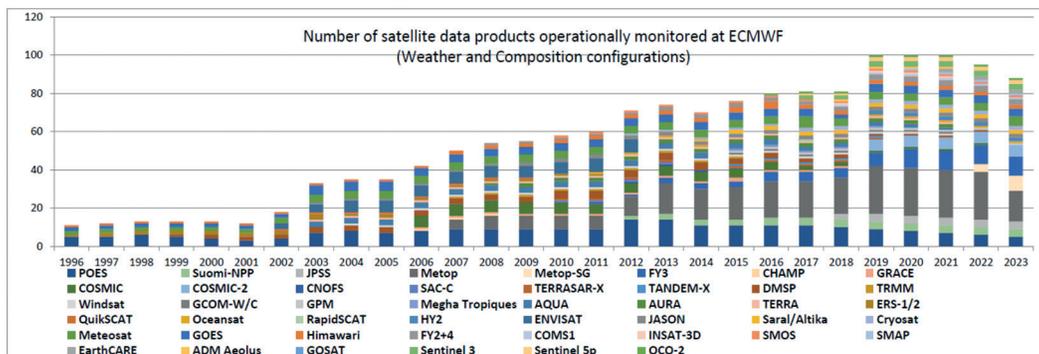


Figure 2 : Evolution du nombre et des types d'observations satellitaires utilisées par le Centre européen pour les Prévisions météorologiques à moyen terme entre 1996 et 2019, et projections jusqu'à 2023 (©ECMWF).

Les systèmes d'observation passifs

Les systèmes passifs mesurent les émissions naturelles en provenance de la surface de la Terre. De fait, ils mesurent la résultante de ces émissions vue du dessus de l'atmosphère, donc après la traversée de toutes les couches depuis le sol. De tels instruments ont été développés dans le domaine des radiofréquences : ils font des mesures dans des bandes de fréquence étroites qui correspondent aux fréquences d'absorption d'éléments présents dans l'atmosphère. Ils doivent donc mesurer des signaux extrêmement faibles puisque l'émission naturelle de la Terre est faible et on mesure ce qui en reste après la traversée de l'atmosphère. Les bandes de fréquence sont déterminées par la structure moléculaire des éléments à caractériser et constituent des ressources naturelles irremplaçables, car fixées par les lois de la physique. Deux exemples importants sont la forte bande d'absorption de l'oxygène entre 50 et 60 GHz qui permet de collecter des informations sur le profil de température, non affectées par les nuages et la vapeur d'eau, et le pic d'absorption de la vapeur d'eau à 24 GHz qui permet d'évaluer la colonne de vapeur d'eau tout en étant peu sensible à l'eau liquide.

Si le principe de ces mesures est simple, leur mise en œuvre est extrêmement complexe pour les raisons suivantes :

- les signaux à mesurer étant très faibles, ils sont facilement noyés par la moindre émission parasite dans la bande concernée. De plus, la méthode de mesure ne permet pas de distinguer l'émission naturelle des émissions parasites ;
- les mesures sont une résultante de l'effet cumulé de toutes les couches de l'atmosphère depuis le sol. L'objectif est de reconstituer des champs 3D des paramètres de l'atmosphère tels que température, teneur en eau ou en vapeur d'eau. Cela nécessite de disposer simultanément de nombreux canaux permettant de retrouver les contributions des différents éléments. La perte d'un canal est préjudiciable à l'ensemble des mesures.

Le traitement des mesures radiométriques dans le domaine des micro-ondes a fait des progrès considérables depuis une vingtaine d'années. Ces mesures fournissent des informations jour et nuit, même au travers des nuages, sur tout le globe terrestre. Elles constituent aujourd'hui la première source d'information pour la prévision numérique du temps.

Il existe d'autres systèmes d'observation passifs, en particulier des sondeurs dans l'infrarouge qui constituent une autre source importante d'information. Et bien entendu les imageurs, disponibles principalement dans les domaines de la lumière visible et infrarouge, appartiennent également à cette catégorie.

Les systèmes d'observation actifs

Les systèmes actifs sont en fait des radars qui émettent une onde en direction de la cible et mesurent ce qui en revient après réflexion ou diffusion. Il y a de nombreux instruments développés et testés pour fournir de nouvelles observations de la Terre en utilisant tous les domaines de fréquences possibles. Un exemple est la mission Aeolus lancée en 2018 qui fournit des vents en altitude en mesurant le déplacement des particules et des molécules de l'atmosphère par l'effet Doppler sur une émission lidar.

Les principaux types de systèmes actifs dans le domaine des radiofréquences sont :

- les radars à synthèse d'ouverture (connus sous leur acronyme anglais SAR), qui fournissent une image topographique de la surface de la Terre. Un bon exemple est la série Sentinel-1 du programme Copernicus de l'Union européenne ;
- les altimètres, qui mesurent la hauteur de la surface des océans à la verticale du satellite. La mission franco-américaine Topex-Poséidon a permis la première cartographie précise à quelques centimètres de la surface des océans ;
- les diffusiomètres (ou scatteromètres), qui permettent de mesurer les vagues et par là les vents à la surface des océans, et donnent des informations sur les couverts végétaux ;
- les radars de précipitations, qui permettent de mesurer l'intensité des pluies à la surface de la Terre ;
- les radars profileurs de nuage, qui renseignent sur les couches nuageuses.

Les fréquences utilisées pour ces mesures actives sont choisies en fonction de physique de la mesure et donc de la nature de la cible, du mécanisme de renvoi de l'onde par cette cible et de leur capacité à traverser les couches entre l'émetteur et la cible. Elles sont également des ressources importantes qui doivent être réservées pour cet usage et protégées des parasites.

La gestion des fréquences pour l'observation de la Terre

De nombreuses fréquences sont donc indispensables pour l'observation de la Terre depuis l'espace, que cela soit de façon passive ou active. A ces besoins pour la réalisation des mesures, il convient d'ajouter les bandes de fréquence permettant de transmettre ces observations au sol. Des besoins similaires existent pour les appareils installés au sol, qui incluent là aussi des systèmes d'observation actifs : radars d'observation des précipitations (pluie, neige), profileurs de vent, télémètres nuages, mesures de visibilité, etc., ainsi que des besoins de transmission des données, en particulier les radiosondages (mesures de pression, température, humidité et vent par ballons ascendants).

La gestion et la protection des fréquences correspondantes sont principalement assurées dans le cadre de l'Union internationale des Télécommunications (UIT) et les décisions sont prises lors des Conférences mondiales des Radiocommunications (CMR). Les principales bandes de fréquence pour les mesures passives sont réservées strictement à cet usage. Les bandes utilisées pour les

mesures actives et les transmissions sont gérées selon les procédures habituelles de l'UIT (Rancy, 2019). Pour les observations spatiales, le manuel EESS (*Earth Exploration-Satellite Service*) de l'UIT décrit les systèmes d'observation et de transmissions, ainsi que la gestion des fréquences correspondantes.

L'attribution et la protection des fréquences pour l'observation de la Terre dans le cadre de l'UIT bénéficient de certains atouts mais ont aussi des faiblesses inquiétantes. Un atout important est le fait que le spatial et la météorologie sont fortement organisés à l'échelle mondiale. On peut ainsi noter que l'UIT et l'OMM sont toutes les deux installées à Genève à quelques centaines de mètres l'une de l'autre, et ont l'habitude de travailler ensemble comme le montre la réalisation en commun d'un manuel sur l'utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie (OMM-UIT, 2017). Un autre atout a été que les besoins en fréquence ont été exprimés depuis longtemps et satisfaits à une époque où la concurrence pour ces fréquences était beaucoup moins exacerbée qu'aujourd'hui.



Recherche de la cause d'un brouillage de radar météo.

©ANFR

Du côté des faiblesses, la principale est que les décisions importantes ou conflictuelles sont prises par la Conférence mondiale des Télécommunications où les représentants des Etats sont des spécialistes des fréquences, pour lesquels une fréquence sert à transmettre, pas à mesurer. On peut d'ailleurs noter que le slogan de l'UIT est « Engagé à connecter le monde », et non « Engagé à connecter et observer le monde ». Une autre faiblesse est que les appétits de nouvelles fréquences émanent de domaines en développement à fort impact économique, donc fortement soutenus par les Etats. On a ainsi vu se développer récemment plusieurs tentatives à l'encontre des fréquences attribuées à l'observation de la Terre, et plus particulièrement la bande d'absorption de la vapeur d'eau 23,6-24 GHz.

Les atteintes à la bande d'absorption de la vapeur d'eau

Une première tentative d'utilisation de la bande de la vapeur d'eau à 24 GHz a été engagée au début des années 2000 par l'industrie automobile qui, forte d'un lobby extrêmement puissant, souhaitait utiliser une bande large de 5 GHz couvrant la fréquence « vapeur d'eau » pour les radars de détection installés pour assister le stationnement des véhicules. Après des discussions très difficiles et un travail énorme mené par les organisations scientifiques (ESA, Eumetsat, Eumetnet...), la question a été traitée en 2005 par la Commission européenne qui a donné à l'industrie automobile une autorisation d'utilisation de cette bande limitée dans le temps (2013) et en nombre de véhicules équipés (7 %), en indiquant que l'équipement des véhicules avec ces radars devrait progressivement basculer vers une fréquence de 79 GHz. Ces conditions ont effectivement été surveillées et respectées. Aujourd'hui la bascule vers la bande 79 GHz a été opérée et il ne reste plus que 0,1 % des véhicules équipés en radar 24 GHz, ce qui ne pose plus aucun problème.

Dans le cas, mentionné en début d'article, de la décision de la CMR-2019, le problème est un peu différent. Tout d'abord, l'identification à la 5G ne concerne pas la bande elle-même mais une bande voisine, très proche, 24.25-27.5 GHz. Le débat ne portait donc pas sur l'utilisation de cette bande par la 5G, mais sur le niveau de protection de la bande vapeur d'eau contre les « bavures » provenant de cette bande voisine. Pour éviter tout problème, les spécialistes des agences spatiales opérant les instruments effectuant les mesures de vapeur d'eau et l'OMM réclamaient une protection de l'ordre de -50 dBW/200 MHz⁽¹⁾ pour garantir le fonctionnement de leurs instruments. Avant la CMR, l'Europe s'était accordé un niveau de -42 dBW qui pouvait être pris comme un compromis acceptable, mais le niveau décidé par la CMR est de -33 dBW pendant huit ans puis -39 dBW au-delà. On est donc très loin du niveau demandé par la communauté de l'observation de la Terre, ce qui a provoqué la réaction de l'OMM. Le risque est effectivement très grand de voir une détérioration des mesures, et donc, de la qualité des prévisions numériques du temps. Plusieurs agences ont annoncé un risque de retour de plusieurs décennies en arrière, en particulier si la 5G est déployée rapidement pendant les huit premières années, ce qui paraît l'orientation actuelle.

Cette décision est malheureusement caractéristique de ce que l'on constate plus généralement dans le domaine environnemental, avec la très grande difficulté des diverses gouvernances nationales et mondiale à arbitrer en faveur de la protection des ressources naturelles lorsque cela entre en conflit avec une possibilité de croissance économique. Pourtant, les coûts pour notre société d'une détérioration de nos capacités à nous protéger de phénomènes extrêmes pourraient s'avérer bien plus coûteux que les surcoûts ou les délais qu'aurait générés pour la 5G un niveau de protection correct de la bande d'absorption de la vapeur d'eau.

Je remercie chaleureusement Stephen English (ECMWF) et Philippe Tristant (expert radiofréquences) pour les nombreux éléments qu'ils m'ont communiqués pour la préparation de cet article.

Références

RANCY F. (2019), « Normalisation et fréquences », *Annales des Mines, Enjeux numériques*, n°5, mars, pp. 61-67. En téléchargement sur : <http://www.annales.org/enjeux-numeriques/2019/en-2019-05/2019-03-11.pdf>

OMM-UIT (2017), *Manuel Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: surveillance et prévisions concernant le climat, le temps et l'eau*, 124 p.

UIT (2011), *Handbook. Earth Exploration-Satellite Service*.

(1) Ce chiffre indique le niveau de puissance maximum de la pollution radioélectrique autorisé et s'exprime en decibel watts (dBW). La pollution est d'autant plus forte que la valeur numérique est faible. Ainsi, une pollution de -30 dBW est dix fois plus nocive qu'une pollution de -40 dBW et cent fois plus nocive que -50 dBW.