

Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie:

Applications météorologiques,
climatiques et hydrologiques et
applications environnementales connexes

Édition de 2026



MANUEL

Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: applications météorologiques, climatiques et hydrologiques et applications environnementales connexes

Édition de 2026

Bureau des radiocommunications



NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'UIT et de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'UIT et de l'OMM, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les opinions exprimées dans les publications de l'UIT et de l'OMM sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'UIT et de l'OMM. La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'UIT et l'OMM les cautionnent ou les recommandent de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications
Organisation météorologique mondiale (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 81 17
Courriel: publications@wmo.int

UIT

978-92-61-40682-0 (version électronique)

OMM

OMM-N° 1197

978-62-63-11197-5 (version électronique)

AVANT-PROPOS

La Commission d'études 7 des radiocommunications (CE 7) – Services scientifiques – a été créée à l'occasion de la restructuration décidée par l'Assemblée plénière du CCIR à Düsseldorf en 1990.

La CE 7 comprend quatre Groupes de travail (GT) qui analysent les questions techniques liées aux diverses disciplines relevant des services scientifiques. Les activités météorologiques et environnementales connexes entrent dans les attributions du GT 7C, qui étudie la conception, l'application et le fonctionnement des capteurs météorologiques, actifs et passifs, installés sur des plates-formes au sol et dans l'espace, ainsi que des auxiliaires de la météorologie, essentiellement des radiosondes et des capteurs de météorologie spatiale. Comme la météorologie dépend en outre des radiocommunications pour la collecte des données nécessaires aux prévisions et pour le traitement des informations et des avis météorologiques générés et leur diffusion au public, cette activité relève également du GT 7B. Quant aux radars météorologiques et aux radars profileurs de vent, ils sont étudiés par le GT 5B et relèvent du service de radiolocalisation.

Dans le cadre de la réalisation des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies, une importance particulière est accordée aux systèmes d'observation de la Terre et aux systèmes météorologiques, en ce qu'ils contribuent directement ou indirectement à la réalisation de ces Objectifs. En outre, les données obtenues au moyen des fréquences radioélectriques sont essentielles pour assurer un suivi des résultats des mesures d'ajustement qui ont été prises. Trente des 232 indicateurs mis au point pour suivre les progrès accomplis dans le cadre de ces activités peuvent être évalués uniquement à l'aide des données recueillies grâce aux satellites de télédétection.

La météorologie tient une place importante dans notre vie de tous les jours et beaucoup de nos tâches et activités quotidiennes y sont liées. Des prévisions météorologiques fiables sont indispensables pour notre sécurité et nos économies. Afin de sauver des vies et de limiter les dégâts causés aux biens et aux infrastructures par les tempêtes, les fortes précipitations, les vagues de chaleur et les cyclones tropicaux, ainsi que par d'autres dangers sous l'influence des conditions météorologiques, tels que les inondations ou la dispersion de la pollution atmosphérique ou marine, les populations et les décideurs du monde entier ont besoin de recevoir dans les meilleurs délais des alertes fondées sur des données météorologiques fiables.

Les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes provoquent des pertes économiques toujours plus grandes. Dans le même temps, il importe de plus en plus de disposer en temps voulu de prévisions météorologiques précises pour assurer la continuité des activités et protéger les économies. Cela est particulièrement vrai pour les secteurs de l'énergie, des transports, du bâtiment, de l'agriculture et du tourisme et les services publics. Les fournisseurs d'énergie, par exemple, s'appuient sur les prévisions météorologiques pour anticiper la demande d'électricité et adapter leur production pendant les périodes de chaleur et de froid. Dans un contexte de développement des énergies renouvelables, la production elle-même dépendra de plus en plus des conditions météorologiques. De même, les prévisions concernant le brouillard, la neige, les vents violents, les orages et la dispersion de particules de cendres provoquée par les conditions météorologiques sont essentielles pour l'aviation et la gestion du trafic aérien et, de ce fait, pour l'économie mondiale.

La principale activité de la Commission d'études consiste à élaborer des Recommandations UIT-R et à mener des travaux préparatoires en vue des Conférences mondiales des radiocommunications (CMR). Les informations amassées par les experts chargés de ces questions sont non seulement utiles à leurs confrères du monde scientifique qui ont impérativement besoin d'observations météorologiques et de données environnementales connexes fiables pour affiner la prévision du temps et du climat, mais aussi aux décideurs et aux régulateurs du spectre pour comprendre l'importance d'utiliser certaines fréquences pour les besoins de la météorologie et d'autres applications environnementales connexes, ainsi que les moyens de les protéger pour pouvoir pérenniser la modélisation du système terrestre et les capacités de prévision avec des garanties de fiabilité optimale.

Il a donc été décidé de rédiger et de publier le présent Manuel, en collaboration avec l'Équipe d'experts pour la coordination des fréquences radioélectriques (ET-RFC) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de façon à ce que l'ensemble des utilisateurs des données météorologiques et des données environnementales connexes puissent mieux comprendre les systèmes météorologiques. Le présent Manuel vise essentiellement à donner aux lecteurs des informations sur l'utilisation, par les météorologues du monde entier et d'autres

scientifiques intéressés par les activités environnementales, des systèmes radioélectriques et des bandes de fréquences radioélectriques, et sur l'importance de cette utilisation pour la sécurité publique et pour l'économie mondiale.

Il est de la plus haute importance de gérer de façon efficace et avisée les bandes de fréquences attribuées afin de garantir et d'améliorer la qualité et la précision des prévisions météorologiques et connexes. Il faut comprendre, par exemple, que si certaines des bandes de fréquences actuellement attribuées au service de météorologie étaient utilisées par d'autres systèmes radioélectriques incompatibles avec les systèmes météorologiques, elles pourraient devenir inutilisables par les systèmes de prévision du temps, du climat et/ou des catastrophes, rendant les prévisions météorologiques correspondantes extrêmement difficiles voire impossibles à réaliser avec la fiabilité et la précision requises.

En ma qualité de Président de la Commission d'études 7, j'ai l'honneur de présenter aux usagers des données météorologiques et des données environnementales connexes, ainsi qu'à l'ensemble des gestionnaires de fréquences, le présent Manuel qui deviendra, j'en suis certain, un ouvrage de référence important dans leur travail.

La mise à jour du présent Manuel n'aurait pu être menée à bien sans l'apport de nombreux contributeurs qui participent aux travaux de la Commission d'études 7 et de l'ET-RFC de l'OMM. Je tiens à remercier plus particulièrement Natalia Donoho, Jesse Andries et Zoya Andreeva de l'OMM, David Franc (États-Unis d'Amérique), Alec Casey (Canada), Éric Allaix (France), Kirsty McBeath (Royaume-Uni), Philippe Tristant (EUMETSAT) et Bruno Espinosa (Président du GT 7C) pour leur précieuse contribution à ces travaux et la conduite de ceux-ci.

En outre, je remercie particulièrement les nombreux contributeurs du monde entier, en espérant n'oublier personne:

NIE Jing, JIN Yuyan et LI Yingchong (Chine);

Sergey Uspensky et Anton Stepanov (Fédération de Russie);

Edna Prado, Hui Shao, Daniel Gillies, Daniel Brewer, Gijs DeBoer, James Pinto et Tomasz Wojtaszek (États-Unis d'Amérique);

Dawn Harrison, Debbie O'Sullivan, David Jackson, David Edwards, Graeme Marlton et Ben Pickering (Royaume-Uni);

Mohammad Zomorodi (Australie);

Volker Lehmann, Marcus Pool et Dirk Brändlein (Allemagne);

Alexander Hafele et Maxime Hervo (Suisse);

Annakaisa von Lerber, Juha Salmivaara et Matti Lehmuskero (Finlande);

Takahiro Mitome, Yasunori Iwana et Satoshi Hagiya (Japon);

Robin Fiory et Peter Leibiuk (Canada);

Flávio Archangelo et Joaquim Eduardo Rezende Costa (Brésil);

Nicole Vilmer et Olivier Traullé (France);

Roeland Van Malderen (Pays-Bas);

Nico Cimini (Italie);

Katharina Andersen et Yan Soldo (Agence spatiale européenne);

Bruce Ingleby (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme);

et plusieurs collègues de l'OMM qui ont appuyé les travaux.

Enfin et surtout, toute notre reconnaissance va également à M. Vadim Nozdrin (Bureau des radiocommunications), qui a largement contribué à la parution de cet ouvrage et à la mise à jour de son contenu.

Markus DREIS
Président de la Commission d'études 7 des radiocommunications

TABLE DES MATIÈRES

Page

AVANT-PROPOS.....	iii
INTRODUCTION.....	vii
CHAPITRE 1 – L'Infrastructure mondiale de l'OMM	1
1.1 Composantes de l'infrastructure mondiale de l'OMM.....	1
1.2 Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS)	2
Références	12
CHAPITRE 2 – Le Service de météorologie par satellite (MetSat)	13
2.1 Le service de météorologie par satellite (MetSat) et ses fréquences.....	13
2.2 Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites géostationnaires (OSG)	16
2.3 Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites non OSG.....	20
2.4 Les autres systèmes de distribution de données	23
CHAPITRE 3 – Le Service des auxiliaires de la météorologie	25
3.1 Introduction	25
3.2 Quelques systèmes de détection du service MetAids.....	27
3.3 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids	31
3.4 Caractéristiques des observations météorologiques fournies par le service MetAids.....	35
3.5 Les variations dans l'exploitation du service MetAids.....	37
3.6 Les tendances futures	38
Références	39
CHAPITRE 4 – Les radars météorologiques	41
4.1 Introduction	41
4.2 Les radars météorologiques.....	43
4.3 Les radars profileurs de vent	81
4.4 Radar océanographique à ondes décimétriques.....	87
Références	88
CHAPITRE 5 – La télédétection spatiale passive et active pour les activités météorologiques et les activités environnementales connexes	89
5.1 Introduction	89
5.2 La radiométrie passive à hyperfréquences	91
5.3 Les capteurs actifs.....	112
CHAPITRE 6 – Météorologie spatiale.....	125
6.1 Définition de la météorologie spatiale et de son service de radiocommunication associé....	125
6.2 Observations de météorologie spatiale.....	125
CHAPITRE 7 – Les autres systèmes de radiocommunication utilisés en météorologie et dans les activités environnementales connexes	135
7.1 Introduction	135
7.2 Systèmes de diffusion de données.....	135
7.3 Systèmes d'aéronef sans pilote pour la détection météorologique	136
7.4 Les systèmes hydrologiques.....	137

vi	<i>Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: applications météorologiques, climatiques et hydrologiques et applications environnementales connexes</i>	
7.5	Utilisation à des fins météorologiques des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS).....	138
7.6	Les systèmes de détection de la foudre	140
7.7	Radiomètres à hyperfréquences au sol.....	143
7.8	Systèmes d'affaiblissement radioélectrique hyperfréquences	144
	Références	145
	Annexe – Acronymes et abréviations.....	149
A.1	Acronymes et abréviations courants en météorologie.....	149
A.2	Autres acronymes et abréviations utilisés dans le présent Manuel	159

INTRODUCTION

Pour un développement économique durable, il est indispensable de pouvoir fournir une alerte en temps utile en cas de catastrophe naturelle ou environnementale, d'effectuer des prévisions justes du climat ainsi que de bien connaître les ressources limitées que constituent notamment la biomasse, la biosphère, les ressources minérales, l'eau et l'énergie, et de conserver et de gérer efficacement ces ressources. Disposer d'informations sur les conditions météorologiques, le climat, l'eau, les conditions environnementales et les catastrophes naturelles est capital pour la communauté internationale. Les activités de surveillance fournissent des informations essentielles pour les prévisions météorologiques, les changements climatiques, la science, la protection de l'environnement, le développement économique durable (transports, énergie, agriculture, urbanisme, gestion des ressources naturelles, etc.), la sécurité des personnes et des biens et la préservation des moyens de subsistance. Il faut bien avoir à l'esprit que ces informations découlent de mesures effectuées par des systèmes utilisant des ondes radioélectriques (électromagnétiques) ou qu'elles sont recueillies, fournies et distribuées par des systèmes de radiocommunication. Les systèmes de radiocommunication sont essentiels pour surveiller le climat de la Terre et aider les pays à atténuer les effets des changements climatiques et à s'y adapter, ainsi qu'à relever les défis majeurs dans ce domaine. Tout système qui s'appuie sur le spectre radioélectrique pour son fonctionnement utilise une ressource naturelle limitée. Il est indispensable de s'assurer de disposer de bandes de fréquences radioélectriques exemptes de brouillages préjudiciables pour pouvoir mettre en place des systèmes d'observation de la Terre.

Les systèmes utilisés pour obtenir et distribuer ces informations recourent à diverses technologies de radiocommunication et doivent pouvoir accéder systématiquement à des fréquences radioélectriques grâce au spectre, exploité à des fréquences centrales allant de quelques kHz à plusieurs centaines de GHz. Ils utilisent différents types de technologies, comme les radiocommunications (radiosondes, satellites), la télédétection active (radars météorologiques, radars profileurs de vent, radars de mesure des précipitations, radars profileurs de nuages) et la télédétection passive (sondeurs hyperfréquences, radiomètres hyperfréquences et détection de la foudre). Les équipements spatiaux et de surface sont exploités pour ces systèmes de radiocommunication de détection active et passive.

Ces applications des fréquences radioélectriques sont interconnectées et forment conjointement un système mondial de surveillance météorologique et environnementale connexe. Aussi, il suffit qu'un des composants radio du système se dégrade, au niveau de l'observation ou de la diffusion des données, pour que tout le système de surveillance et de prévision du système terrestre soit mis en péril.

Il faut aussi noter que les systèmes utilisant ces fréquences jouent un rôle primordial dans la détection, les prévisions et l'alerte pour ce qui est des conditions extrêmes liées au temps, au climat et à l'eau dans le monde. Comme ces catastrophes comptent pour plus de 50% de toutes les catastrophes signalées, ces systèmes sont des composants essentiels des systèmes d'alerte avancée multirisques, lesquels sont indispensables pour atténuer les catastrophes et les situations d'urgence.

Or, le développement des nouvelles applications radio grand public à forte valeur ajoutée met toujours plus de pression sur les bandes de fréquences utilisées pour les applications météorologiques et les applications environnementales connexes. Le risque existe donc que ces applications se voient limitées à l'avenir. La télédétection passive par satellite est d'autant plus exposée qu'elle implique de mesurer les très faibles niveaux de rayonnement émis naturellement dans un certain nombre de bandes de fréquences radioélectriques. Ces bandes sont sensibles à de multiples variables géophysiques et doivent être étudiées conjointement pour pouvoir calculer plusieurs grandeurs différentes. Les fréquences radioélectriques nécessaires pour ce faire sont déterminées par la physique fondamentale et ne peuvent donc pas être altérées. Des observations continues dans ces bandes sont également indispensables pour surveiller et analyser les changements climatiques.

Les météorologues utilisateurs du spectre des fréquences radioélectriques doivent rester vigilants et s'attaquer aux défis croissants du partage du spectre avec d'autres services de radiocommunication. À sa dix-neuvième session, le Congrès de l'OMM (Cg-19, Genève, juin 2023) a exprimé «sa grande préoccupation devant la menace permanente que fait peser l'essor des autres services de radiocommunication sur plusieurs bandes de fréquences attribuées aux services des auxiliaires de la météorologie, de météorologie par satellite, d'exploration de la Terre par satellite et de radiolocalisation (radars météorologiques et radars profileurs de vent)». Compte tenu de l'importance primordiale que revêtent les services de radiocommunication requis pour les activités météorologiques et les activités environnementales connexes, le Congrès, à sa 19^{ème} session, a adopté la Résolution 31, dans laquelle il est demandé à l'Union internationale des télécommunications (UIT) et à ses États Membres:

- 1) de garantir la disponibilité et la protection absolue des bandes de fréquences radioélectriques qui, du fait de leurs caractéristiques physiques, constituent une ressource naturelle unique pour les mesures de l'atmosphère et de la surface terrestre effectuées par des détecteurs aérospatiaux passifs, ces bandes étant d'une importance primordiale pour la recherche et l'exploitation dans les domaines du temps, de l'eau et du climat;
- 2) de prêter toute l'attention voulue aux besoins de l'OMM concernant les fréquences radioélectriques et les dispositions réglementaires pertinentes pour la recherche et l'exploitation météorologiques et environnementales connexes;
- 3) d'accorder une attention particulière aux positions de l'OMM concernant l'ordre du jour de la Conférence mondiale des radiocommunications (CMR), au vu des demandes visées aux points 1 et 2 ci-dessus.

À cet égard, les dernières CMR ont pris un certain nombre de décisions importantes visant à protéger les activités météorologiques et les activités environnementales connexes, compte tenu de la demande croissante de spectre pour des services commerciaux:

- la CMR-15 a décidé de dégager un spectre supplémentaire pour le développement futur de la télédétection active par satellite et les liaisons de télécommande à haut débit pour communiquer avec les satellites d'exploration de la Terre, et de garantir la protection des bandes passives d'observation sur lesquelles les nouvelles attributions étaient susceptibles d'avoir une incidence;
- la CMR-19 a mis en œuvre des mécanismes de protection des radars de météorologie et des radiomètres fonctionnant dans la gamme des 5 GHz, des dispositions réglementaires adéquates pour garantir l'exploitation à long terme des systèmes de collecte de données, et des limites applicables aux émissions hors bande des services de Terre (y compris les Télécommunications mobiles internationales) et par satellite dans un certain nombre de bandes de fréquences entre 31 et 92 GHz adjacentes aux bandes utilisées pour les mesures passives hyperfréquences; et
- la CMR-23 a mis en œuvre de nouvelles restrictions visant à protéger les mesures effectuées à l'aide de détecteurs passifs à hyperfréquences à 18,7 GHz et 36,5 GHz, a adopté de nouvelles assignations de fréquences pour la détection passive à hyperfréquences concernant les mesures des nuages de glace au voisinage de 243 GHz, et a établi le premier niveau de reconnaissance de la météorologie spatiale dans le Règlement des radiocommunications par la définition de la météorologie spatiale, la désignation de son service et une nouvelle Résolution soulignant l'importance des applications de météorologie spatiale.

Compte tenu de ces modifications récentes apportées au Règlement des radiocommunications, ainsi que des évolutions des technologies de radiocommunication utilisées, une version révisée du présent Manuel a été élaborée par le Groupe de travail 7C (Systèmes de télédétection) de la Commission d'études 7 des radiocommunications et par l'Équipe d'experts pour la coordination des fréquences radioélectriques (ET-RFC) de l'OMM, à l'attention des personnes utilisant à titre professionnel les données météorologiques ou les données environnementales connexes obtenues grâce aux systèmes basés sur les radiocommunications, du grand public et des gouvernements qui dépendent de ces systèmes, et de la communauté des radiocommunications, y compris les régulateurs et le secteur des télécommunications sans fil.

Le présent Manuel décrit la structure générale de l'infrastructure mondiale de l'OMM et ses éléments d'observation, et détaille les caractéristiques techniques et opérationnelles de chaque système météorologique ou système environnemental connexe. On précise, dans chaque cas, les bandes de fréquences radioélectriques utilisées, les facteurs qui laissent craindre un brouillage préjudiciable par d'autres systèmes de radiocommunication et les conséquences possibles des brouillages préjudiciables pour les données sur le temps, le climat et l'eau et les données environnementales connexes. Dans le souci d'exposer le plus clairement possible ce domaine complexe, le plan adopté est le suivant:

- 1) L'infrastructure mondiale de l'OMM.
- 2) Les systèmes du service de météorologie par satellite.
- 3) Les auxiliaires de la météorologie, essentiellement les radiosondes.
- 4) Les radars météorologiques au sol, y compris les radars météorologiques et les radars profileurs de vent.
- 5) La télédétection spatiale passive et active pour les activités météorologiques et les activités environnementales connexes.
- 6) Les systèmes de capteurs de météorologie spatiale.
- 7) Les autres systèmes de radiocommunication utilisés en météorologie et dans les activités environnementales connexes.

Afin de faciliter la lecture, une liste d'acronymes et d'abréviations, ainsi qu'une liste de références, sont fournies à la fin du présent Manuel.

CHAPITRE 1

L'Infrastructure mondiale de l'OMM

1.1 Composantes de l'infrastructure mondiale de l'OMM

Les phénomènes météorologiques, climatiques, hydrologiques et environnementaux connexes ne sont pas limités par les frontières nationales. L'échange mondial d'informations en temps quasi réel sur ces phénomènes est essentiel pour assurer des prévisions météorologiques et climatiques et une gestion des ressources en eau qui soient efficaces, ainsi que de nombreux autres services environnementaux connexes, dans l'intérêt des populations du monde entier.

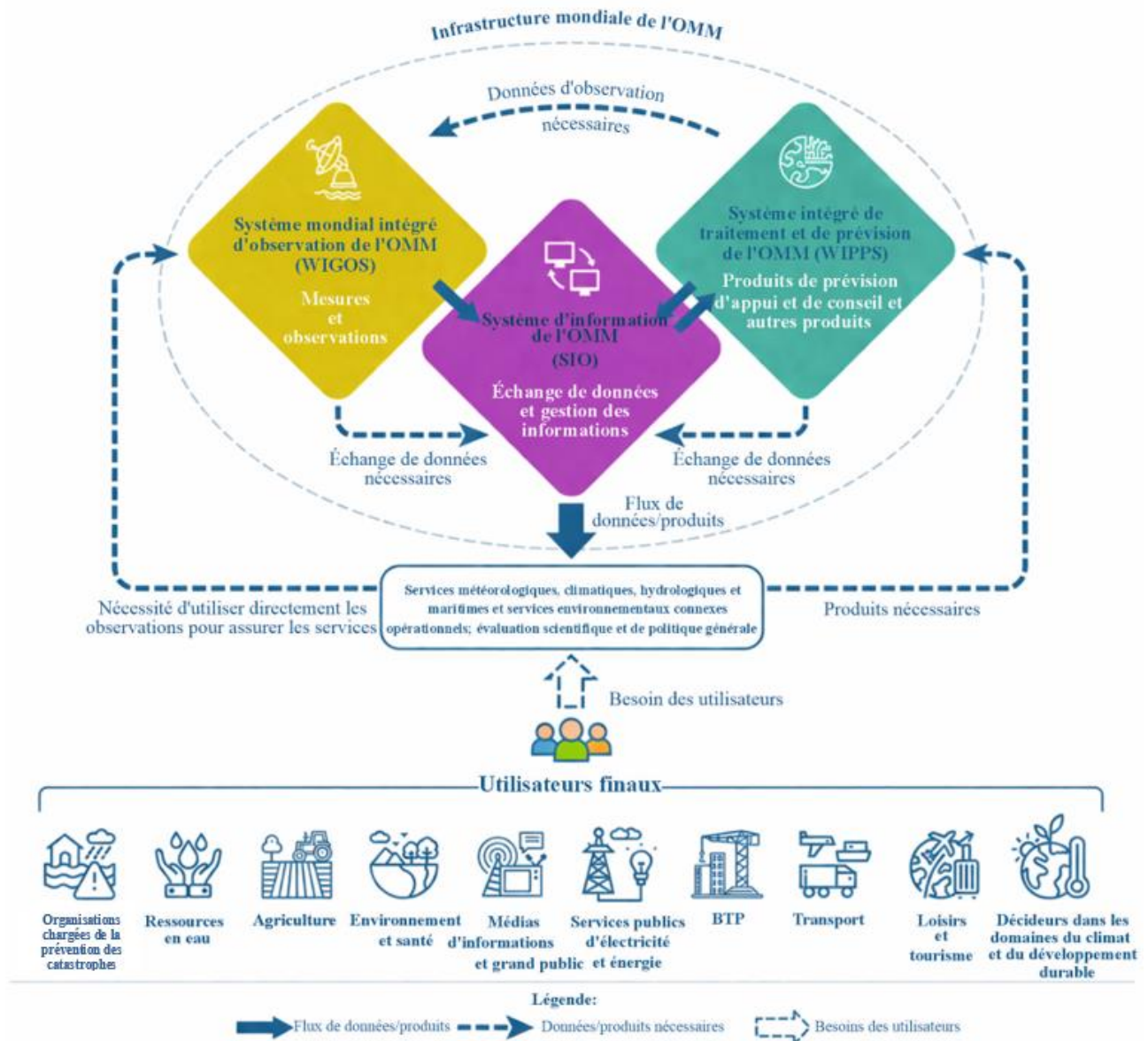
L'infrastructure mondiale de l'OMM allie des systèmes d'observation, des installations de télécommunication et des centres de traitement des données et de prévisions – utilisés par les 193 États Membres et territoires – qui mettent à disposition les informations météorologiques et les données environnementales connexes à l'appui des services fournis dans le monde entier.

L'infrastructure mondiale de l'OMM comprend trois principaux systèmes (Fig. 1-1):

- Le **Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS)** fournit des données d'observation normalisées, de grande qualité, sur des variables météorologiques, climatiques et hydrologiques et d'autres variables environnementales connexes en provenance de l'espace extra-atmosphérique et de toutes les parties du globe. Il comprend une multitude de systèmes d'observation individuels à la surface de la Terre et dans l'espace, détenus et exploités par des membres de l'OMM et des organisations partenaires dans le monde entier.
- Le **Système d'information de l'OMM (SIO)** constitue un réseau coordonné de systèmes permettant de partager des données fiables sur les observations, produits et avertissements météorologiques, climatiques, hydrologiques et environnementaux connexes. Il présente des capacités de découverte de données pour les données produites par le système WIGOS et le Système intégré de traitement et de prévision de l'OMM (WIPPS).
- Le **Système intégré de traitement et de prévision de l'OMM (WIPPS)**, anciennement connu sous le nom de Système mondial de traitement des données et de prévision (SMTDP), est un réseau mondial qui coordonne les capacités des Membres en vue de préparer des analyses et des produits de prévision et de les mettre à la disposition de tous les Membres, et permettre ainsi de fournir des services météorologiques, climatiques et hydrologiques et des services environnementaux connexes. Les centres WIPPS soutiennent ce réseau aux niveaux mondial, régional et national pour assurer la fourniture des produits WIPPS et l'accès à ces produits.

FIGURE 1-1

Composantes de l'infrastructure mondiale de l'OMM



Meteo-01-01

1.2 Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS)

Le système WIGOS constitue le cadre mondial pour tous les systèmes d'observation de l'OMM et pour les contributions de cette dernière aux systèmes d'observation coparrainés appuyant tous ses programmes et activités, afin de répondre aux besoins des utilisateurs. Il englobe les systèmes d'observation des domaines suivants du système terrestre: météorologie, climat, composition de l'atmosphère, hydrologie, cryosphère, océans et météorologie spatiale [OMM-N° 1160].

Les principales composantes du système WIGOS sont les suivantes:

- la composante observation de la Veille météorologique mondiale (VMM);
- la composante observation de la Veille de l'atmosphère globale (VAG);
- la composante observation de la Veille mondiale de la cryosphère (VMC);
- le Système d'observation hydrologique de l'OMM (SOHO); et
- le système d'observation pour la météorologie spatiale.

En outre, l'OMM collabore avec des organisations partenaires pour compléter ces composantes du cadre du système WIGOS, via le Système mondial d'observation du climat (SMOC) pour la surveillance du climat et le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS, *Global Ocean Observing System*) pour les observations de l'océan.

En établissant des normes et des recommandations relatives aux observations, le Système WIGOS soutient l'élaboration de produits et d'informations de qualité contrôlée pour la fourniture de services météorologiques, climatiques, hydrologiques et maritimes et de services environnementaux connexes efficaces. Comme le montre la Fig. 1-2, le système WIGOS comprend des sous-systèmes opérationnels dans l'espace et à la surface de la Terre financés par la recherche, ainsi que des infrastructures physiques d'observation sur terre, en mer, dans les airs et dans l'espace.

Les avantages les plus évidents de ce Système sont la protection de la vie humaine, des moyens de subsistance et des biens grâce à la détection, la prévision et l'alerte précoce en ce qui concerne les phénomènes météorologiques graves, tels que les inondations, les sécheresses, les vagues de chaleur, les tsunamis, les tempêtes locales, les tornades, les ouragans ou les cyclones tropicaux ou extratropicaux, ainsi que les événements de météorologie spatiale tels que les éruptions solaires et les tempêtes géomagnétiques qui peuvent entraîner des pannes radioélectriques, une dégradation de la qualité de fonctionnement des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*), des pannes généralisées du réseau électrique et d'autres effets préjudiciables.

Des prévisions précises sont particulièrement utiles pour un large éventail d'activités économiques telles que la santé publique, la réduction des risques de catastrophe, la gestion des ressources en eau, la sécurité alimentaire, les énergies renouvelables, le tourisme, les voyages, les assurances et le développement durable. L'allongement des délais de lancement d'alerte en cas d'événement grave permet aux autorités civiles et aux premiers secours de prendre les mesures adéquates pour protéger leurs concitoyens.

FIGURE 1-2

Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS)



1.2.1 Observations de météorologie

L'infrastructure mondiale de l'OMM a été conçue à l'origine sous le nom de Veille météorologique mondiale (VMM) pour répondre aux besoins des utilisateurs en ce qui concerne la surveillance et les prévisions météorologiques. La composante observation de la VMM communique les observations météorologiques en provenance de toutes les régions du monde en vue de la préparation d'analyses, de prévisions, de conseils et d'avertissements météorologiques, et pour appuyer les activités de surveillance du climat et les activités environnementales connexes menées par les Membres de l'OMM et les organisations partenaires.

1.2.1.1 Observations à la surface de la Terre

L'épine dorsale du sous-système à la surface de la Terre est constituée de stations au sol observant des paramètres météorologiques tels que la pression atmosphérique, la vitesse et la direction des vents, la température de l'air et l'humidité relative à la surface de la Terre ou à proximité. Les données de ces stations sont échangées à l'échelle mondiale en temps réel. Un sous-ensemble de ces stations de surface est également utilisé à des fins de surveillance du climat via le Réseau de stations d'observation en surface pour le Système mondial d'observation du climat (SMOC).

1.2.1.2 Observations en altitude

Des radiosondes fixées à des ballons libres mesurent la pression, la vitesse du vent, la température et l'humidité juste au-dessus du sol à des hauteurs allant jusqu'à 30 km voire plus. Elles constituent un réseau mondial de stations en altitude. Au-dessus des océans, les observations par radiosonde sont recueillies à partir de navires, présents principalement dans l'Atlantique Nord, dotés à leur bord d'installations automatiques de sondage en altitude. Un sous-ensemble de stations en altitude, spécialement conçues pour la surveillance du climat, inclut le Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC.

1.2.1.3 Observations des radars météorologiques et des radars profileurs de vent

Les radars météorologiques se sont révélés extrêmement utiles pour fournir des données à haute résolution dans l'espace et dans le temps sur des zones relativement étendues, en particulier dans les couches inférieures de l'atmosphère. Ces instruments sont utilisés pour l'estimation en temps réel et la prévision à court terme des précipitations. Ils sont également les seuls à pouvoir observer l'évolution de plusieurs phénomènes météorologiques graves, tels que les phénomènes convectifs violents ou les tempêtes tropicales. Les produits de données concernant les précipitations générés par les radars peuvent permettre ou améliorer la détection et la prévision des crues soudaines. Ainsi, les radars météorologiques sont indispensables pour diffuser des alertes météorologiques de grande portée dans les meilleurs délais.

Outre leurs fonctions premières, les radars météorologiques opérationnels peuvent mesurer les vents pendant les précipitations, en complément d'autres technologies de mesure en altitude telles que les radiosondes et les radars profileurs de vent. En outre, la mise en œuvre de la technologie à double polarisation dans les systèmes de radars météorologiques a apporté plusieurs avantages, notamment une meilleure détection des types de précipitations, une estimation plus précise des précipitations et une meilleure qualité globale des données radar. Les radars météorologiques sont devenus un élément essentiel des réseaux d'observation nationaux et régionaux modernes.

Les radars profileurs de vent fournissent des profils continus et en temps réel de la direction et de la vitesse du vent depuis des hauteurs proches de la surface de la Terre jusqu'à la troposphère. Ces profils complètent d'autres méthodes de profilage des vents en altitude, telles que le radiosondage, et constituent un apport précieux pour les systèmes de prévision numérique du temps (PNT). Contrairement aux radars météorologiques, ces instruments peuvent effectuer des mesures utiles même en l'absence de précipitations, en détectant les échos diffusés par les irrégularités de l'indice de réfraction de l'air. Cette capacité de détection par temps clair est une caractéristique véritablement unique de ce radar. En outre, les radars profileurs de vent peuvent également mesurer les vents en détectant les échos provenant d'autres cibles, telles que les précipitations.

1.2.1.4 Autres observations par télédétection au sol

Les systèmes d'observation par télédétection au sol, autres que les radars météorologiques et les radars profileurs de vent, fournissent généralement des données à haute résolution temporelle et verticale, ce qui constitue un avantage important par rapport aux méthodes classiques d'observation et de profilage *in situ*. On trouvera ci-après quelques-uns des instruments de télédétection au sol les plus utilisés.

Les radiomètres hyperfréquences au sol sont des instruments de télédétection passifs mesurant les émissions thermiques de l'atmosphère; ces données peuvent ensuite être traitées pour établir des profils de grandeurs atmosphériques comme la température et l'humidité. Ces grandeurs peuvent servir à définir des indices de prévision communs sur le potentiel d'orage et d'autres menaces météorologiques permettant d'appuyer les travaux des météorologistes en activité, ou peuvent être intégrées directement dans les modèles PNT pour améliorer la qualité des prévisions de ces derniers.

Les systèmes passifs utilisés pour la détection de la foudre permettent d'assurer une surveillance précise et en temps réel de l'activité de la foudre grâce à un réseau de capteurs au sol répartis. Ils sont capables de localiser des orages ou même un impact de foudre donné, et fournissent aussi indirectement des informations précieuses sur d'autres phénomènes graves associés aux orages, tels que les crues soudaines ou les vents destructeurs. La précision de la détection, l'efficacité et la portée des systèmes de détection de la foudre dépendent du type et du nombre de capteurs. Certains réseaux sont conçus pour la détection locale tridimensionnelle à haute précision de la foudre, tandis que les systèmes de détection de la foudre de longue portée peuvent couvrir des zones continentales ou détecter la foudre au-dessus des océans.

Les systèmes de détection et de télémétrie par la lumière, communément appelés lidars, sont des instruments de télédétection active utilisant des lasers pour effectuer des observations basées sur la diffusion provoquée par les molécules et particules de gaz atmosphériques. Il existe plusieurs types de lidars atmosphériques, tels que les lidars à absorption différentielle (DIAL, *Differential Absorption Lidar*), les lidars à diffusion de Raman et les lidars à effet Doppler, chacun ayant des caractéristiques et des capacités de mesure différentes. Les lidars peuvent extraire des informations sur différentes variables atmosphériques, dont la composition atmosphérique, les nuages, la vapeur d'eau, les vents et la température, qui peuvent être utiles dans diverses applications, telles que la surveillance de la qualité de l'air, la prévision numérique du temps et le profilage des vents.

Outre les systèmes de télédétection au sol qui utilisent les rayonnements électromagnétiques décrits ci-dessus, certaines technologies recourent aux ondes acoustiques pour le profilage atmosphérique. On recense deux instruments clés en la matière, à savoir les sodars (détection et télémétrie sonores) et le système de sondage acoustique radioélectrique (RASS, *Radio Acoustic Sounding System*). Le sodar fournit des mesures détaillées des profils de vent et de la structure thermodynamique de la basse atmosphère. Le système RASS, quant à lui, dispose de capacités plus importantes encore en mesurant également des profils quantitatifs de température. Les deux instruments sont actuellement utilisés principalement dans des applications de recherche.

1.2.1.5 Observations météorologiques réalisées depuis des aéronefs

Dans le cadre d'accords conclus avec des compagnies aériennes partenaires, l'Association du transport aérien international (IATA) et l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), des milliers d'aéronefs communiquent des observations météorologiques en fournissant des rapports sur la pression, le vent, la température, l'humidité, les turbulences et d'autres paramètres pendant le vol. Le système de retransmission des données météorologiques d'aéronefs (AMDAR) effectue des observations de haute qualité de la température de l'air et de la vitesse et de la direction des vents au niveau de croisière ainsi qu'à certains niveaux en montée et en descente. Le volume de données provenant des aéronefs a considérablement augmenté ces dernières années, avec plus d'un demi-million d'observations météorologiques AMDAR fournies par jour, depuis des centaines d'aéroports dans le monde. Les systèmes de ce type, qui présentent un fort potentiel de mesure dans des endroits où les données de radiosonde sont rares, voire inexistantes, apportent une contribution majeure aux travaux de la Veille météorologique mondiale en ce qui concerne les observations en altitude.

À l'avenir, l'OMM s'attend à ce que les systèmes d'aéronef sans pilote, composés à la fois de petits aéronefs, comme les drones, et d'une gamme d'aéronefs à voilure fixe, constituent une autre source importante d'observations depuis des aéronefs. Les systèmes d'aéronef sans pilote pourraient prendre en charge une gamme d'applications de surveillance météorologique, hydrologique et climatique potentiellement large. L'OMM soutient les efforts visant à comprendre et à promouvoir l'utilisation de ces systèmes, capables de mesurer des paramètres météorologiques en tant que systèmes d'observation complémentaires aux radiosondes classiques à bord de ballons.

1.2.1.6 Observations maritimes en surface

Les observations consacrées aux océans sont effectuées à partir d'instruments placés à bord de satellites, de navires, de bouées fixes ou dérivantes et de plates-formes fixes. Les instruments utilisés à bord des navires recrutés dans le cadre du Programme des navires d'observation bénévoles de l'OMM fournissent bon nombre de variables identiques à celles communiquées par les stations terrestres, notamment la température à la surface de la mer, la hauteur des vagues et la période des vagues. En outre, le programme opérationnel sur les bouées dérivantes, dans le cadre duquel sont utilisées 1 200 bouées dérivantes, permet d'effectuer des observations concernant la température à la surface de la mer, la pression au niveau de la mer, les courants de surface et la salinité de la surface de la mer, et de transmettre ces données aux satellites heure par heure.

1.2.1.7 Observations depuis les satellites météorologiques

Les observations météorologiques spatiales sont effectuées dans le cadre de programmes satellitaires mis en œuvre par les agences spatiales des pays membres de l'OMM et les organisations intergouvernementales exploitant des satellites météorologiques et des satellites d'observation de la Terre. La coordination internationale entre opérateurs de satellites est assurée par le Groupe de coordination pour les satellites météorologiques ([CGMS](#)).

La composante dorsale spatiale du système WIGOS comprend des constellations de satellites héliosynchrones en orbite terrestre basse dans trois plans orbitaux et un anneau de satellites géostationnaires assurant une couverture totale en dehors des zones polaires, auxquels s'ajoutent des satellites situés dans d'autres plans orbitaux et des satellites en orbite dérivante ou fortement elliptique.

L'imagerie visible et infrarouge (VIS/IR) depuis l'orbite géostationnaire permet un échantillonnage très fréquent (à des rythmes infra-horaires ou à la minute), ce qui est essentiel pour surveiller les phénomènes en évolution rapide, tels que le mouvement et l'évolution des nuages, les phénomènes météorologiques violents, les éruptions volcaniques et les incendies de forêt. Il est possible de répondre au besoin d'imagerie non polaire fréquente à partir des satellites géostationnaires avec au moins cinq satellites assurant une couverture complète de la Terre. Dans une constellation opérationnelle, les satellites de secours sont tenus d'assurer une redondance supérieure à ce minimum.

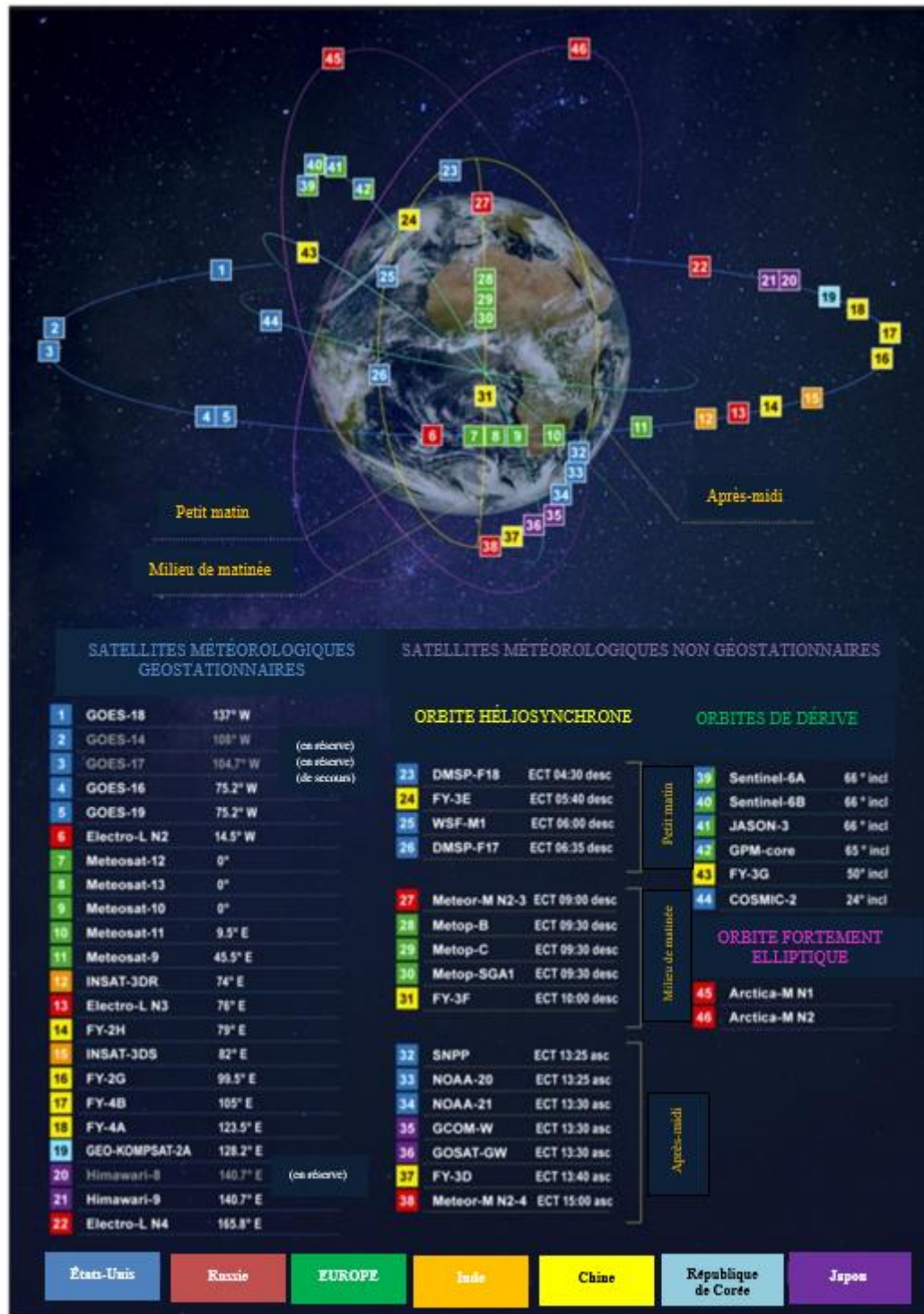
L'orbite héliosynchrone assure la couverture mondiale nécessaire à des applications comme la prévision numérique du temps à l'échelle mondiale, la météorologie polaire et la climatologie. Pour ces applications, un échantillonnage très fréquent est moins indispensable qu'une couverture mondiale et une grande précision. L'orbite héliosynchrone et d'autres orbites terrestres basses présentent d'autres avantages, à savoir la possibilité d'effectuer des opérations de détection active dans les gammes hyperfréquences (radar) et optiques (lidar) du spectre électromagnétique et de mesurer les limbes de la haute atmosphère.

Grâce à l'amélioration de la prévision numérique du temps, des méthodes de plus en plus sophistiquées ont été mises au point pour pouvoir obtenir des informations sur la température et l'humidité directement à partir des observations de la luminance énergétique par satellite. Ces dernières années, des progrès impressionnants ont été réalisés en ce qui concerne l'analyse et les prévisions météorologiques et climatiques, y compris les alertes en cas de phénomènes météorologiques dangereux (fortes pluies, tempêtes, cyclones) qui affectent toutes les populations et toutes les économies. Ces progrès s'expliquent en grande partie par la multiplication des observations spatiales et leur intégration dans les modèles PNT, qui donnent lieu à une amélioration considérable des techniques de prévision et, par ailleurs, à un temps de préparation accru aux phénomènes météorologiques extrêmes.

La Fig. 1-3 donne un aperçu des satellites météorologiques actuellement opérationnels.

FIGURE 1-3

Constellation des satellites météorologiques actuellement opérationnels du système WIGOS (en mars 2026)



Meteo-01-03

Afin d'assurer la poursuite des observations météorologiques à partir de l'espace, les satellites actuellement opérationnels sont remplacés en permanence par de nouveaux satellites de la génération existante ou par une nouvelle génération de satellites météorologiques. En plus d'assurer la continuité des données, les nouvelles générations de satellites météorologiques dotés de capacités d'observation accrues fournissent aux utilisateurs de nouveaux types de données. En conséquence, les volumes globaux de données sont supérieurs d'un ou plusieurs ordres de grandeur à ceux de la génération précédente. Les satellites récemment lancés sont exploités

en même temps que les satellites vieillissants jusqu'à ce qu'ils soient progressivement retirés lorsqu'ils arrivent en fin de vie. La hausse continue du nombre de satellites en orbite entraîne une augmentation des risques liés aux débris spatiaux, en particulier en orbite terrestre basse. Cette situation est susceptible de compromettre la fiabilité du système d'observation spatial. Pour y remédier, il importe de plus en plus de suivre les lignes directrices et les normes relatives à la durabilité de l'espace, notamment les exigences relatives au retrait de l'orbite des satellites plus anciens à la fin de leur vie opérationnelle.

Une liste des satellites météorologiques et des satellites environnementaux connexes actuellement opérationnels ou qu'il est prévu d'exploiter, ainsi que leurs paramètres, sont disponibles dans la [base de données OSCAR/Space de l'OMM](#).

Les observations satellitaires pour la surveillance du temps, du climat et du système terrestre en général n'ont jamais été aussi importantes, tandis que les capacités techniques et l'industrie spatiale dans son ensemble se développent rapidement. Il est donc essentiel que les opérateurs de satellites adaptent et optimisent les architectures d'observation globales pour répondre aux besoins opérationnels des utilisateurs et pour faire face à l'évolution de l'environnement.

Le développement de satellites de petite taille est une évolution de l'ensemble de l'industrie des satellites, qui offre des possibilités d'accès et d'utilisation plus larges et plus faciles des services spatiaux par tous les pays en raison des obstacles moins élevés sur le plan technique et du capital [[Manuel de l'UIT sur les petits satellites](#), 2023]. Les constellations de satellites plus petits continuent donc de gagner en importance.

En conséquence, une architecture satellitaire hybride, définie comme une combinaison de plates-formes de référence (orbite terrestre basse, orbite géostationnaire, etc.), de petits satellites et d'autres satellites autres que ceux de grande taille, est devenue une approche efficace pour fournir des observations fondamentales pour les applications météorologiques et les applications environnementales connexes. Les capacités de mesure supplémentaires contribuent également à accélérer le développement de ces applications et services.

1.2.2 Observations de la composition de l'atmosphère

Les observations de la composition de l'atmosphère sont coordonnées par la Veille de l'atmosphère globale ([VAG](#)) de l'OMM, un programme de recherche qui vise à définir une approche mondiale coordonnée en ce qui concerne la composition de l'atmosphère et ses changements. Il coordonne des observations de haute qualité des éléments qui composent l'atmosphère (gaz à effet de serre, ozone, aérosols, certains gaz réactifs, dépôts atmosphériques totaux, rayonnement ultraviolet) à l'échelle mondiale et locale afin de fournir des informations scientifiques fiables aux décideurs, d'appuyer les conventions internationales et de contribuer à améliorer notre compréhension des changements climatiques et de la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance.

Le système intégré d'observation de la composition atmosphérique constitue l'épine dorsale du programme. Ce système comprend des composantes d'observation au sol et par satellite exploitées par les pays membres et les organisations partenaires. Le réseau d'observation au sol comprend environ 400 stations hébergées par plus de 100 pays, ainsi que des stations exploitées par des réseaux contributeurs. Le réseau de stations est complété par des navires de croisière réguliers et par des observations effectuées depuis des plates-formes aéroportées qui permettent de caractériser la haute troposphère et la basse stratosphère, notamment en ce qui concerne l'ozone, le rayonnement solaire, les aérosols et certains gaz à l'état de traces.

Ces dernières années, les programmes satellitaires ont permis d'effectuer d'importantes mesures concernant les composés atmosphériques et les paramètres associés qui complètent les mesures effectuées dans le cadre du réseau de la VAG. Lorsque des mesures locales très précises de stations au sol de la VAG sont associées à la couverture quasi mondiale des mesures par satellite, on obtient une image plus complète de la composition atmosphérique et des processus connexes à l'échelle mondiale, et il est possible de procéder à des vérifications complémentaires de l'étalonnage des instruments. Les observations par satellite de la composition atmosphérique sont coordonnées par le Comité sur les satellites d'observation de la Terre ([CEOS](#)) à travers la Constellation virtuelle de composition atmosphérique (*Atmospheric Composition Virtual Constellation*, [AC-VC](#)), qui traite des questions de la pollution atmosphérique, des gaz à effet de serre et de l'ozone stratosphérique.

1.2.3 Observations hydrologiques

Le Système d'observation hydrologique de l'OMM ([SOHO](#)) constitue le cadre d'échange de données hydrologiques fiables et d'accès à ces données aux niveaux national, régional et international pour tous les fournisseurs et utilisateurs de données hydrologiques. Il offre une infrastructure d'échange de données et d'informations à l'appui des systèmes d'alerte avancée permettant l'accès aux données, développant les capacités techniques et promouvant la politique de partage des données.

Le SOHO permet de mesurer les éléments hydrologiques fondamentaux à partir de réseaux de stations hydrologiques et météorologiques. Ces stations recueillent et, dans le cas des stations automatiques, transmettent en temps quasi réel des observations hydrologiques sur la quantité et la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Les stations automatiques transmettent des données par l'intermédiaire de réseaux de téléphonie mobile, de liaisons radioélectriques en ondes métriques/décimétriques, ou de satellites météorologiques ou de communication. La transmission peut se faire à des intervalles de temps programmés ou être engendrée par des événements particuliers (par exemple, le dépassement d'un seuil de niveau d'eau donné) sur un canal d'urgence dédié.

Au cours des vingt dernières années, l'utilisation des données d'altimétrie satellitaire en hydrologie n'a cessé de croître pour créer des séries chronologiques d'étapes ou estimer les débits, entre autres choses. La précision des mesures d'altimétrie satellitaire s'est également considérablement améliorée, ce qui rend ces données plus utilisables à des fins opérationnelles, d'analyse climatique et de recherche. Cette évolution a atteint son point culminant en décembre 2022 avec le lancement de la mission SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*, Topographie des eaux de surface et des océans), dont le but est d'assurer une couverture totale des eaux continentales.

L'estimation des précipitations à partir de données satellitaires en temps quasi réel est une donnée essentielle pour la gestion de l'eau, en particulier pour les systèmes d'alerte aux inondations, et peut être intégrée aux observations locales au sol pour améliorer la qualité de ces systèmes.

La capacité des radars à ouverture synthétique (SAR) à recueillir des données, quelles que soient les conditions météorologiques et la couverture nuageuse, de jour comme de nuit, représente un avantage évident qui permet à cette technologie de trouver des applications dans divers domaines, tels que la surveillance des catastrophes ou de l'environnement. Les données de ces radars sont particulièrement bien adaptées à la cartographie des inondations à l'appui de la réduction des risques de catastrophe.

En ce qui concerne la qualité de l'eau, l'utilisation de la signature spectrale des masses d'eau, principalement dans les gammes du visible et de l'infrarouge proche, pour estimer les variables de la qualité de l'eau est à l'essai et donne des résultats prometteurs pour une utilisation plus opérationnelle.

1.2.4 Observations de la cryosphère

La Veille mondiale de la cryosphère ([VMC](#)) de l'OMM est le domaine d'activité transversal qui vise à aider les Membres de l'OMM à améliorer durablement leurs capacités d'observation et de notification des changements concernant toutes les composantes de la cryosphère, et de prévision de ces changements et de leurs incidences sur le temps, le climat, l'eau, l'environnement et les populations.

Le réseau de stations d'observation de la surface de la VMC, appelé CryoNet, se compose de stations centrales et de stations contributives, ainsi que de réseaux affiliés. En 2023, plus de 700 stations de la VMC enregistrées dans la base de données OSCAR/Surface de l'OMM mesuraient une ou plusieurs variables d'une composante de la cryosphère (neige, glaciers, glace de mer, pergélisol, etc.).

Les techniques d'observation employées pour mesurer les variables de la cryosphère varient considérablement d'une composante de la cryosphère à l'autre, et des méthodes classiques et émergentes sont appliquées. Par exemple, de nouveaux systèmes de mesure basés sur des capteurs GNSS ou des capteurs de neutrons/muons de rayons cosmiques sont testés pour mesurer quotidiennement l'épaisseur de la neige, l'équivalent en eau de la couverture neigeuse, ou les deux. L'utilisation de radars à pénétration de sol pour déterminer l'épaisseur de la neige devient une pratique courante sur la neige et les glaciers. L'épaisseur des glaciers est de plus en plus étudiée par sondage acoustique radioélectrique, à l'aide d'équipements remorqués par des véhicules, de systèmes portables ou d'instruments aéroportés. Il est également prévu d'utiliser des sondeurs radar embarqués à bord de satellites. Les systèmes radar peuvent également être utilisés pour étudier

les couches dans les glaciers et le manteau neigeux, ainsi que la nature de l'interface entre la glace et le lit, et pour détecter l'eau subglaciaire et englacière et la teneur en eau liquide de la neige.

Les observations de la glace de mer reposent sur des méthodes manuelles et des techniques de télédétection. Une gamme de capteurs automatisés permet de mesurer ou calculer l'épaisseur de la glace de mer. Il peut s'agir de radars à pénétration du sol, d'appareils de sondage électromagnétique (souvent associés à la détection de la surface supérieure par laser), de stations de bilan massique de la glace de mer, de mesureurs mécaniques de l'épaisseur des glaces ou de sonars orientés vers le haut. La méthode la plus efficace pour estimer l'étendue, la concentration et le stade de développement de la glace de mer consiste à recourir à des satellites utilisant des capteurs hyperfréquences passifs et actifs (comme des radars SAR), car ces capteurs peuvent recueillir des données quelles que soient les conditions météorologiques et les conditions d'éclairement solaire. Les données fournies par les capteurs hyperfréquences passifs et actifs peuvent être complétées par des données optiques acquises au-dessus de zones exemptes de nuages. La tomographie de résistivité électrique est couramment utilisée pour mettre en évidence la présence de glace et de corps gelés dans le pergélisol riche en glace. En outre, la vitesse des glaciers rocheux est déterminée soit en effectuant des relevés géodésiques terrestres, soit par interférométrie radar à ouverture synthétique.

Toutes ces données permettent d'évaluer globalement l'état de la cryosphère dans le contexte du changement climatique et de répondre aux questions sur les ressources en eau douce dans les régions polaires et montagneuses.

1.2.5 Observations de météorologie spatiale

La météorologie spatiale concerne les conditions et les processus dans l'espace, y compris sur le Soleil, dans la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère, et qui sont susceptibles d'influer sur l'environnement proche de la Terre. Les variables physiques qu'il convient de surveiller en ce qui concerne les phénomènes de météorologie spatiale comprennent les variables liées à l'origine solaire des perturbations (par exemple, régions actives du Soleil, éjections de masse coronale), ainsi que les variables quantifiant l'environnement terrestre perturbé, à savoir l'état de l'ionosphère et de la magnétosphère, les champs magnétiques au niveau du sol et le rayonnement cosmique.

Dans ces deux catégories, les mesures *in situ* et les mesures par télédétection sont effectuées à la fois par des systèmes d'observation en surface et spatiaux. Par conséquent, les mesures *in situ* par satellite sont également concernées.

Plusieurs types de mesures au sol sont actuellement effectuées à l'appui des services de météorologie spatiale: observations optiques du Soleil, mesures du flux radioélectrique solaire et du spectre radioélectrique, mesures des rayons cosmiques par des moniteurs à neutrons, mesures du champ magnétique de surface, et mesures de l'ionosphère au moyen de riomètres, d'ionosondes et de récepteurs GNSS.

Les instruments spatiaux utilisés pour surveiller la météorologie spatiale comprennent les instruments embarqués à bord des satellites, qui servent également à surveiller les conditions météorologiques terrestres. Un certain nombre de satellites géostationnaires produisent des images du Soleil dans l'ultraviolet extrême (EUV) et mesurent les rayonnements EUV et le flux de rayons X, ainsi que les flux d'électrons et de protons.

En outre, des mesures sont effectuées à partir de plusieurs satellites en orbite terrestre basse, y compris des mesures d'imagerie et de flux solaires, des imageries aurorales, ainsi que des mesures d'occultation radioélectrique pour quantifier les propriétés ionosphériques et thermosphériques.

Enfin, des mesures spatiales sont également effectuées par des engins spatiaux situés plus loin dans l'espace, plus particulièrement en amont de la Terre dans le vent solaire, autour du point de Lagrange L1 mesurant les propriétés du plasma du vent solaire, y compris le champ magnétique, ainsi que les flux de particules et les images de coronarographie du Soleil (images d'un Soleil éclipsé artificiellement). Plus loin encore, on trouve des engins spatiaux en orbite autour du Soleil, qui offrent une vue de la surface solaire qui n'est pas visible depuis la Terre, des vues latérales sur la propagation des éjectas allant du Soleil vers la Terre, ainsi que des mesures *in situ* du vent solaire.

1.2.6 Observations climatiques

Les observations climatiques sont coordonnées par le Système mondial d'observation du climat ([SMOC](#)), parrainé par l'OMM, la Commission océanographique intergouvernementale de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (COI-UNESCO), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et le Conseil international des sciences.

Le SMOC est l'un des principaux mécanismes de coordination internationale pour la planification, le développement et la révision des systèmes mondiaux d'observation du climat. Il joue également un rôle capital dans la définition des besoins d'observation pour les applications climatiques. Un ensemble de variables recensées par le SMOC, connues sous le nom de variables climatiques essentielles, contribuent à la caractérisation du climat de la Terre et dressent un tableau des changements climatiques à l'échelle mondiale.

Les observations par satellite et en surface contribuent largement aux observations du climat mondial. Le SMOC facilite les observations climatiques effectuées par les réseaux de surface appuyés par l'OMM, le Système mondial d'observation de l'océan ([GOOS](#)), les observations spatiales coordonnées par le Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS) et le Groupe de coordination pour les satellites météorologiques (CGMS), ainsi que par de nombreux autres réseaux terrestres fournis par des organisations.

Des observations à long terme précises et stables sont fondamentales pour comprendre les changements climatiques, et le SMOC joue un rôle essentiel en veillant à ce que les observations climatiques soient coordonnées à l'échelle mondiale pour fournir des informations dans les meilleurs délais et établir des bonnes pratiques et des méthodes garantissant une qualité et un étalonnage des données de haut niveau.

1.2.7 Observations des océans

Les observations des océans sont coordonnées par le [GOOS](#), coparrainé par l'OMM, la COI-UNESCO, le PNUE et le Conseil international des sciences. L'un des principaux objectifs du GOOS est de favoriser l'intégration harmonieuse de diverses plates-formes d'observation. Ces plates-formes constituent un vaste ensemble composé notamment de satellites, de bouées, de plates-formes d'observation depuis des navires et de véhicules autonomes. En s'appuyant sur les technologies de ces plates-formes, le GOOS cherche à obtenir une vue holistique des processus et phénomènes complexes qui se produisent dans les océans du monde.

Les satellites, dotés d'instruments de télédétection évolués, notamment de systèmes hyperfréquences actifs et passifs, jouent un rôle déterminant dans la surveillance des caractéristiques océaniques à grande échelle. Ils offrent un point d'observation depuis l'espace, qui permet d'observer les grandes tendances océaniques, telles que la température de la surface de la mer, la couleur de l'océan et les variations du niveau de la mer. Ces observations contribuent grandement à mieux comprendre les systèmes climatiques mondiaux et les tendances à long terme.

Les bouées dérivantes, installées stratégiquement dans diverses régions océaniques, servent d'avant-postes sentinelles recueillant des données en temps réel sur les conditions océaniques. Ces plates-formes flottantes sont équipées de capteurs qui mesurent des paramètres tels que la température à la surface de la mer, la salinité et les courants. Les données obtenues à partir des bouées contribuent à l'élaboration de modèles et de prévisions précis, qui permettront de mieux anticiper des événements tels que les tempêtes, les tsunamis et les variations climatiques.

Les véhicules autonomes, y compris les planeurs sous-marins et les flotteurs profileurs, plongent dans les profondeurs de l'océan et donnent ainsi des informations précieuses sur les propriétés de la subsurface. Ces explorateurs autonomes parcourent les profondeurs de l'océan pour recueillir des données sur la température, la salinité et les niveaux de nutriments. Leur capacité à naviguer sur de vastes étendues de l'océan permet aux scientifiques d'obtenir une perspective tridimensionnelle et d'améliorer ainsi notre compréhension de la stratification et des schémas de circulation océaniques.

En outre, plusieurs autres réseaux de groupes de coordination des observations fournissent des observations océaniques *in situ* à long terme, mondiales et de haute qualité au moyen de diverses technologies. Ces réseaux suivent l'évolution des conditions océaniques mondiales et de variables telles que la température de l'océan, les courants, les vagues, le niveau de la mer, la salinité, le carbone et l'oxygène, qui sont essentielles pour caractériser les changements de l'environnement océanique mondial.

Références

- [1] OMM-N°1060 – Manuel sur le Système mondial intégré d'observation de l'OMM, <https://library.wmo.int/records/item/55063-manual-on-the-wmo-integrated-global-observing-system-wmo-no-1160?offset=42>.
- [2] Site web du Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS), <https://community.wmo.int/en/activity-areas/WIGOS>.
- [3] Site web du Groupe de coordination pour les satellites météorologiques (CGMS), <https://cgms-info.org/>.
- [4] Base de données OSCAR/Space de l'OMM: <https://space.oscar.wmo.int/spacecapabilities>.
- [5] Manuel de l'UIT sur les petits satellites, édition de 2023, <https://www.itu.int/pub/R-HDB-65-2023>.
- [6] Site web du Programme de la Veille de l'atmosphère globale (VAG), <https://community.wmo.int/en/activity-areas/gaw>.
- [7] Site web du Système d'observation hydrologique de l'OMM (SOHO), <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wmo-hydrological-observing-system-whos>.
- [8] Site web du Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS), <https://ceos.org/>.
- [9] Site web de la Constellation virtuelle de composition atmosphérique du CEOS, <https://ceos.org/ourwork/virtual-constellations/acc/>.
- [10] Site web de la Veille mondiale de la cryosphère (VMC), <https://community.wmo.int/en/activity-areas/global-cryosphere-watch-gcw>.
- [11] Site web du Système mondial d'observation du climat (SMOC), <https://gcos.wmo.int/>.
- [12] Site web du Système mondial d'observation de l'océan (GOOS), <https://goosocean.org/>

CHAPITRE 2

Le Service de météorologie par satellite (MetSat)

2.1 Le service de météorologie par satellite (MetSat) et ses fréquences

Le numéro **1.52** du Règlement des radiocommunications (RR) définit comme suit le service de météorologie par satellite (MetSat): «Service d'exploration de la Terre par satellite pour les besoins de la météorologie». Ce service établit entre les stations terriennes et une ou plusieurs stations spatiales des liaisons de radiocommunication, pouvant comprendre des liaisons entre stations spatiales, permettant:

- d'obtenir des renseignements relatifs aux caractéristiques de la Terre et de ses phénomènes naturels, y compris des données sur l'état de l'environnement, à partir de détecteurs actifs ou passifs situés sur des satellites de la Terre;
- de recueillir des renseignements à partir de plates-formes aéroportées ou situées sur la Terre;
- de distribuer des renseignements à des stations terriennes;
- d'assurer les liaisons de connexion nécessaires à l'exploitation des satellites et des applications du service MetSat.

Ce chapitre consacré aux applications du service MetSat présente les transmissions par radiocommunication ci-après:

- Transmission de données d'observation depuis les satellites du service MetSat vers les stations de réception principales.
- Retransmission des données prétraitées vers les stations météorologiques d'utilisateur par l'intermédiaire de satellites du service MetSat.
- Transmission par radiodiffusion directe vers les stations météorologiques d'utilisateur depuis les satellites du service MetSat.
- Autres systèmes de distribution de données aux utilisateurs (GEONETCast) via des systèmes à satellites autres que ceux du service MetSat.
- Transmission depuis des plates-formes de collecte de données vers des satellites du service MetSat.

Le Tableau 2-1 répertorie les bandes de fréquences qui sont attribuées dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT au service de météorologie par satellite (MetSat) et au service d'exploration de la Terre par satellite (SETS). Les systèmes du service MetSat peuvent également utiliser les bandes de fréquences attribuées au SETS pour la transmission de données (voir la Note 1).

TABLEAU 2-1

Bandes de fréquences attribuées au service MetSat et au SETS dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT et utilisables par les satellites météorologiques pour les transmissions de données

Attributions disponibles pour les transmissions de données du service MetSat	
Sens espace vers Terre	Sens Terre vers espace
137-138 MHz (MetSat, primaire)	401-403 MHz (SETS et MetSat, primaire)
400,15-401 MHz (MetSat, primaire)	2 025-2 110 MHz (SETS, primaire) (Note 1) (et sens espace-espace)
460-470 MHz (SETS et MetSat, secondaire ¹)	7 190-7 250 MHz (SETS, primaire ^{2, 3}) (Note 1)
1 670-1 710 MHz (MetSat, primaire)	8 175-8 215 MHz (MetSat, primaire)
2 200-2 290 MHz (SETS, primaire) (Note 1) (et sens espace-espace)	28,5-30,0 GHz (SETS, secondaire) (Note 1)
7 450-7 550 MHz (MetSat, primaire, satellites géostationnaires uniquement)	40,0-40,5 GHz (SETS, primaire) (Note 1)
7 750-7 900 MHz (MetSat, primaire, satellites non géostationnaires uniquement)	
8 025-8 400 MHz (SETS, primaire) (Note 1)	
18,0-18,3 GHz (MetSat, primaire, sens espace vers Terre dans la Région 2, satellites géostationnaires uniquement)	
18,1-18,4 GHz (MetSat, primaire, sens espace vers Terre dans les Régions 1 et 3, satellites géostationnaires uniquement)	
25,5-27,0 GHz (SETS, primaire) (Note 1) (et sens espace-espace dans la bande 25,25-27,5 GHz)	
37,5-40,0 GHz (SETS, secondaire) (Note 1)	
65,0-66,0 GHz (SETS, primaire) (Note 1)	

NOTE 1 – Le service MetSat faisant partie du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS), ces attributions (par exemple: 8 025-8 400 MHz et 25,5-27,0 GHz) sont également utilisables par les satellites du service MetSat et leurs applications.

2.1.1 Les principes généraux des systèmes du service MetSat

Les systèmes du service MetSat collectent généralement des données variées à l'aide d'imagers dans le visible, l'infrarouge proche et l'infrarouge et d'autres instruments de détection passive et active fonctionnant également dans les hyperfréquences attribuées à cet effet (voir le Chapitre 5).

Les données brutes collectées par les instruments embarqués à bord d'un satellite météorologique géostationnaire sont transmises en permanence à une station au sol de l'exploitant pour être traitées puis transmises à divers centres météorologiques nationaux, aux archives officielles et à d'autres usagers. Elles comprennent des photographies de la Terre prises à plusieurs longueurs d'onde afin de donner une foule d'informations utiles. Une fois traitées, les données peuvent être renvoyées au satellite qui les retransmet en radiodiffusion directe vers les stations d'utilisateur par des signaux numériques à débit faible et/ou élevé; elles peuvent également être transmises directement aux utilisateurs par le biais d'autres systèmes de distribution.

¹ Conformément au numéro **5.290** du RR, le service MetSat bénéficie d'une attribution à titre primaire dans certains pays.

² Conformément au numéro **5.460A** du RR, l'utilisation du SETS est limitée aux opérations de poursuite, de télémessure et de télécommande et ne doit pas demander à bénéficier d'une protection vis-à-vis des services fixe et mobile.

³ Conformément au numéro **5.460B** du RR, le SETS utilisé dans la bande 7 190-7 235 MHz ne doit pas demander à bénéficier d'une protection vis-à-vis des stations existantes et futures du service de recherche spatiale.

Contrairement au cas des satellites géostationnaires du service MetSat, qui sont visibles en permanence par les stations au sol associées, les données brutes acquises par les instruments embarqués à bord d'un satellite météorologique non géostationnaire doivent être collectées et stockées à bord du satellite jusqu'à ce qu'elles puissent être transmises à une station au sol de l'exploitant lorsque le satellite passe au-dessus d'une telle station. Ces données brutes sont ensuite traitées par l'exploitant et transmises aux utilisateurs par différents mécanismes de distribution. Pour réduire la latence des données, un sous-ensemble des données acquises par les instruments sont «radiodiffusées» directement depuis le satellite météorologique et peuvent être reçues par n'importe quelle station d'utilisateur située en visibilité du satellite. On parle alors de «lecture directe».

Pour combler le manque d'observations au-dessus des régions polaires par les satellites géostationnaires, de nouveaux satellites en orbite fortement elliptique ont été introduits, à savoir les satellites de la série Arctica-M. Deux satellites fonctionnant tour à tour assurent une couverture de type géostationnaire de la région de l'Arctique. Les données brutes (images de la Terre prises dans diverses bandes du visible et de l'infrarouge) sont transmises à la station au sol principale de l'entité exploitante en vue d'être traitées et diffusées aux utilisateurs.

Les satellites météorologiques, géostationnaires et non géostationnaires, utilisent également des systèmes de collecte de données (DCS, *data collection systems*), à savoir des plates-formes de collecte de données (PCD) pour les satellites géostationnaires (OSG) et des systèmes tels qu'Argos pour les satellites non géostationnaires (non OSG).

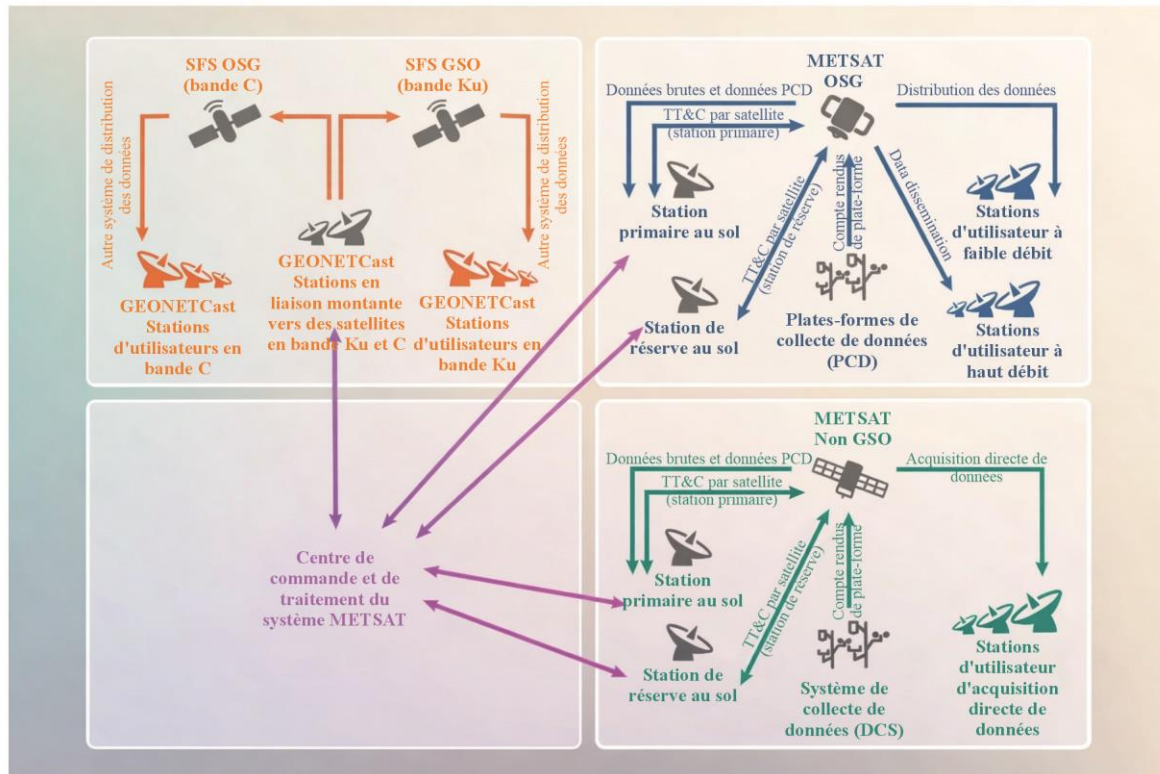
La plupart des PCD, généralement situées au sol, à bord d'avions, sur des navires ou sur des bouées en mer, transmettent aux satellites météorologiques géostationnaires les données collectées, qui portent sur des paramètres météorologiques de base tels que la température en surface, la vitesse des vents, l'intensité des pluies, la hauteur des courants et les gaz dans l'atmosphère, mais aussi des données utilisées à de nombreuses autres fins, telles que la détection des polluants océaniques, les incendies de forêts, les alertes sismiques, les alertes au tsunami, les alertes avalanches, la surveillance du niveau des eaux et les alertes inondations, la gestion des voies d'eau, la rétention d'eau et l'attribution de l'eau et la recherche climatique. Elles peuvent aussi donner leur position, ce qui permet de déterminer les mouvements. Outre l'exploitation des canaux PCD régionaux, les opérateurs MetSat exploitent également les canaux internationaux pour alimenter le système international de collecte de données (IDCS, *international data collection system*). En outre, certains canaux du système IDCS peuvent également être attribués à un système d'intervention d'urgence/de surveillance des catastrophes.

Les plates-formes de collecte de données comme le système Argos transmettent leurs données aux satellites MetSat non OSG. Lorsqu'elles sont installées sur des bouées et flotteurs, ces plates-formes mesurent la pression atmosphérique, la direction et la vitesse du vent, les courants marins et d'autres paramètres connexes. Les systèmes de collecte de données embarqués à bord des satellites non OSG sont également utilisés, entre autres applications, pour observer le mouvement des animaux et surveiller les flottes de pêche.

La Fig. 2-1 montre l'architecture générale d'un système MetSat.

FIGURE 2-1

Architecture générale d'un système MetSat



Meteo-02-01

2.2 Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites géostationnaires (OSG)

Le Système mondial intégré d'observation de l'OMM (WIGOS) exploite plusieurs satellites météorologiques en tout temps pour offrir la couverture complète d'observation de la Terre depuis l'orbite géostationnaire (voir la Fig. 1-3). Le lancement programmé de satellites météorologiques en remplacement ou en complément des satellites existants permettra d'assurer une couverture mondiale, permanente et durable, pour l'observation de la Terre depuis l'orbite géostationnaire.

2.2.1 La transmission des données brutes de capteurs d'images par satellite MetSat OSG

Les données brutes captées par les imageurs dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge et autres instruments placés à bord des satellites météorologiques OSG sont envoyées aux principales stations terriennes d'exploitation. La bande de fréquences utilisée pour cette liaison descendante est déterminée par la largeur de bande nécessaire pour recevoir la quantité de données générées par les instruments embarqués à bord d'un satellite MetSat OSG; cela peut aller des fréquences attribuées au service MetSat dans les bandes 1 670-1 698 MHz, 7 450-7 550 MHz et 8 025-8 400 MHz jusqu'à la bande 25,5-27 GHz. Ces données sont ensuite traitées au sol, et le contenu est rediffusé dans la bande 1 670-1 690 MHz et/ou distribué via d'autres moyens de télécommunication, tel que GEONETCast.

On trouvera dans la Fig. 2-2 des images types prises par des imageurs embarqués à bord de satellites météorologiques OSG.

FIGURE 2-2

Images types prises par des imageurs embarqués à bord de satellites météorologiques OSG



Système dépressionnaire au-dessus de la Californie GOES-18/ABI, 04/01/2023

La tempête Agnès centrée sur l'Europe MTG-11/FCI, 27/09/2023

Eruption sur l'Île Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Himawari-8/AHI, 15/01/2022

Meteo-02-02

En ce qui concerne les systèmes MetSat OSG de dernière/nouvelle génération, qui sont actuellement en cours de développement et qui devraient être déployés pendant la période 2024-2036, les débits et la largeur de bande associée nécessaires pour le transfert en liaison descendante des données depuis ces systèmes MetSat OSG seront nettement plus élevés (jusqu'à 1,2 Gbit/s). Cela amène à utiliser des fréquences supérieures, par exemple les bandes 7 450-7 550 MHz (transmission de données brutes pour les satellites Electro-L et FY-4), 8 025-8 400 MHz (GOES-R et GeoXO), 18,0-18,3 GHz (Région 2), 18,1-18,4 GHz (Régions 1 et 3) (satellites Himawari et FY-4), et surtout la bande 25,5-27 GHz (acquisition principale de données (MDA) pour les satellites Meteosat de troisième génération (MTG) et les satellites FY-4).

Les stations terriennes de ce type, peu nombreuses dans le monde, sont installées sur un à trois sites pour chaque système à satellites. Une antenne est prévue pour chaque satellite de la flotte opérationnelle. On compte donc au total environ 50 à 60 stations primaires au sol exploitées par les exploitants des satellites MetSat OSG. Munies d'antennes de 6 à 18 m de diamètre (selon la bande de fréquences utilisée), elles fonctionnent généralement avec un angle d'élévation d'au moins 3 degrés.

2.2.2 La distribution des données MetSat OSG

Les § 2.2.2.1 à 2.2.2.5 suivants décrivent les fonctions de distribution directe des systèmes MetSat OSG utilisés dans le cadre du système WIGOS.

2.2.2.1 Le service S-VISSR

Le service étendu de radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge (S-VISSR, *stretched visible infrared spin scan radiometer*) est assuré par les satellites de la série Feng-Yun-2 (FY-2) du système MetSat OSG chinois.

Les données relevées par les capteurs du VISSR sont transmises vers les stations principales au sol de ce système MetSat OSG chinois. Elles y sont prétraitées en temps quasi réel puis retransmises via le même satellite à un débit moins élevé (étendu). Les données sont reçues par les stations terriennes du service S-VISSR, aussi appelées stations moyennes d'utilisation des données (MDUS, *medium-scale data utilization stations*). Plus d'une centaine de stations de ce genre fonctionnent actuellement. Les principaux usagers en sont les services météorologiques et les universités.

Les transmissions S-VISSR se font dans la sous-bande 1 683-1 690 MHz, sur la fréquence centrale de 1 687,5 MHz, à un débit de 660 kbit/s, dans une largeur de bande de 2 MHz. Les stations de réception présentent un facteur de qualité de 12 dB/K et leurs antennes ont un diamètre d'environ 3 m et un angle d'élévation d'au moins 5 degrés.

2.2.2.2 Variable des satellites géostationnaires opérationnels d'étude de l'environnement (GOES) (GVAR)

En septembre 2025, les satellites géostationnaires opérationnels d'étude de l'environnement des États-Unis d'Amérique (GOES) se composent des derniers engins spatiaux de la série GOES-R (GOES-16, 17, 18 et 19), les anciens engins spatiaux GOES NOP (GOES-13, 14 et 15) ayant été mis hors service par l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA). Le service GOES ReBroadcast (GRB) de la série GOES-R à 1 686,6 MHz remplace l'ancien service GOES Variable (GVAR), et nécessite une plus grande largeur de bande pour pouvoir prendre en charge un débit beaucoup plus élevé, de l'ordre de 30 Mbit/s, contre environ 2 Mbit/s pour le service GVAR. Ce dernier fonctionnait à 1 685,7 MHz et nécessitait une largeur de bande de 4,22 MHz, tandis que le service GRB a besoin de 9,7 ou 10,9 MHz pour transmettre les données traitées et fonctionner à 1 686,6 MHz. Celui-ci transmet l'ensemble complet de produits de niveau 1b, y compris des données obtenues par tous les instruments de la série GOES-R, de façon hémisphérique (jusqu'à un angle d'élévation de 5 degrés) depuis les positions équatoriales de 75° O et 137° O des engins spatiaux de la série GOES-R. Tout comme le service GVAR, ces diffusions atteignent un grand nombre de stations de réception situées à l'intérieur de l'empreinte, combinée, des engins spatiaux de la série GOES-R. Ces stations se trouvent en Amérique du Nord et du Sud, mais aussi en Nouvelle-Zélande, en France, en Espagne et en Grande-Bretagne. Les observations sont destinées avant tout aux universités et aux organismes d'État qui effectuent des recherches et élaborent des prévisions météorologiques. Parmi les autres bénéficiaires figurent des sociétés qui fournissent à des intérêts privés des prévisions à valeur ajoutée.

2.2.2.3 Le service WEFAX

Le service de fac-similé météorologique (WEFAX, *weather facsimile*) analogique, qui est toujours assuré sur certains satellites MetSat OSG, est actuellement remplacé par le service numérique de transmission d'informations à faible débit (LRIT, *low rate information transmission*) sur la deuxième génération de satellites météorologiques. Le service WEFAX assure des transmissions analogiques vers des stations d'utilisateur peu coûteuses situées à l'intérieur de la zone de réception des satellites météorologiques. C'est le Groupe de coordination des satellites météorologiques (CGMS), un forum pour l'échange d'informations techniques sur les systèmes embarqués à bord des satellites météorologiques géostationnaires ou en orbite polaire, qui a défini les paramètres de ce service.

Le service WEFAX assuré sur les satellites GOES-13, GOES-14 et GOES-15 (mis hors service entretemps) à 1 691 MHz (586 kHz) était combiné avec le service LRIT et le service EMWIN (*emergency managers weather information network*) fonctionnant à 1 692,7 MHz (27 kHz) pour former un seul service en liaison descendante appelé service HRIT/EMWIN, le service LRIT étant remplacé par le service HRIT. Ce service combiné assure des transmissions à 1 694,1 MHz en disposant d'une largeur de bande de 1,21 MHz. La transmission en liaison descendante des données collectées par les capteurs ne se fera plus, comme c'était le cas, à 1 676 MHz, mais à 8 220 MHz dans la bande X (8 025-8 400 MHz) du SETS afin de pouvoir prendre en charge les débits nettement supérieurs des capteurs évolués embarqués à bord de l'engin spatial GOES-R.

Très peu de stations de réception WEFAX restent exploitées dans les services météorologiques et dans d'autres entités telles que les universités, les organismes environnementaux, les agences de presse, les écoles, etc.

Les transmissions se font dans la sous-bande 1. Les services WEFAX qui sont encore assurés utilisent une fréquence centrale de 1 691 MHz et une largeur de bande de 0,03 à 0,26 MHz. Les stations de réception WEFAX types fonctionnent avec un angle d'élévation supérieur à 3 degrés, sont dotées d'antennes de 1,2 m de diamètre et présentent un facteur de qualité G/T de 2,5 dB/K. Les services WEFAX transmettent des secteurs d'images satellitaires, des produits météorologiques sous forme graphique, des images test et des messages administratifs contenant des informations alphanumériques sous forme graphique.

2.2.2.4 Le service LRIT

Le service de transmission d'informations à faible débit (LRIT, *low rate information transmission*) a été lancé en 2003 sur les satellites météorologiques géostationnaires GOES à destination de stations d'utilisateur peu coûteuses, afin de remplacer le service WEFAX assuré sur d'autres satellites MetSat OSG et de desservir à peu près la même communauté d'utilisateurs.

Les transmissions se font dans la sous-bande 1 690-1 698 MHz, avec des fréquences centrales aux alentours de 1 691 MHz. La largeur de bande peut atteindre 660 kHz. Les antennes des stations d'utilisateur, dont le diamètre est compris entre 0,6 m et 1,8 m, fonctionnent avec un angle d'élévation d'au moins 3 degrés. Le facteur de qualité des stations d'utilisateur va de 3 à 6 dB/K, selon l'emplacement de la station. Le service LRIT est opérationnel sur un grand nombre de systèmes MetSat, à savoir les satellites GOES, les satellites Meteosat de deuxième génération, le satellite GEO-KOMPSAT-2A, les satellites Himawari, les satellites Electro-L et les satellites de la série FY-4 conjointement avec un bulletin d'alerte météo en cas d'urgence (EWAIB, *emergency weather alarm information broadcast*).

2.2.2.5 Le service HRIT

Le service de transmission d'informations à haut débit (HRIT, *high rate information transmission*), lancé en janvier 2004 sur le premier satellite Meteosat de deuxième génération (Meteosat-8), est opérationnel sur un grand nombre de systèmes MetSat, à savoir les satellites Himawari, le satellite GEO-KOMPSAT-2A, les satellites Electro-L et les satellites de la série FY-4. En outre, les satellites de la série GOES à partir du satellite GOES-R assurent un service HRIT/EMWIN.

Le service HRIT fonctionne dans les sous-bandes 1 675-1 687 MHz, 1 684-1 690 MHz ou 1 690-1 698 MHz. Les stations HRUS (*high rate user station*) et MDUS sont équipées d'antennes d'un diamètre compris entre 4 et 7 m et l'angle d'élévation est d'au moins 3 degrés (5 degrés pour les satellites GOES) environ. Le facteur de qualité des stations d'utilisateur va de 12 à 14 dB/K, selon l'emplacement de la station.

Le CGMS a publié courant 2013 une nouvelle spécification sur la radiodiffusion directe dans le monde (GEO HRIT/LRIT). Dans cette spécification, qui s'applique aux systèmes GEO existants ou en projet, les caractéristiques des stations d'utilisateur ne sont toutefois pas spécifiées. Le CGMS poursuit ses travaux afin de déterminer si une nouvelle mise à jour de cette spécification est nécessaire, compte tenu des normes nouvellement adoptées et utilisées sur les télécommunications et les formats de fichier.

2.2.3 Les systèmes DCS MetSat OSG

Les satellites météorologiques recueillent les données sur le temps et sur l'environnement provenant de plates-formes distantes. Les transmissions, de chaque PCD vers un satellite météorologique, se font dans la bande 401-403 MHz. Les PCD sont exploitées en mode séquentiel. La transmission se fait normalement par tranches d'une minute. Le débit est de 100 bits/s. Des débits plus élevés (300 et 1 200 bits/s) sont exploités depuis 2003 et ont augmenté rapidement ces derniers temps. Les largeurs de bandes de canal utilisées sont de 0,7510 kHz pour un débit de 300 bits/s et de 2,2510 kHz pour un débit de 1 200 bit/s.

Il existe plusieurs types d'émetteurs PCD: ceux de 5, 10 et 20 W de puissance avec antenne directive et ceux de 40 W avec antenne équidirective. La puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) en liaison montante va de 40 à 52 dBm. Des systèmes de collecte de données sont actuellement exploités sur divers systèmes à satellites météorologiques géostationnaires.

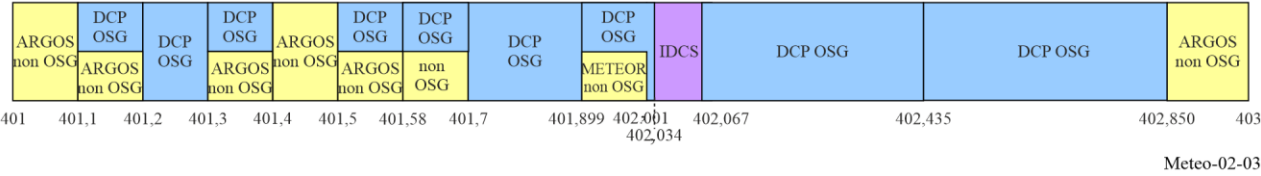
Pour les transmissions vers les satellites météorologiques géostationnaires, les PCD utilisent des fréquences situées entre 401,1 et 402,85 MHz, avec 402,0355-402,0655 MHz pour l'international (11 canaux (I12 à I22) de 3 kHz de largeur). L'emploi de bandes étroites (0,75 kHz dans certains cas) et la réduction des délais de transmission à environ 10 secondes permettent de recevoir des données en provenance d'un grand nombre de plates-formes. Concernant les satellites de la série GOES-R par exemple, on comptait en 2024 environ 30 000 PCD à haut débit opérationnelles, qui ont envoyé jusqu'à 1 000 000 de messages par jour et qui ont fourni chaque jour plus de 6 millions d'observations au système WIGOS. L'assistance aux utilisateurs des systèmes DCS reste constante, voire progresse. Les futurs satellites météorologiques géostationnaires devraient comporter des systèmes DCS, à l'image de la constellation GeoXO qui sera lancée dans les années 2030, et qui garantira ainsi un appui spécifique aux systèmes DCS jusque dans les années 2050.

2.2.3.1 Division générale de base et conditions de partage applicables à la bande 401-403 MHz

En raison de l'augmentation des besoins de spectre pour les systèmes DCS à bord des satellites, géostationnaires et non géostationnaires, du service MetSat et du SETS, tous les opérateurs sont tenus de respecter une division générale de base de la bande 401-403 MHz pour les systèmes DCS actuels et futurs (voir la Fig. 2-3) ainsi que les conditions de partage indiquées dans la Recommandation UIT-R SA.2045.

FIGURE 2-3

Division générale de base de la bande 401-403 MHz en vue de l'utilisation coordonnée à long terme de systèmes DCS à bord de systèmes à satellites géostationnaires et non géostationnaires du service MetSat et du SETS



2.3 Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites non OSG

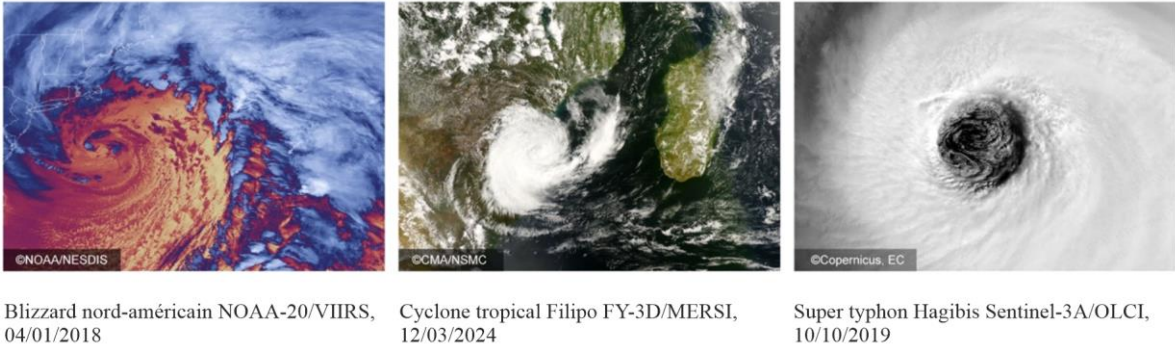
Outre les nombreux satellites MetSat OSG, le système WIGOS exploite également des satellites MetSat non OSG, principalement en orbite polaire héliosynchrone, mais aussi des systèmes à satellites en orbite fortement elliptique, pour recueillir les données de mesure des capteurs passifs et actifs dans le visible, l'infrarouge et les hyperfréquences avec la plus large couverture possible.

L'exploitation actuelle et future de satellites par de nombreuses organisations météorologiques nationales et régionales assure la couverture mondiale, permanente et durable, requise pour l'observation de la Terre depuis l'orbite non géostationnaire (voir la Fig. 1-3).

On trouvera dans la Fig. 2-4 des images types prises par des instruments d'imagerie embarqués à bord d'un système MetSat non OSG opérationnel dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge. Des exemples de capteurs passifs et actifs à hyperfréquences embarqués à bord de systèmes MetSat non OSG sont fournis dans le Chapitre 5.

FIGURE 2-4

Images types prises par des instruments d'imagerie embarqués à bord de systèmes MetSat non OSG



Meteo-02-04

2.3.1 La transmission des données brutes d'instruments MetSat non OSG

Les données brutes des satellites météorologiques non géostationnaires opérationnels actuellement, qui sont pour la plupart en orbite polaire, de quelques satellites en orbite circulaire non héliosynchrone avec une inclinaison de 35, 50 ou 66 degrés par rapport à l'équateur, et des satellites en orbite fortement elliptique, sont transmises dans la bande de fréquences 7 750-7 900 MHz ou 8 025- 8 400 MHz, en fonction de la largeur de

bande requise, vers les stations principales dédiées établies pour l'essentiel aux hautes latitudes. Les transmissions se font par salves lorsque chaque satellite passe au-dessus de sa station de réception, les émetteurs étant arrêtés le reste du temps. Dans le cas des satellites en orbite fortement elliptique de la série Arctica-M, la transmission est semblable à celle d'un satellite géostationnaire et est effectuée toutes les 30/15 minutes pendant la période où chacun des satellites est visible depuis la station primaire au sol.

2.3.1.1 La transmission des données brutes d'instruments MetSat non OSG dans la bande 25,5-27 GHz

Certains futurs systèmes MetSat non OSG (par exemple, le système à satellites en orbite polaire EUMETSAT de deuxième génération (EPS-SG) avec ses satellites Metop-SG et les satellites du système commun à satellites en orbite polaire (JPSS)) et les futurs satellites FY-5 devront utiliser des bandes de fréquences encore plus élevées que celles utilisées par les satellites opérationnels actuellement, c'est-à-dire la bande 25,5-27 GHz, pour pouvoir assurer des transmissions à des débits de données nettement plus élevés, jusqu'à 800 Mbit/s, à leurs stations de réception au sol, sur une liaison appelée liaison descendante SMD (*stored mission data*). D'autres systèmes continueront d'utiliser la bande de fréquences 7 750-7 900 MHz ou 8 025-8 400 MHz (par exemple, les satellites JPSS, Suomi-NPP, Metop, FY-3, METEOR-M et Arctica-M actuels).

2.3.2 La distribution des données MetSat non OSG

Les § 2.3.2.1 et 2.3.2.2 décrivent les fonctions de distribution directe, appelées «lecture directe», des systèmes MetSat non OSG utilisés dans le cadre du système WIGOS. Cette lecture directe vise à améliorer le temps de latence des données en transmettant un sous-ensemble des données obtenues par les instruments directement auprès du satellite météorologique vers les stations d'utilisateur lorsque le satellite est visible depuis une telle station pouvant être localisée n'importe où.

2.3.2.1 La distribution des données MetSat non OSG dans la bande 1 698-1 710 MHz

2.3.2.1.1 Le service APT

Le service de transmission automatique d'images (APT, *automatic picture transmission*), lancé dès les années 1960 sur certains engins spatiaux, est devenu le service de distribution directe de données le plus employé par le secteur de la météorologie. Des milliers de stations de réception APT sont exploitées partout dans le monde. Très bon marché, elles sont utilisées par les services météorologiques et par les universités, mais aussi par une foule d'autres usagers.

La plupart des stations APT sont dotées d'antennes équidirectives et de récepteurs à ondes métriques de série. Des systèmes de traitement d'image peu coûteux sont rattachés à ces étages d'entrée, complétés par des logiciels bon marché fonctionnant sur des ordinateurs de bureau ordinaires. Le service APT est opérationnel sur les satellites NOAA.

2.3.2.1.2 Le service LRPT

Le service de transmission d'images à faible résolution (LRPT, *low resolution picture transmission*) était censé remplacer l'application APT sur la plupart des systèmes MetSat non OSG. Toutefois, il n'a été mis en œuvre et n'est opérationnel que sur les satellites de la série METEOR-M. Basé sur la transmission numérique, il fonctionne à 137,1 MHz et 137,9 MHz avec une largeur de bande du signal pouvant atteindre 150 kHz.

2.3.2.1.3 Le service HRPT

Le Groupe de coordination des satellites météorologiques (CGMS) a publié en 2014 une version révisée de la spécification sur la radiodiffusion directe dans le monde (*LEO Direct Readout* (HRPT/AHRPT)). Dans cette spécification, qui s'applique aux systèmes MetSat non OSG utilisant la bande 1 698-1 710 MHz pour la diffusion des données, le service de transmission d'images à haute résolution (HRPT, *high resolution picture transmission*) est destiné à la météorologie. Les émetteurs HRPT sont activés en permanence. Leur signal peut être reçu par n'importe quelle station d'utilisateur. Les données HRPT sont indispensables au fonctionnement des services météorologiques et sont également extrêmement utiles dans d'autres secteurs.

Dans le service HRPT, par exemple sur les satellites NOAA (1 698/1 702,5/1 707 MHz), les transmissions se font dans la bande de fréquences 1 698-1 710 MHz, avec des largeurs de bande de 2,7 MHz à 4,5 MHz. Les stations d'utilisateur sont munies d'antennes de poursuite paraboliques d'un diamètre de 2,4 m à 3 m en général. L'angle d'élévation minimal recommandé est de 5 degrés, bien que certaines stations fonctionnent avec un angle d'élévation inférieur. Le facteur de qualité est de 5 dB/K. Il existe d'autres systèmes HRPT fonctionnant à un débit de données environ deux fois plus élevé que celui des systèmes HRPT d'origine.

En outre, une application HRPT évoluée (AHRPT, *advanced HRPT*) est assurée sur certains des satellites météorologiques opérationnels, à savoir les satellites des séries METEOR-M (1 700/1 705 MHz), Metop (1 701,3/1 707 MHz) et FY-3 (1 701,3 MHz, 1 704,5 MHz ou 1 706,7 MHz). Les transmissions AHRPT utilisent la même bande que les autres systèmes HRPT. La largeur de bande est comprise entre 4,5 et 6,8 MHz. Les stations de réception utilisent un angle d'élévation d'au moins 5 degrés. Les antennes, du type parabolique, ont un diamètre de 2,4 m à 3 m. Le facteur de qualité G/T des stations AHRPT est d'environ 6,5 dB/K.

2.3.2.2 La distribution des données MetSat non OSG dans la bande 7 750-7 900 MHz

Les données ayant tendance à être plus nombreuses et de plus haute résolution, il est également nécessaire d'utiliser des bandes de fréquences plus élevées pour la distribution directe des données collectées aux stations d'utilisateur. En effet, les besoins de largeur de bande pour ces données à haute résolution ne peuvent être satisfaits dans la bande 1 698-1 710 MHz. Il faut donc utiliser, parmi les bandes de fréquences disponibles attribuées au service MetSat dans le sens espace vers Terre, celle qui est immédiatement supérieure, à savoir la bande 7 750-7 900 MHz. Dans cette bande, les besoins de largeur de bande des systèmes MetSat non OSG de nouvelle génération, qui vont de 30 à 150 MHz pour les différentes liaisons descendantes (MPT (FY-3), données à haute résolution (HRD) (Suomi-NPP et JPSS) et radiodiffusion directe de données (DDB) (Metop-SG)), peuvent être satisfaits.

Le service de transmission d'images à moyenne résolution (MPT) transmet un ensemble complet de données de mesure des instruments MERSI embarqués à bord des satellites de la série FY-3. Les transmissions se font actuellement à un débit de 45 Mbit/s dans une largeur de bande de 60 MHz centrée à 7 780 ou 7 820 MHz, où la transmission s'effectue à un débit de 77 Mbit/s dans une largeur de bande de 80 MHz centrée à 7 790 ou 7 860 MHz. De plus, les satellites FY-3 assurent un service de transmission d'images en différé (DPT), qui permet de transférer des données à 8 212,5 MHz avec une largeur de bande de 375 MHz à un débit de 455 Mbit/s. Le service HRD transmet un ensemble de données pleine résolution des satellites Suomi-NPP et de la série JPSS à un débit allant jusqu'à 15 Mbits/s (largeur de bande de 30 MHz) avec une fréquence centrale à 7 812 MHz. Le service DDB sur les satellites Metop de deuxième génération (Metop-SG) assurera des transmissions à 7 825 MHz avec une largeur de bande de 150 MHz.

2.3.3 Les systèmes DCS MetSat non OSG

Les systèmes DCS des satellites MetSat non OSG fournissent diverses informations utiles aux organismes d'État mais aussi aux sociétés privées.

Parmi ces données figurent des paramètres sur les océans, les rivières, les lacs, les terres et l'atmosphère liés à des processus physiques, chimiques et biologiques, ainsi que des données sur le pistage des animaux. Toutefois, les utilisations par le secteur privé sont limitées. On peut citer, par exemple, la surveillance de l'état des oléoducs dans le but de protéger l'environnement ou la sécurité en mer. Certains émetteurs sont également déployés pour alerter et informer sur les situations d'urgence et aident à déceler les dangers ou les catastrophes. Le système Argos et le système brésilien DCS font partie des systèmes DCS embarqués à bord de satellites météorologiques OSG. Le système Argos de troisième génération (Argos-3) est déjà opérationnel sur les satellites de la série Metop, le satellite NOAA et un satellite SARAL.

Ces satellites NOAA, Metop et SARAL suivent une orbite polaire à 850 km d'altitude: ils passent au-dessus des pôles Nord et Sud à chaque révolution. Les plans d'orbite tournent autour de l'axe des pôles à la même vitesse que la Terre tourne autour du Soleil. Chaque satellite voit simultanément et en permanence toutes les balises situées dans un cercle d'environ 5 000 km de diamètre. À mesure que le satellite se déplace, la trace au sol de ce cercle forme une bande de 5 000 km de large qui fait le tour de la Terre en passant par les pôles Nord et Sud.

Actuellement, le système Argos fonctionne dans la bande 401,579-401,690 MHz, même si des milliers de plates-formes (dites stations émettrices de plates-formes) n'ont besoin que de quelques kHz. Il est possible de recevoir les observations de nombreuses plates-formes Argos étant donné la nature de l'orbite de ces satellites. On compte environ 22 000 plates-formes en service. Chaque plate-forme a un numéro d'identification qui lui est propre et qui dépend de son système électronique de transmission.

La durée de transmission de chaque message est inférieure à une seconde. Le système Argos-3 assure de nouveaux services de collecte de données offrant des débits élevés de transfert de données (4 800 bit/s) et des fonctions d'interrogation de plate-forme. En fonction du débit, la puissance de sortie d'une plate-forme varie de -3 dBW à 7 dBW.

La plate-forme, appelée PMT (*platform messaging transceiver*), est interrogée par les satellites dans la bande 460-470 MHz et la fréquence utilisée est actuellement de 465,9 MHz.

Concernant le système Argos de quatrième génération (Argos-4), il faudra probablement prévoir une capacité et une largeur de bande nettement supérieures et utiliser d'autres bandes de fréquences, comme indiqué dans la Fig. 2-3. En outre, le nouveau système Argos-4 mettra en œuvre une liaison descendante dans la bande de fréquences 464,98775-466,98775 MHz et utilisera un accès multiple à étalement du spectre afin de ne pas causer de brouillages aux utilisateurs terrestres.

Le système brésilien DCS est basé sur les satellites SCD (en orbite inclinée à 25 degrés) et CBERS fonctionnant dans la bande 401,605-401,665 MHz pour la réception des données provenant des plates-formes de collecte de données. En raison de la compatibilité du système brésilien DCS avec le système Argos et des satellites en orbite complémentaires, les deux systèmes s'échangent des données depuis 2001.

Les systèmes DCS sont également exploités sur les satellites météorologiques en orbite fortement elliptique de la série Arctica-M pour la collecte de données météorologiques et d'autres données environnementales auprès de plates-formes DCP distantes. Les transmissions depuis une plate-forme DCP vers un satellite Arctica-M s'effectuent dans la bande de fréquences 401-403 MHz.

2.4 Les autres systèmes de distribution de données

En parallèle des mécanismes traditionnels de distribution de données embarqués à bord des systèmes MetSat OSG et non OSG a été mis en place un nouveau système, baptisé GEONETCast (voir la Fig. 2-5), un projet d'envergure du Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (GEOSS, *global earth observation system of systems*), coordonné par le Groupe intergouvernemental sur l'observation de la Terre (GEO) visant à développer, sur la base de l'infrastructure de télécommunication commerciale mondiale existante, un système mondial de collecte et de distribution de données sur l'observation de la Terre, opérationnel de bout en bout, dans les bandes C (3 800-4 200 MHz) et Ku (10 700-11 700 MHz).

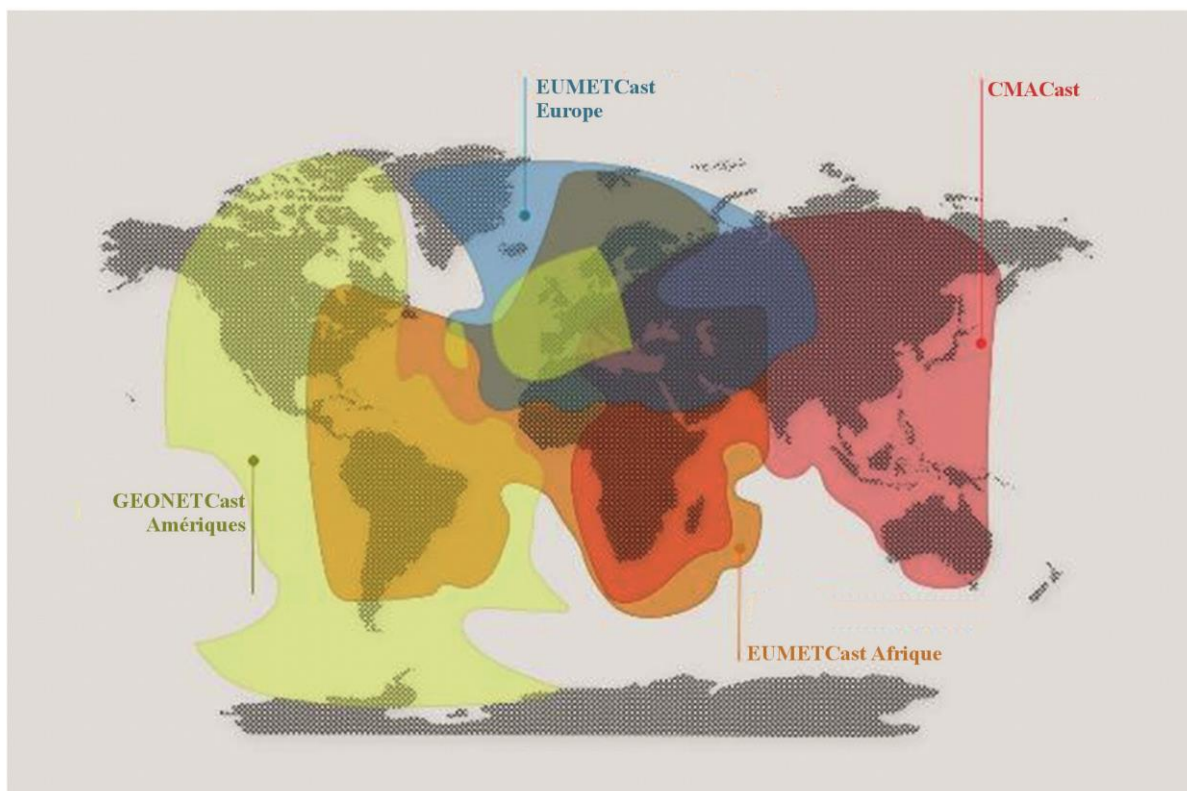
Le système GEONETCast exploitera la fonctionnalité de multidiffusion d'un réseau mondial de satellites de communication pour diffuser à l'échelle mondiale des informations relatives aux conditions météorologiques, à l'eau et au climat, y compris des alertes en cas de catastrophe aux agences météorologiques et aux communautés d'utilisateurs. Dans ce contexte, l'utilisation des satellites dans la bande C est particulièrement importante là où les conditions de propagation (fortes pluies dans les zones tropicales et équatoriales, par exemple) rendent impossible l'utilisation de tout autre moyen de télécommunication. Pour cela, plusieurs centres régionaux sont chargés d'établir et de maintenir un système de distribution régional par satellite, basé sur la technologie de la radiodiffusion vidéo numérique (DVB), et de fournir des services complémentaires à une communauté d'utilisateurs.

Parmi les partenaires actuels figurent la China Meteorological Administration (CMA), l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ainsi que de nombreux fournisseurs tiers de données.

La couverture mondiale est assurée grâce à l'intégration du système CMACast, couvrant la région Asie-Pacifique et une partie de l'Afrique, la composante GEONETCast Amériques, couvrant les Amériques, et le système EUMETCast, couvrant l'Europe, l'Afrique et une partie des Amériques.

FIGURE 2-5

Couverture mondiale du système GEONETCast



Meteo-02-05

CHAPITRE 3

Le Service des auxiliaires de la météorologie

3.1 Introduction

Le service des auxiliaires de la météorologie (MetAids) est défini de la manière suivante au numéro **1.50** du Règlement des radiocommunications (RR): «Service de radiocommunication destiné aux observations et aux sondages utilisés pour la météorologie, y compris l'hydrologie». Le présent chapitre traite uniquement des observations *in situ* en altitude, les autres applications du service MetAids étant traitées aux Chapitres 6 et 7 du présent Manuel.

Concrètement, le service MetAids assure la liaison entre un système de détection *in situ* pour les variables météorologiques et une station de base éloignée. Le système de détection peut être emporté par un ballon ou descendre en parachute dans l'atmosphère après avoir été largué d'un aéronef. La station de base mobile peut être fixe ou montée sur une plate-forme mobile (par exemple, à bord d'un navire ou d'un aéronef de recherche). La grande majorité de ces systèmes de détection *in situ* sont des radiosondes, dont la plupart sont lancées régulièrement à partir d'emplacements fixes ou de plates-formes mobiles, au moins à 0000 et 1200 UTC, formant le réseau mondial en altitude du système WIGOS (OMM-N° 1160).

Les mesures en altitude sont décrites aux Chapitres 12 et 13 du Guide des instruments et des méthodes d'observation (OMM-N° 8), Volume I – Mesure des variables météorologiques.

3.1.1 Les bandes de fréquences

Le Tableau 3-1⁴ indique les bandes de fréquences attribuées, conformément au Règlement des radiocommunications (RR), au service MetAids (outre celles régies par les renvois relatifs à des pays) en vue d'être utilisées par les applications/systèmes des auxiliaires de la météorologie.

TABLEAU 3-1

Bandes de fréquences attribuées au service MetAids conformément au Règlement des radiocommunications de l'UIT

Bandes de fréquences
8,3-9 kHz
9-11,3 kHz
27,5-28 MHz*
400,15-401 MHz
401-402 MHz
402-403 MHz
403-406 MHz
1 668,4-1 670 MHz
1 670-1 675 MHz
1 675-1 690 MHz
1 690-1 700 MHz
35,2-36 GHz

* Aucune information concernant l'utilisation existante ou prévue de cette bande de fréquences n'a été trouvée dans la documentation de l'UIT-R ou de l'OMM.

⁴ Pour connaître les attributions de fréquences actuelles dans ces bandes, consultez l'Article 5 du RR.

D'autres services bénéficient également d'attributions à titre primaire dans ces bandes, ce qui est synonyme de contraintes importantes pour les systèmes exploités dans le cadre des attributions au service MetAids. Le partage dans le même canal est rarement possible car la plupart des systèmes MetAids recourent à des transmissions de faible puissance sur une portée assez grande. Le partage se fait donc surtout par segmentation, ce qui peut être organisé à l'échelle internationale, sous les auspices de l'OMM, avec d'autres systèmes météorologiques ou à l'échelle nationale avec les systèmes d'autres domaines.

Les détails opérationnels des systèmes de radiosonde utilisés à chaque station d'observation échangeant des données au niveau international sont/seront disponibles dans la base de données OSCAR/Surface (<https://oscar.wmo.int/surface/>), le répertoire des métadonnées du système WIGOS. Il s'agit d'une base de données en ligne décrivant les caractéristiques détaillées des instruments de mesure. Les membres de l'OMM exploitant les stations sont responsables de la saisie de ces informations détaillées et de leur mise à jour.

Parmi les autres usagers du service MetAids figurent:

- les organismes environnementaux;
- les organismes de secours en cas de catastrophe;
- les universités et les équipes de chercheurs en météorologie;
- les services de la défense;
- les opérateurs de services de lancement spatial.

Bon nombre des systèmes MetAids ne relevant pas de l'OMM sont en général exploités séparément des activités courantes menées par les services météorologiques nationaux. Ils peuvent donc ne pas être enregistrés dans la base de données OSCAR/Surface. Ces systèmes sont montés sur des plates-formes mobiles et peuvent être déployés à des emplacements très variables pendant leur utilisation. Le fonctionnement de ces systèmes additionnels doit être réglementé afin d'éviter tout brouillage avec les radiosondes exploitées par les services nationaux de météorologie. Cette réglementation est élaborée et mise en œuvre conjointement par les autorités nationales de radiocommunication et les services nationaux de météorologie.

Certains pays évitent le partage dans le même canal entre les différents groupes d'exploitants de radiosondes en établissant des plans de canaux précis. Mais beaucoup s'en tiennent à une approche pragmatique. Avant de lancer une radiosonde, l'exploitant balaie le spectre disponible au moyen du récepteur de la station de base afin de savoir si un autre appareil est présent à proximité. On choisit ensuite la fréquence à employer afin que la radiosonde fonctionne correctement sans gêner les systèmes déjà en vol. Le spectre que peut utiliser un service MetAids national correspond souvent à une partie de la bande attribuée par le RR, étant donné les accords nationaux de partage avec d'autres services mentionnés plus haut.

Les radiosondes fonctionnent à des fréquences de 400,15 MHz à 406 MHz et 1 668,4 MHz à 1 700 MHz dans le réseau de l'OMM. Il sera question plus loin des raisons pour lesquelles on continue à utiliser deux bandes pour le service MetAids, après avoir examiné en détail les systèmes actuellement employés.

3.1.2 Les applications en météorologie du service MetAids

La météorologie d'exploitation a absolument besoin de mesures précises des profils verticaux de la température de l'air, de la pression, de l'humidité relative, de la vitesse et de la direction des vents en fonction de l'altitude. Ces valeurs sont essentielles pour les modèles numériques qui servent à établir des prévisions à plus longue échéance et pour les prévisions météorologiques allant des prévisions à très faible échéance (immédiates) aux prévisions (climatiques) à plus longue échéance. Elles sont également utilisées pour la surveillance du climat. Des mesures de la température et de l'humidité relative sont nécessaires pour les prévisions à court terme avec une résolution verticale d'au moins 100 m.

Le service MetAids est, depuis de nombreuses décennies, la principale source de données atmosphériques à haute résolution verticale. Ces relevés *in situ* sont également essentiels pour étalonner les instruments de télédétection spatiale, en particulier dans le cas des sondeurs passifs. Les mesures des constituants de l'atmosphère tels que l'ozone, les aérosols ou la radioactivité peuvent également être incluses.

Le service MetAids transmet les données résultant des mesures *in situ* des variables météorologiques, relevées à divers emplacements au-dessus de la surface, vers une station de base formée d'un récepteur et d'un système de traitement des données. À partir de la station de base, les données sont transmises aux réseaux de communication météorologiques, où elles sont intégrées aux données d'autres stations de réception. Il est important que le coût de l'émetteur et du bloc de détection soit le plus bas possible, sans pour autant que la qualité des mesures se dégrade, car on récupère rarement les systèmes MetAids.

Les systèmes MetAids actuellement déployés sont notamment les suivants:

Type	Description
Radiosonde	Instrument destiné à être transporté par un ballon dans l'atmosphère, équipé de dispositifs permettant de mesurer une ou plusieurs variables météorologiques (telles que la pression, la température ou l'humidité) et doté d'un émetteur radio pour envoyer ces informations à la station d'observation.
Sonde d'ozone	Petit instrument léger et compact emporté par ballon, conçu pour mesurer la distribution verticale de l'ozone atmosphérique jusqu'à une altitude d'environ 30-35 km.
Parasonde	Appareil parachuté d'un aéronef à haute altitude, qui renvoie généralement pendant 15 à 30 minutes environ des données à la station de réception située à bord de l'aéronef.
Sonde captive	Appareil, attaché à un ballon captif, qui transmet en retour en continu à partir de la couche limite de l'atmosphère le plus souvent.
Petit aéronef téléguidé RPV (véhicule piloté à distance, <i>remotely piloted vehicle</i>) ou système aérien sans pilote (UAS, <i>uncrewed aerial system</i>)	Appareil qui emporte un bloc de détection semblable à celui d'une radiosonde vers des zones isolées au-dessus de l'océan et qui transmet aussi en retour des informations sous forme de message météorologique standard.

Le Réseau d'observation de base mondial (GBON) récemment mis en place (pour de plus amples informations, voir OMM-N° 1165, Chapitre 11), associé à l'utilisation croissante de radiosondes pour les services environnementaux et de défense et à la nécessité accrue pour les services météorologiques nationaux de disposer de davantage de mesures *in situ* au-dessus des océans, devrait entraîner une augmentation importante de l'utilisation de nouveaux types de systèmes MetAids au cours des prochaines décennies pour répondre à ces besoins croissants.

3.2 Quelques systèmes de détection du service MetAids

3.2.1 Les radiosondes

Les mesures en altitude de la température, du vent et de l'humidité relative sont trois des mesures de base utilisées pour initialiser les analyses des modèles PNT pour les prévisions météorologiques opérationnelles. Les radiosondes fournissent la plupart des mesures *in situ* de la température et de l'humidité relative au-dessus des terres, tandis que les radiosondes lancées depuis des îles éloignées ou des navires peuvent assurer une couverture limitée mais importante au-dessus des océans.

Chaque jour, plus de 1 500 radiosondes sont lancées dans le réseau WIGOS (Fig. 3-1); environ 300 d'entre elles sont destinées à des mesures sur des sites du Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC. Les informations provenant de chaque radiosonde opérationnelle sont immédiatement utilisées par les services météorologiques nationaux pour étayer les prévisions locales. Ces informations sont également nécessaires pour les prévisions numériques du temps dans toutes les parties du monde, l'objectif étant de diffuser les rapports de messages achevés (en code météorologique normalisé) à tous les services météorologiques du monde entier dans un délai de trois heures. Les messages sont également archivés puis utilisés dans un large éventail de recherches scientifiques.

FIGURE 3-1

Disponibilité des observations de la Terre en altitude fournies par le système de surveillance de la qualité des données du système WIGOS



Meteo-03-01

En général, une radiosonde opérationnelle est élevée par un ballon météorologique (Fig. 3-2) jusqu'à une altitude de 35 km, à laquelle le ballon éclate. L'altitude à laquelle sont effectuées les observations régulières dépend de l'application prévue et de l'emplacement géographique et, dans un grand nombre de pays, elle est limitée par le coût des ballons et du gaz nécessaire pour les faire s'élever. C'est pourquoi de nombreuses observations dans le monde ne sont pas effectuées à des altitudes supérieures à 25 km environ. Les prévisions à l'échelle du globe doivent tenir compte des flux des masses d'air dans les couches supérieures, mais la précision n'a pas à être aussi grande que près de la surface. Toutefois, la surveillance du climat et les travaux scientifiques connexes exigent des mesures à haute résolution dans les couches les plus hautes possibles.

FIGURE 3-2

Lancement d'une radiosonde

Meteo-03-02

Les sites de station de base utilisés pour le lancement des radiosondes sont généralement équipés de manière à pouvoir lancer des ballons par tous les temps. Les sites les plus importants sont dotés d'installations et d'alimentations de secours afin que les mesures se poursuivent même si l'infrastructure locale est endommagée par des phénomènes météorologiques extrêmes ou par d'autres événements particuliers, tels qu'un accident industriel.

Les ballons transportant les radiosondes sont conçus pour offrir des performances optimales lors d'une ascension à environ 300 m/min. Ils se déplacent avec les vents de la haute atmosphère et peuvent parcourir parfois en montée plus de 250 km par rapport au site de lancement et 150 km supplémentaires en descente. On estime que les données collectées pendant la descente peuvent également être utiles. Les mesures des radiosondes sont transmises vers une station de base située sur le site de lancement du ballon pendant une période pouvant aller jusqu'à trois heures. Tout problème de réception en début de vol, ne serait-ce que pendant 10 secondes, compromet la capacité de déterminer les variations de température et d'humidité relative près du sol, dont on a besoin pour établir les prévisions locales. L'absence de données pendant quatre ou cinq minutes, même si elle est simplement due à une mauvaise réception du signal de navigation pour la mesure des vents, ou à un arrêt avant l'altitude cible définie par l'opérateur ayant lancé la radiosonde, oblige souvent à lancer une deuxième radiosonde afin de satisfaire les exigences d'exploitation.

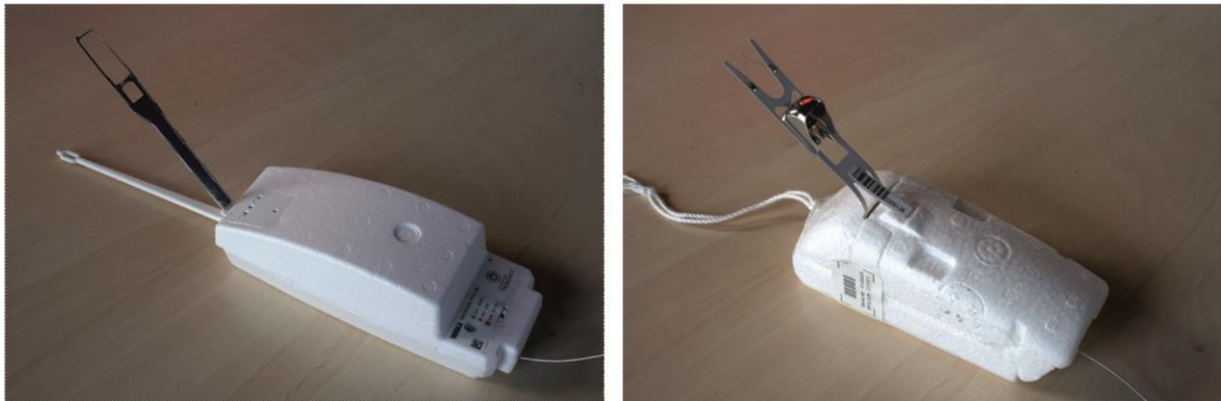
La puissance de transmission est toujours faible à cause des piles. Les radiosondes utilisent généralement des piles au lithium ou des piles alcalines qui doivent résister aux très basses températures du vol mais qui ne doivent pas menacer l'environnement ou la sécurité lors de leur chute après l'éclatement du ballon.

Une radiosonde classique (voir Fig. 3-3) renferme plusieurs éléments: un émetteur, une pile, un bloc de détection et, en général, un récepteur d'aide à la navigation NAVAID/GNSS (par exemple GPS). L'émetteur envoie les données à la station de réception. Le bloc de détection contient les capteurs qui mesurent une ou plusieurs variables atmosphériques, par exemple la température, le vent, l'humidité relative et la pression. Dans certains cas, les blocs de détection peuvent contenir des capteurs permettant de mesurer l'ozone (sondes d'ozone). Les valeurs relevées sont codées afin de pouvoir être transmises au sol.

Pour mesurer les vents, les radiosondes s'appuient sur un système de poursuite du mouvement de leur ballon dans l'atmosphère. Les systèmes de poursuite actifs utilisent un radar primaire (poursuite d'un réflecteur fixé sous le ballon) ou secondaire (poursuite d'un transpondeur intégré dans la radiosonde). Les systèmes de poursuite passifs utilisent des récepteurs NAVD/GNSS sur la charge utile et transmettent les données à la station au sol, ou des radiothéodolites.

FIGURE 3-3

Exemples de radiosonde



Photos extraites du Rapport N° 143 sur les instruments et les méthodes d'observation

Meteo-03-03

3.2.2 Les parasondes

Les parasondes ont des composants semblables à ceux des radiosondes, mais sont conçues pour être parachutées d'un aéronef afin d'établir les profils de l'atmosphère pendant leur descente (Fig. 3-4). Toutes les parasondes fonctionnent dans la bande 401-406 MHz et mesurent les vents par les signaux NAVD/GNSS. La densité spatiale et temporelle de leur déploiement en exploitation dans des zones limitées et ciblées est beaucoup plus grande que celle des radiosondes. Les parasondes servent surtout à suivre et à établir le profil des tempêtes tropicales en mer. On peut lâcher et suivre simultanément plusieurs appareils. Cela exige des émetteurs de grande stabilité à bande étroite, comme dans la partie la plus dense du réseau de radiosondage. Les parasondes servent également à établir le profil de phénomènes météorologiques ou de l'état de base de l'atmosphère dans des zones océaniques reculées, et parfois sur la terre ferme.

FIGURE 3-4

Parasonde

Meteo-03-04

3.3 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids

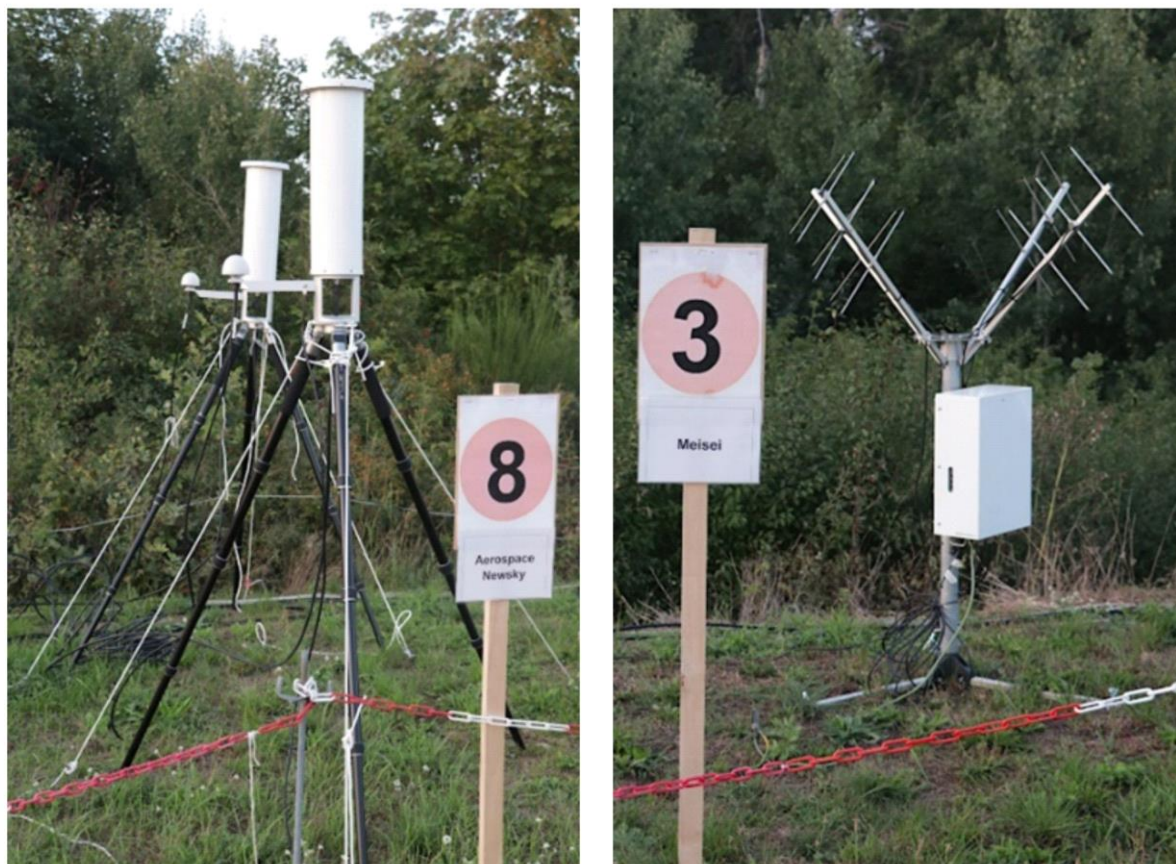
Les systèmes du service des auxiliaires de la météorologie comprennent plusieurs éléments de base dont, au sol, un ensemble antenne-récepteur et une installation de traitement des signaux. La Recommandation UIT-R RS.1165 – Caractéristiques techniques et critères de qualité de fonctionnement des radiosondes utilisées dans le service des auxiliaires de la météorologie dans les bandes à 403 MHz et 1 680 MHz, décrit les différents types de systèmes actuellement employés, avec leurs caractéristiques techniques.

3.3.1 Antenne-récepteur au sol

Les radiosondes et les parasondes utilisent une liaison radioélectrique pour transmettre les données vers l'ensemble antenne-récepteur situé à l'installation de traitement. On utilise pour cela les bandes 400,15-406 MHz et 1 668,4-1 700 MHz. Pour les radiosondes, l'ensemble antenne-récepteur se trouve en général au sol, à bord d'un aéronef pour les parasondes. Sa configuration varie selon la bande de fonctionnement et selon la distance oblique maximale attendue en vol. Les systèmes qui utilisent la bande 400,15-406 MHz fonctionnent le plus souvent avec des antennes équidirectives et des rosettes d'antennes Yagi ou des réflecteurs polyédriques (Fig. 3-5). Ce genre d'antenne n'a pas besoin de présenter un gain extrêmement élevé pour maintenir la liaison. La radiogoniométrie ne sert pas à mesurer les vents dans cette bande. Quand les systèmes fonctionnent dans la bande 400,15-406 MHz, le gain d'antenne va de 0 dBi à 10 dBi.

FIGURE 3-5

Antenne équidirective et systèmes directifs (401-406 MHz)



Photos extraites du Rapport N° 143 sur les instruments et les méthodes d'observation

Meteo-03-05

La mesure des vents se fait généralement au moyen du système GNSS, de la radiogoniométrie ou d'un radar de poursuite dans la bande 1 668,4-1 700 MHz. Certains pays préfèrent toujours utiliser la radiogoniométrie pour suivre les radiosondes, car elle donne la possibilité d'utiliser les radiosondes avec ou sans systèmes NAVAID/GNSS, qui ne sont pas forcément disponibles dans les situations d'urgence. Les installations de poursuite sont munies de grandes antennes paraboliques ou de panneaux-réseau à commande de phase afin de réduire l'affaiblissement sur le trajet (voir la Fig. 3-6). L'antenne pivote sur son socle, en azimut et en élévation, de manière à suivre le mouvement de l'appareil de détection. Les systèmes qui fonctionnent dans la bande 1 668,4-1 700 MHz présentent généralement un gain d'antenne de 25 à 28 dBi.

FIGURE 3-6

Antenne de poursuite (1 668,4-1 700 MHz)

Meteo-03-06

3.3.2 Installation de traitement au sol

Le récepteur transmet le signal en bande de base reçu de la radiosonde à une installation qui décode les données analogiques ou numériques et établit les paramètres atmosphériques correspondants. Certains appareils MetAids fournissent à la station de réception, non pas les données météorologiques en tant que telles (pression, température, humidité, ozone, vents), mais les caractéristiques électroniques des capteurs et les données NAVAID/GNSS, afin de réduire le traitement au niveau de l'appareil lui-même. L'installation de traitement au sol applique ensuite les valeurs des capteurs capacitifs ou résistifs et les valeurs d'étalonnage des capteurs à un polynôme afin d'obtenir les variables météorologiques. D'autres appareils MetAids effectuent la plus grande partie du traitement du signal et fournissent directement les données météorologiques effectives. Dans ce cas, il ne reste à l'installation de traitement au sol qu'une partie du traitement des données à effectuer.

3.3.3 Blocs de détection non récupérables

La nature du service MetAids détermine en bonne partie le mode de fabrication des blocs de détection. La plupart des contraintes de conception ont une incidence sur les caractéristiques des appareils non récupérables et, donc, sur le spectre nécessaire aux opérations. Le coût est la principale considération, mais les fabricants et les exploitants doivent aussi prêter soigneusement attention à la densité, au poids, au milieu ambiant, au rendement énergétique, etc. Les incidences environnementales des blocs de détection à usage unique constituent également un facteur important à prendre en considération et deviennent de plus en plus une contrainte dans le choix des dispositifs, à l'heure où les services météorologiques et hydrologiques nationaux cherchent à améliorer la durabilité environnementale de leurs activités et à réduire le plus possible les déchets irrécupérables.

Les progrès dans le domaine des technologies numériques ont permis d'employer des circuits intégrés qui offrent un bon rapport coût-efficacité. On est surtout parvenu, dans le passé, à accroître la précision des mesures fournies par les capteurs et à réduire la masse et la taille des radiosondes. Ces dernières années, les exploitants ont dû améliorer aussi les caractéristiques de transmission des radiosondes afin d'accroître la densité du réseau. Il en résulte que la plupart des modèles de radiosonde des plus grands fabricants mondiaux sont conformes aux normes relativement strictes de l'ETSI en matière de largeur de bande des émissions et de rayonnements dans les bandes latérales. Beaucoup de modèles simples renferment des émetteurs à un seul étage sensibles aux variations de la température, de la tension d'alimentation et de la charge capacitive de l'antenne lors de la manutention. On utilise de plus en plus les circuits intégrés à application spécifique (ASIC, *application specific integrated circuits*) disponibles sur le marché, étant donné qu'ils peuvent supporter les plages de températures extrêmes rencontrées dans le cadre de telles missions.

La densité des appareils MetAids non récupérables doit être limitée par mesure de sécurité. Leur poids aussi est restreint pour des raisons de sécurité et de fonctionnement. Même si le risque est extrêmement faible, une collision avec un aéronef ne doit pas créer de dommages ni mettre des vies en danger. La densité est importante au cas où l'appareil pénétrerait dans le moteur de l'aéronef. Le poids doit être faible car les appareils MetAids non récupérables retombent au sol. Un parachute est souvent utilisé pour ralentir la descente, mais un objet lourd pourrait créer des dégâts. La plupart des appareils utilisés de nos jours pèsent nettement moins d'un kilogramme (sans ballon). Les radiosondes sont en général placées dans une enveloppe légère de mousse, de carton ou de plastique qui se décompose facilement. Les cartes électroniques, de petites dimensions, renferment peu de composants. Les piles nécessaires pour exploiter les blocs de détection deviennent plus petites et contribuent à réduire la charge totale, mais leur empreinte environnementale pose toujours problème.

En vol, les appareils MetAids peuvent être exposés à des conditions extrêmes: température allant de +50° à -90° C, air très sec ou très humide (condensation, sublimation ou précipitation), etc. Aux altitudes élevées, le rayonnement solaire et le manque d'air pour refroidir le matériel électronique provoquent parfois une surchauffe, même si la température est basse. Ces énormes variations des conditions ambiantes peuvent avoir de très fortes répercussions sur la performance et sur les caractéristiques de tous les composants, y compris l'émetteur. Il n'était pas rare, avec les anciens modèles de radiosondes, qu'un émetteur dévie de 5 MHz ou plus sous l'effet des fluctuations de la température et d'autres facteurs, par exemple le givrage de l'antenne qui produit une charge capacitive. Il est impossible de contrôler parfaitement la température des organes électroniques car la consommation électrique doit être limitée et la production de chaleur risquerait de modifier la performance des capteurs. Il a été établi, par ailleurs, que de nombreux circuits intégrés vendus dans le commerce pour les émetteurs servant aux télécommunications sans fil ne peuvent fonctionner à des températures extrêmement basses.

La consommation électrique des composants électroniques MetAids doit être soigneusement pensée. Les grosses piles augmentent l'empreinte environnementale des blocs de détection et alourdissent les appareils, ce qui accroît les risques pour la sécurité et augmente les coûts, car cela exige des ballons plus gros et davantage de gaz pour le gonflement. La puissance de sortie est la plus basse possible, tout en maintenant une bonne liaison de télémesure, afin d'améliorer le rendement énergétique. Elle varie en général, sur les radiosondes, de 100 mW à 400 mW et la marge de liaison, à la portée maximale, ne dépasse pas 0,5 dB à 2 dB. Les émetteurs courants, à un seul étage, offrent un très bon rendement énergétique tandis que les modèles plus évolués consomment 1,5 à 2,5 fois plus d'électricité. Toutefois, les appareils anciens sont sensibles aux variations extrêmes de la température et à la charge capacitive de l'antenne durant la manutention, ce qui provoque une importante dérive de fréquence. Les émetteurs numériques modernes sont plus efficaces d'un point de vue spectral que les anciens émetteurs analogiques.

3.4 Caractéristiques des observations météorologiques fournies par le service MetAids

Nous verrons dans cette partie, par quelques exemples de mesures avec des radiosondes et des sondes d'ozone, quelles sont les caractéristiques que doivent présenter les observations provenant du service MetAids.

3.4.1 Caractéristiques des radiosondes

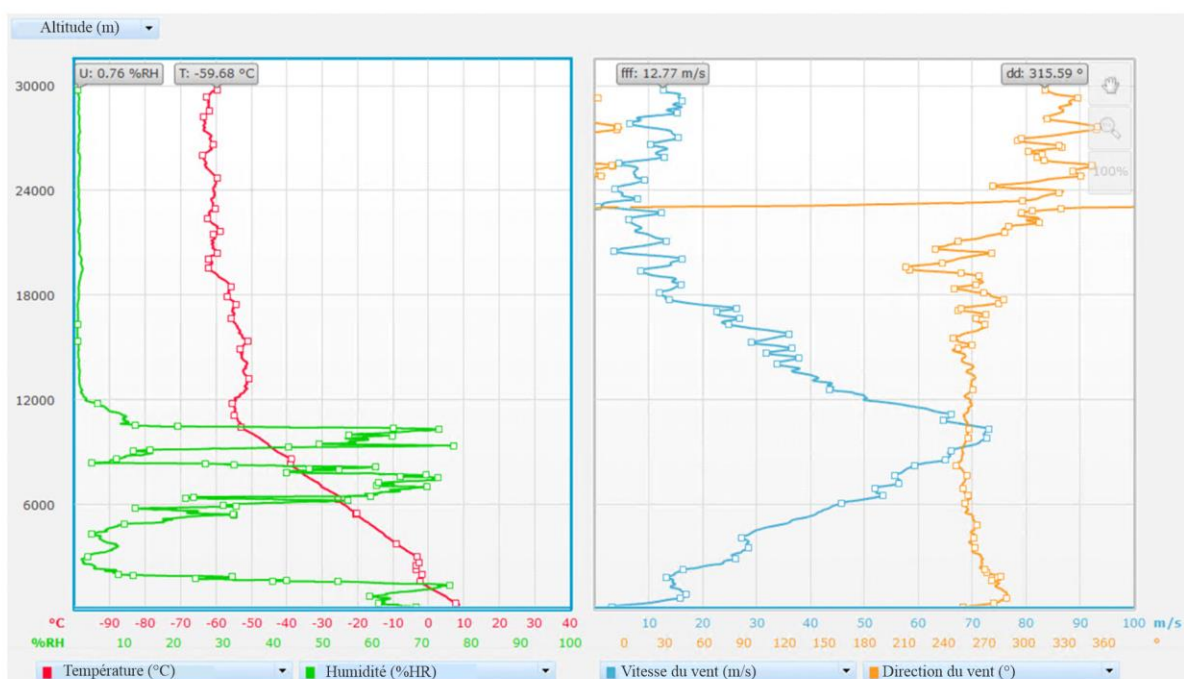
On trouvera dans la Fig. 3-7 un exemple de vol de radiosonde depuis Watnall effectué le 13/04/2024 jusqu'à une altitude maximale d'environ 30 km. Dans ce profil, l'altitude et le vent ont été déterminés à partir du système GPS, et la pression a également été déterminée à partir de l'altitude GPS, tout comme les mesures de la température et de l'humidité relative. Il est fréquent d'utiliser la pression mesurée à l'aide du GPS à l'échelle internationale.

Dans la case de gauche de la Fig. 3-7, la température la plus basse est relevée à 27 km environ. Les mesures de l'humidité relative ont tendance à se rapprocher de 0% à mesure que la radiosonde s'approche de la tropopause à environ 11 km.

La case de droite de la Fig. 3-7 montre la vitesse et la direction du vent. Un jet stream est visible dans les mesures de la vitesse du vent, qui indiquent une vitesse maximale de plus de 70 m/s à environ 11 km. La précision de la mesure de la vitesse du vent devrait être de $\pm 0,15$ m/s à toutes les altitudes.

FIGURE 3-7

Mesures de la température, de l'humidité et du vent par radiosondage



Meteo-03-07

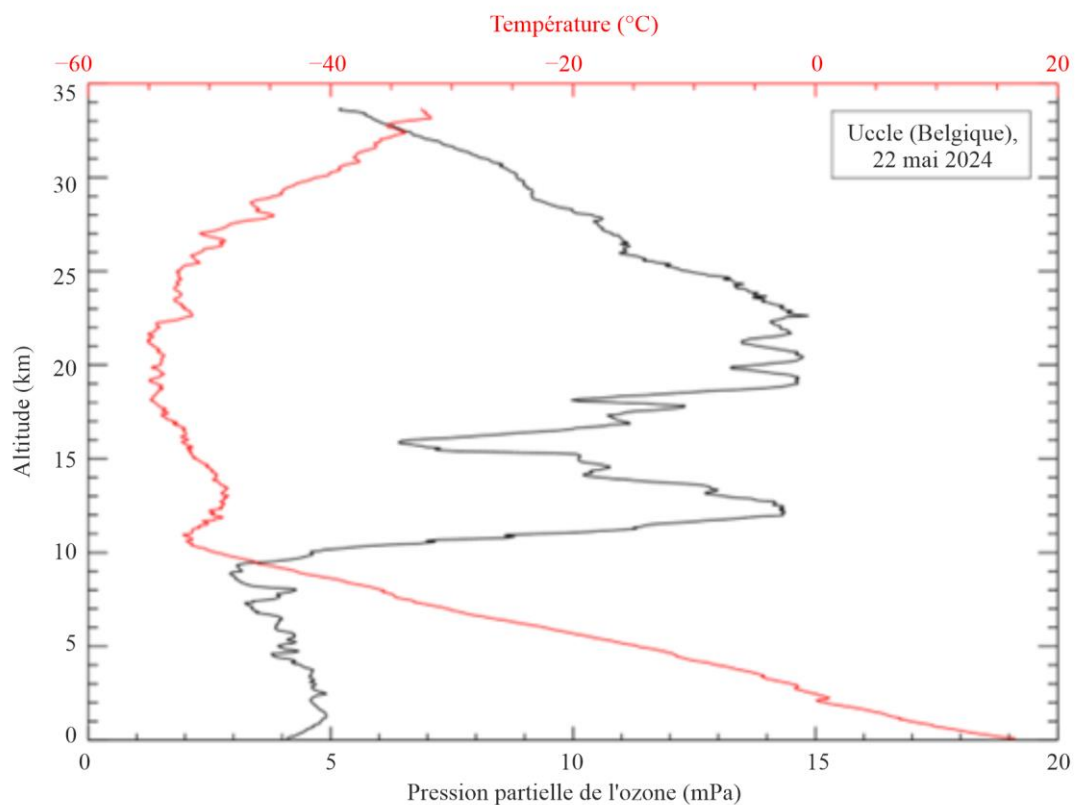
La mesure des vents en altitude du service MetAids présente un grand intérêt pour les services de transport aérien et pour l'armée. La station de base attribue généralement un code militaire spécial aux résultats d'une observation avant de les transmettre aux unités concernées.

3.4.2 Caractéristiques des sondes d'ozone

Sur une soixantaine de sites dans le monde, des sondes d'ozone sont lancées sur un ballon météorologique pour mesurer les concentrations d'ozone au moyen d'une réaction chimique de bulles d'ozone troposphérique (O_3) ambiant dans une cellule électrochimique à deux compartiments contenant une solution d'iodure de potassium (KI). La sonde d'ozone est associée à une radiosonde qui transmet à une station au sol des informations sur la pression partielle de l' O_3 et, dans le même temps, des données relatives à la pression, à la température, à l'humidité et au vent obtenues par GPS. On trouvera dans la Fig. 3-8 un exemple de concentration d'ozone en fonction de l'altitude (courbe noire) mesurée par une sonde d'ozone lancée à Uccle (50° N, 4° E) en Belgique, ainsi que le profil de température généré par la radiosonde associée (courbe rouge). La fréquence de lancement des sondes d'ozone varie entre une ou deux fois par mois et trois fois par semaine (comme c'est le cas à Uccle), les lancements hebdomadaires étant les plus fréquents. Les mesures effectuées à l'aide des sondes d'ozone sont réalisées dans le cadre du programme de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM visant à surveiller l'état de la couche d'ozone (concentrations maximales d'ozone comprises entre 20 et 25 km, voir la Fig. 3-8) et sont stockées au Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet de l'OMM. En outre, l'ozone dans la troposphère (au-dessous de 11 km dans la Fig. 3-8) est un important gaz à effet de serre, et l'ozone dans la couche limite a des effets néfastes sur la santé humaine.

FIGURE 3-8

Exemple de mesure de la répartition verticale des concentrations d'ozone (noir) dans l'atmosphère au-dessus de Uccle (Belgique) à l'aide d'une sonde d'ozone associée à une radiosonde



Meteo-03-08

3.5 Les variations dans l'exploitation du service MetAids

3.5.1 Les variations dans les régimes des vents en altitude et leurs incidences sur les activités des radiosondes

En hiver, aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, les courants présents à plus de 16 km d'altitude ne sont généralement pas répartis de manière symétrique autour du pôle. C'est pourquoi l'Europe est beaucoup plus souvent balayée par de violents vents stratosphériques que l'Amérique du Nord. Au contraire, les vents en altitude sont régulièrement faibles au-dessus de nombreuses régions du globe. Ces écarts influent sur les conditions d'exploitation des réseaux nationaux. Dans certains pays, par exemple dans les régions tropicales, les radiosondes resteront toujours à un angle d'élévation élevé et à une faible distance, tandis qu'ailleurs il faudra les suivre jusqu'à moins de 5 degrés au-dessus de l'horizon et à plus de 200 km de distance.

Quand les ballons restent en hauteur (et notamment lorsque l'élévation demeure supérieure à 15 degrés), certains pays peuvent toujours utiliser des radiosondes à faible coût même sans récepteur de signal NAVAID/GNSS ou capteur de pression, afin de réduire le coût des mesures par radiosondage. Ces radiosondes émettent à des fréquences au voisinage de 1 680 MHz et peuvent être suivies à l'aide d'une antenne directive à balayage à partir de la station de base, qui est beaucoup plus petite que l'antenne de remplacement nécessaire pour les radiosondes transmettant à des fréquences proches de 403 MHz. L'utilisation des radiosondes sans capteur de pression ni signal GNSS est déconseillée, car elle peut conduire à d'importantes erreurs en termes d'altitude/de pression à des niveaux plus élevés si le ballon dérive largement (faibles angles d'élévation de radar). En pareils cas, il est essentiel d'utiliser des radiosondes recevant un signal GNSS pour obtenir des mesures fiables du vent. Les fréquences proches de 403 MHz conviennent particulièrement bien aux radiosondages avec une grande dérive horizontale et sont en mesure d'assurer une bonne réception et une mesure exacte des vents tout au long de la montée.

3.5.2 Les variations dans la densité des réseaux

L'OMM a défini les prescriptions mondiales et régionales minimales applicables aux réseaux d'observation, y compris au service MetAids, et les revoit régulièrement. Conformément aux prescriptions du Réseau d'observation de base mondial (OMM-N° 1160), les mesures par radiosondage effectuées par les stations terrestres en altitude sont faites avec la résolution horizontale nécessaire de 500 km et la résolution recommandée de 200 km. En ce qui concerne les stations en altitude situées dans les zones marines relevant de la juridiction des Membres de l'OMM, la résolution horizontale nécessaire est de 1 000 km, alors que la résolution recommandée est de 500 km.

Les besoins de spectre du service MetAids varient d'un pays à l'autre et doivent tenir compte de l'ensemble de la communauté des utilisateurs, qui comprend notamment les organisations de défense, de protection de l'environnement et de secours en cas de catastrophe et les agences spatiales. Malgré l'utilisation généralisée d'émetteurs numériques plus économes en spectre, certains pays continuent d'exploiter des radiosondes avec des technologies analogiques. Toute estimation des besoins de spectre doit tenir compte de la densité du réseau (une densité de réseau plus élevée exige une plus grande efficacité spectrale), ainsi que du renouvellement des radiosondes existantes qui peuvent encore s'appuyer sur la technologie analogique.

Il convient de noter qu'il existe une demande croissante de systèmes de lancement entièrement automatiques pouvant être supervisés à distance, et qu'un grand nombre de systèmes de ce type sont exploités. Ces systèmes emploient toujours des radiosondes NAVAID/GNSS qui fonctionnent dans la bande 400,15-406 MHz. Comme dans les opérations avec équipage, si un ballon censé lancer une radiosonde éclate trop tôt, la radiosonde peut continuer à émettre. Cette défaillance peut conduire au lancement de la deuxième radiosonde peu de temps après. Le système automatique balaye donc la bande 400,15-406 MHz avant chaque lancement, pour s'assurer qu'aucun autre appareil à portée n'émet à la fréquence choisie. Il faut, dans ces situations, pouvoir utiliser une autre fréquence afin d'obtenir les mesures opérationnelles.

3.5.3 Utilisation de la bande 401-406 MHz

Certains États européens dont les réseaux sont très denses utilisent des radiosondes qui présentent une dérive minimale et qui émettent en bande étroite. D'autres sont équipés de systèmes radars secondaires à large bande; la station au sol émet une impulsion vers la radiosonde qui y répond et envoie les données météorologiques. Pratiquement toute la bande 400,15-406 MHz est nécessaire dans les deux cas puisque le service MetAids doit

coordonner ses opérations avec les transmissions des plates-formes de collecte de données liées au SETS (Terre vers espace) et au METSAT (Terre vers espace) entre 401 MHz et 403 MHz. La Chine a mis au point le Système de sondage en dérive aller-retour (RDSS, *Round-trip Drifting Sounding System*), un système de sondage innovant comportant trois étapes d'observation: montée, dérive et descente. Des canaux spécifiques dans la bande 400,15-406 MHz ont été attribués au RDSS.

Il convient de noter également que certains pays disposent d'un nombre limité de stations de lancement. En pareil cas, des ressources peuvent être mises à disposition pour acquérir des émetteurs pouvant permettre d'utiliser des parties de la bande à d'autres fins. Par exemple, en Australie, où la bande dans sa totalité n'est pas nécessaire, l'administration en utilise une partie pour d'autres services de radiocommunication. L'OMM considère que la totalité de la bande 400,15-406 MHz est nécessaire, dans un avenir proche, pour conduire les opérations du service MetAids et est consciente que le partage dans le même canal, entre 400,15 MHz et 401 MHz, avec les services par satellite risque de compromettre à l'avenir les activités courantes de radiosondage dans le monde.

3.5.4 Utilisation de la bande 1 668,4-1 700 MHz

La situation dans la bande 1 668,4-1 700 MHz est différente de celle dans la bande 401-406 MHz. Cette bande est attribuée dans sa totalité au service MetAids et au service de météorologie par satellite à titre primaire. Cependant, ces activités sont incompatibles dans le même canal et une segmentation notable est déjà survenue. Le service MetAids crée des niveaux élevés de brouillage aux stations du service de météorologie par satellite établies au sol. En ce qui concerne les besoins de ce service dans la bande 1 668,4-1 700 MHz, il ne faut pas oublier qu'une portion seulement de cette dernière est généralement disponible. La plupart des pays qui utilisent cette bande peuvent mener à bien leurs opérations à l'intérieur de la largeur de bande de 7 MHz à 8 MHz, mais plusieurs autres ont encore besoin d'une largeur de bande supérieure à 15 MHz.

Il convient de noter que les activités des radiosondes ne couvrent pas l'intégralité de la bande de fréquences 1 668,4-1 700 MHz, mais qu'elles se limitent à la gamme 1 668,4-1 690 MHz. Elles sont principalement utilisées en Europe, et un plus petit nombre de systèmes est également exploité en Asie.

3.5.5 Conservation des deux bandes de fréquences

Les différents types d'opérations du service MetAids ont besoin des caractéristiques propres à chaque bande.

Par exemple, l'affaiblissement de propagation est moins important dans la bande 401-406 MHz. Cela présente un intérêt dans les régions où la force des vents produit une grande distance oblique entre la station de base et la radiosonde, et cela permet de suivre le vol avec des antennes de réception plus simples et plus petites. La mesure des vents pour les activités MetAids se fait au moyen d'un système de radionavigation (GNSS), puisqu'une antenne radiogoniométrique serait beaucoup trop grosse et coûteuse. Pour des raisons de sécurité ou de budget, certaines administrations utilisent la bande 1 668,4-1 700 MHz. Cela abaisse le coût des appareils non récupérables et offre la possibilité d'exploiter des systèmes MetAids indépendamment des systèmes NAVAID/GNSS internationaux.

Compte tenu des caractéristiques propres à chaque bande de fréquences et des conditions actuelles de partage avec d'autres services, les activités du service MetAids (de météorologie, de recherche, de défense et autres) ne peuvent pas compter uniquement sur la disponibilité d'une bande. Par conséquent, il est capital de garantir la disponibilité des deux bandes de fréquences précitées pour assurer les activités météorologiques avec succès.

3.6 Les tendances futures

Même si les appareils MetAids sont généralement très simples, formés de composants bon marché, leur performance ne cesse de croître. Le besoin croissant de nouvelles fréquences dans certaines parties du globe, afin que différents utilisateurs mènent des activités météorologiques et d'autres activités environnementales, a également donné lieu à une amélioration de la technologie et des caractéristiques d'utilisation du spectre radioélectrique, grâce au remplacement des émetteurs analogiques par les émetteurs numériques.

L'utilisation du GNSS pour mesurer les vents et calculer la pression à partir des altitudes GPS avec des radiosondes a déjà conduit à une nette amélioration de l'efficacité spectrale des appareils NAVD/GNSS. Elle se traduit par une amélioration de la précision et de la résolution des mesures de l'altitude et des vents en altitude. L'utilisation du GNSS pour le calcul de la pression permet de supprimer les capteurs de pression dédiés et peut contribuer à réduire le poids et le coût des radiosondes. Grâce aux petits récepteurs GNSS bon marché qui sont maintenant disponibles, un traitement complet du signal GNSS est possible à bord de l'appareil MetAids et seules les données de vent et de position peuvent être transmises.

Références

- [1] OMM-N° 8 – Guide des instruments et des méthodes d'observation, Volume I – Mesure des variables météorologiques, [Guide des instruments et des méthodes d'observation \(wmo.int\)](https://www.wmo.int/publications/meteorology/guide-instruments-methods-observation-volume-i).
- [2] OMM-N° 1160 – Manuel du Système mondial intégré d'observation de l'OMM, [Manuel du Système mondial intégré d'observation de l'OMM](https://www.wmo.int/publications/meteorology/manual-system-world-integrated-observation-omm).
- [3] OSCAR/Surface (<https://oscar.wmo.int/surface/>).
- [4] OMM-N° 1165 – Guide du Système mondial intégré d'observation de l'OMM, [Guide du Système mondial intégré d'observation de l'OMM](https://www.wmo.int/publications/meteorology/guide-system-world-integrated-observation-omm).
- [5] Rapport N° 143 sur les instruments et les méthodes d'observation, Rapport de 2022 de l'OMM sur la campagne de comparaison entre les instruments en altitude, [Rapport de 2022 de l'OMM sur la campagne de comparaison entre les instruments en altitude](https://www.wmo.int/publications/meteorology/report-143-instruments-methods-observation).
- [6] Recommandation UIT-R RS.1165 – Caractéristiques techniques et critères de qualité de fonctionnement des systèmes utilisés dans le service des auxiliaires de la météorologie dans les bandes à 403 MHz et à 1 680 MHz.

CHAPITRE 4

Les radars météorologiques

4.1 Introduction

Les radars météorologiques au sol relèvent du service de radiolocalisation; ils servent pour la météorologie d'exploitation, les prévisions météorologiques, la recherche atmosphérique et la navigation aéronautique et maritime. Fonctionnant pour la plupart en permanence, ils sont essentiels aux procédures d'alerte/d'avertissement météorologique et hydrologique d'urgence. Lors de crues éclair ou de fortes tempêtes, ils sont le dernier rempart permettant de sauver des vies et des biens.

Les radars météorologiques sont généralement des appareils à faisceau étroit et à balayage de volume qui détectent et mesurent l'intensité des précipitations et leur vitesse radiale. C'est grâce à eux que nous pouvons prévoir la formation d'ouragans, de tornades et d'autres phénomènes extrêmes, suivre la course destructrice des tempêtes. Les radars modernes permettent aussi de suivre les tempêtes, quelle que soit leur ampleur, et fournissent des données sur l'intensité des précipitations, facilitant la prévision des crues éclair. Ils fournissent en outre des informations indispensables sur les vents violents et les risques de foudre. Les radars météorologiques sont également très utiles dans le domaine aéronautique, en particulier pour détecter les conditions de formation de givre sur les aéronefs et éviter le mauvais temps pour la navigation. Les radars modernes numérisent le signal de retour pour créer plus facilement des produits améliorés au moyen de divers algorithmes. Ces données et produits sont généralement archivés à des fins historiques et de recherche.

Le présent chapitre décrit les types de radars au sol opérationnels déployés et proches d'être déployés en météorologie et leurs particularités par rapport aux autres radars.

4.1.1 Les différents types de radars météorologiques

Le radar le plus couramment utilisé et le plus reconnu est le radar météorologique. Il fournit des données dans un périmètre circulaire tout autour de sa propre position. Cet appareil est bien connu du grand public car on le voit souvent lors de la présentation du temps à la télévision. Le Tableau 4-1 ci-dessous indique les bandes de fréquences couramment utilisées par les radars météorologiques.

TABLEAU 4-1

Principales bandes de fréquences utilisées par les radars météorologiques

Bande de fréquences (MHz)	Nom de la bande couramment utilisé dans la communauté de la météorologie
2 700-3 000 (principalement 2 700-2 900)	Bande S
5 250-5 725 (principalement 5 600-5 650)	Bande C
9 100-9 700 (principalement 9 300-9 500)	Bande X

Le radar profileur de vent constitue une autre catégorie importante de radar météorologique. Il pointe verticalement pour fournir des données sur la vitesse des vents à l'intérieur d'un volume plus ou moins conique, juste au-dessus de l'appareil. S'il est bien équipé, par exemple s'il est doté de haut-parleurs ou d'un système de sondage radio-acoustique, il peut aussi mesurer la température virtuelle de l'atmosphère en fonction de la hauteur. Les bandes de fréquences radioélectriques employées se situent aux alentours de 50 MHz, 400 MHz, 1 000 MHz et 1 300 MHz (voir le § 4.3 pour plus d'informations).

Un troisième type de radar utilisé en météorologie et en océanographie est le radar océanographique à ondes décimétriques. Il fonctionne dans la bande d'ondes décimétriques (3-30 MHz) et extrait des informations à la surface de l'océan grâce au phénomène de la diffusion de Bragg. Les radars océanographiques peuvent être utilisés dans les zones côtières pour surveiller les courants à la surface des océans, les vagues et la direction du vent.

Une quatrième catégorie, moins fréquente, est le radar auxiliaire qui suit les radiosondes en vol. Il est question de ce type de système au Chapitre 3, consacré aux radiosondes.

Un cinquième type de radar est utilisé en météorologie, à savoir le radar profileur de nuage. Fonctionnant généralement au voisinage de 35 GHz et de 94 GHz du fait de sa plus grande sensibilité aux petits hydrométéores (comme le brouillard) en comparaison avec les systèmes radar dans les bandes S, C ou X, ce type de radar est utilisé pour étudier les propriétés microphysiques des nuages et d'autres particules à l'intérieur de sa plage de sensibilité.

Tous les radars transmettent des signaux radioélectriques qui sont ensuite réfléchis par une cible (véhicules, avions, gouttes de pluie, turbulence atmosphérique, etc.). Bien qu'ils émettent de puissants signaux, leur signal de retour est faible. Ceci s'explique par le fait que le signal émis doit parcourir le trajet deux fois, du radar à la cible et de la cible au radar, et qu'il subit donc l'affaiblissement atmosphérique sur les deux trajets. La faiblesse du signal de retour est encore plus marquée pour les radars météorologiques du fait que la cible météorologique (à savoir des gouttes d'eau, des grêlons, des flocons de neige, etc., voire de la poussière, des insectes ou uniquement des perturbations atmosphériques dans le cas des radars Doppler) ne constitue pas fondamentalement un réflecteur particulièrement efficace. L'intensité du signal retourné dépend de la réflectivité de la cible, qui peut varier selon la taille et la nature de celle-ci. Pour remédier à ces difficultés en matière de détection, les systèmes radar appliquent plusieurs stratégies essentielles: puissances d'émission plus élevées, grandes antennes à gain élevé, récepteurs très sensibles, longs temps d'intégration des signaux, etc. Pour une détection réussie, un spectre relativement «silencieux» (absence de brouillage et de bruit électronique d'origine anthropique) est également essentiel.

4.1.2 Équation radar pour les applications météorologiques

Dans le cas des radars classiques détectant une cible discrète, l'équation radar simple laisse penser que la puissance renvoyée au radar dépend de la surface équivalente radar (RCS, *radar cross section*) d'une cible unique et est proportionnelle à $1/r^4$, où « r » correspond à la distance entre le radar et la cible. Cependant, cette équation ne s'applique pas directement aux radars météorologiques, qui sont conçus pour détecter un grand nombre de diffuseurs (généralement des particules de précipitation) répartis dans l'ensemble du volume du faisceau d'un radar d'une impulsion.

Pour ce qui est des applications radar météorologiques, l'équation (4-1) montre les facteurs qui contribuent à la puissance de réception, soit la constante radar et la réflectivité de la cible. Elle se formule comme suit:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau \cdot |K|^2 \cdot L \cdot Z}{2^{10} \cdot \lambda^2 \cdot r^2 \cdot \ln 2} \quad (4-1)$$

où:

- $\bar{P}_r$: puissance moyenne reçue en retour (W)
- P_t : puissance de sortie de l'émetteur (W)
- G : gain d'antenne (sans dimension)
- θ : ouverture de faisceau (rad) d'antenne à mi-puissance (3 dB)
- c : vitesse de la lumière (m/s)
- τ : largeur de l'impulsion
- L : facteurs d'affaiblissement liés à la propagation et à la détection du récepteur
- Z : réflectivité effective du radar (m^3)
- K : indice de réfraction complexe (sans dimension)
- λ : longueur d'onde radar (m)
- r : distance de la cible

L'équation radar (4-2) est une reformulation simplifiée de l'équation précédente qui fait la lumière sur le poids des facteurs de constantes, de radar et de cible dans la puissance reçue.

$$\bar{P}_r = \underbrace{\frac{\pi^3 \cdot c}{1024 \cdot \ln 2}}_{\text{Constantes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot \tau \cdot L}{\lambda^2}}_{\text{Facteurs radar}} \cdot \underbrace{|K|^2 \frac{Z}{r^2}}_{\text{Facteurs de cible}} \quad (4-2)$$

L'équation (4-2) peut s'appliquer à une cible répartie si les conditions suivantes sont satisfaites:

- la cible occupe tout le volume de l'impulsion;
- les particules sont réparties sur toute la région concernée;
- les particules de précipitation sont des sphères diélectriques homogènes de petit diamètre comparé à la longueur d'onde radar;
- la taille des particules satisfait le critère de diffusion de Rayleigh;
- la constante diélectrique $|K|^2$ et la distribution en dimension des diffuseurs sont homogènes dans le volume V considéré;
- le diagramme d'antenne peut s'apparenter à une forme gaussienne;
- les ondes incidentes et diffuses sont polarisées linéairement;
- les effets de la diffusion multiple sont négligés.

L'équation (4-3) ci-dessous est une représentation logarithmique de l'équation (4-2) [Doviak et Zrnica, 1984]:

$$Z(Az, E1, R) \text{ (dBz)} = 10 \log(P_r) + 20 \log(R) - 10 \log(L_p) + 10 \log(C) \quad (4-3)$$

L'équation est utile en ceci qu'elle illustre la nécessité de disposer de divers paramètres système clairement identifiés pour effectuer des mesures de réflectivité calibrées. Voici ces paramètres:

- la puissance de réception P_r (W),
- la portée R (m),
- l'azimut et les angles d'élévation (degrés),
- l'affaiblissement de propagation en excès L_p (dB),
- la constante radar C .

La constante radar inclut généralement des facteurs comme l'ouverture du faisceau d'antenne, la durée d'impulsion, le gain de conversion du récepteur et l'affaiblissement du système.

Comme indiqué ci-dessus, l'équation radar est différente pour les radars météorologiques puisque les cibles, comme les précipitations, devraient occuper tout le faisceau radar, conformément aux hypothèses ci-dessus. Dans ce cas, l'équation radar indique un signal reçu proportionnel à $1/r^2$. Par conséquent, les radars météorologiques couvrent une zone de détection plus importante, mais cela signifie aussi qu'ils sont plus sensibles au brouillage qu'un radar type utilisé pour le contrôle du trafic aérien.

4.2 Les radars météorologiques

4.2.1 Besoins des utilisateurs

Les météorologistes utilisent des radars météorologiques pour détecter, localiser et mesurer le volume des précipitations contenues dans les nuages ou s'en échappant, ainsi que pour déterminer la vitesse et la direction des vents à partir du mouvement des particules de précipitation ou atmosphériques. Les radars mesurent l'intensité des précipitations sur des périodes prédéfinies, ainsi que le mouvement de leurs particules et des particules atmosphériques en direction ou en partance de l'antenne. Cela permet de détecter les modèles de rotation dans les systèmes météorologiques, qui constituent un facteur important dans la détection des phénomènes extrêmes, comme les tornades et crues éclair, et d'améliorer en définitive les systèmes d'alerte

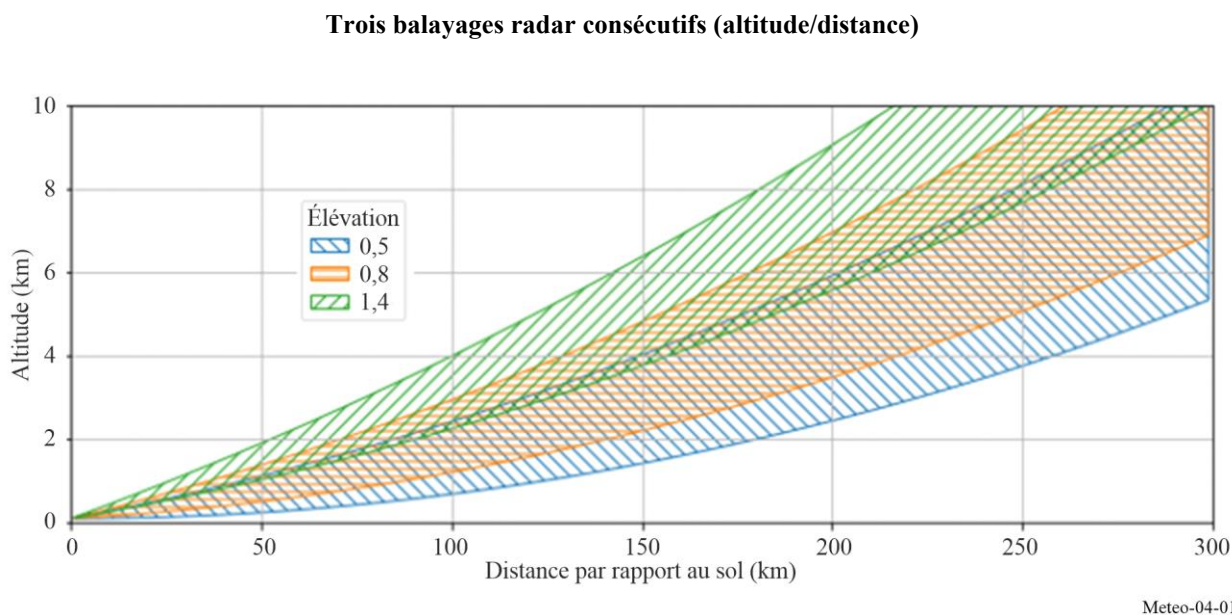
avancée. Les radars météorologiques servent surtout à détecter les précipitations solides et liquides et à mesurer leur intensité et la composante vitesse radiale⁵.

4.2.2 Réseaux de radars météorologiques

Le principal inconvénient d'un radar météorologique est que l'intensité des échos renvoyés lors d'un événement météorologique donné tend à décroître à mesure que la distance du radar augmente. Ce phénomène ne s'explique pas uniquement par l'affaiblissement en espace libre et d'autres affaiblissements atmosphériques mais également par le fait que, à mesure que la distance du radar croît, le faisceau du radar s'élève au-dessus du sol (cela est dû à la courbure de la Terre et à l'angle d'élévation du faisceau) et il s'élargit (voir la Fig. 4-1 pour les trois premiers balayages d'un radar avec une largeur de bande de 3 dB de 1 degré, à des angles d'élévation de 0,5, 0,8 et 1,4 degrés. Il convient de noter que les balayages peuvent avoir des zones de chevauchement, comme le montre la Fig. 4-1).

Ce phénomène réduit par conséquent le pourcentage de l'événement météorologique illuminé par le faisceau. Alors que la partie supérieure de l'événement reste observée par le radar, sa partie inférieure ne l'est plus. Les précipitations intervenant à une certaine distance du radar peuvent donc passer inaperçues ou leur intensité être minimisée, limitant ainsi le champ opérationnel quantitatif du radar.

FIGURE 4-1

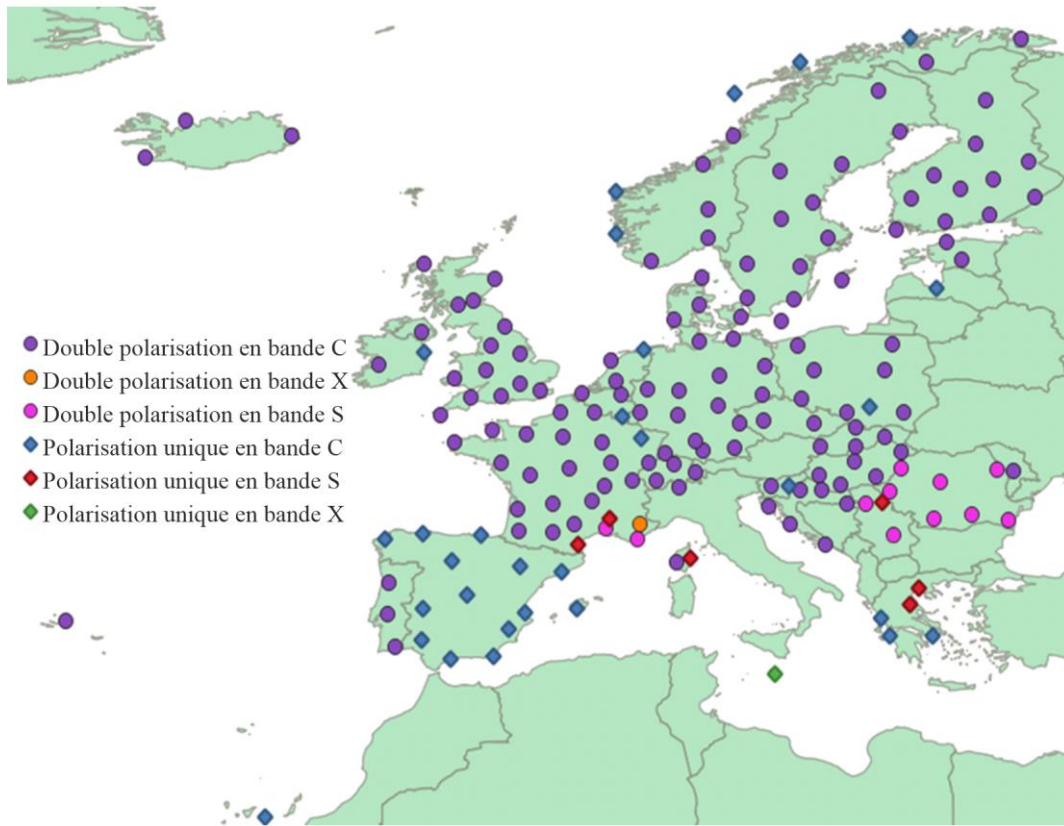


Pour compenser cette contrainte, on dispose généralement une série de radars à une distance égale de manière à former des réseaux répartis. Ces réseaux fonctionnent 24 heures sur 24 et couvrent souvent de grandes superficies, par exemple des pays ou même une partie d'un continent, afin de détecter et suivre l'évolution des phénomènes météorologiques et de permettre l'émission rapide d'avis de conditions dangereuses. Un réseau de ce genre, composé de radars en bandes S, C et X, a été déployé en Europe occidentale (voir la Fig. 4-2).

⁵ Il s'agit de la vitesse de la précipitation en direction ou en partance du radar (dans une direction radiale). Aucune information sur l'intensité de la précipitation n'est donnée. La précipitation en direction du radar présente une vitesse négative, celle en partance du radar une vitesse positive et celle étant perpendiculaire au faisceau du radar (dans un cercle autour du radar) une vitesse radiale de zéro.

FIGURE 4-2

Exemple de réseau de radars météorologiques (mise à jour EUMETNET-OPERA, janvier 2025)



Meteo-04-02

4.2.3 Aspects opérationnels de la réflectivité

Le terme de réflectivité se rapporte aux radars et désigne la capacité d'une cible de radar à renvoyer un signal. La réflectivité η de la pluie est liée à la permittivité relative de l'eau Σ_r , au diamètre des gouttes D et à la longueur d'onde λ . Pour les gouttes de pluie présentes dans le volume V étudié, la réflectivité peut s'exprimer sous la forme de l'équation (4-4).

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_j D_j^6 / V \quad \text{m}^{-1} \quad (4-4)$$

où $|K|^2$ a la valeur 0,93 pour l'eau liquide et 0,18 pour la glace. La réflectivité permet d'estimer l'intensité et la cadence d'une précipitation. Elle mesure la puissance de retour.

Lorsque la taille des gouttes de pluie d'une précipitation est connue (ou présumée), la réflectivité du volume peut être liée au volume total d'eau liquide de chaque volume. Le volume total d'eau, conjugué à la distribution de la dimension des gouttes et à la vitesse terminale de la goutte, facilite le calcul de la cadence de la précipitation.

Le facteur de réflectivité Z peut être défini comme suit:

$$Z = \frac{1}{v_e} \sum_i D_i^6 \quad (4-5)$$

où:

Z : volume déduit de la section de diffusion du radar d'après le nombre total de sphères dans le volume

D : diamètre de la goutte d'eau

V_e : volume de la goutte.

Le volume Z correspond à la surface équivalente radar par volume unitaire η comme suit:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \quad (4-6)$$

où:

Z : volume

η : surface équivalente radar par volume unitaire

λ : longueur d'onde incidente

$|K|$: indice de réfraction complexe.

Compte tenu que le diamètre des gouttes d'eau du volume de diffusion n'est pas uniforme, la distribution des gouttes d'eau peut être estimée au moyen de l'équation suivante:

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (4-7)$$

où:

$N(D)$: concentration de gouttes en nombre dans le diamètre

D : diamètre

ΛD : intervalle des tailles

N_0 et Λ : sont des constantes d'un événement météorologique donné.

Lorsque la distribution de la dimension des gouttes est connue, la somme $\sum_i D_i^6$ d'un volume unitaire s'obtient comme suit:

$$Z = \int_0^\infty D^6 N(D) \Lambda D \quad (4-8)$$

Lorsque la vitesse verticale est de zéro, la cadence de la précipitation, R , s'obtient comme suit:

$$R = \frac{\pi \rho}{6} \int_0^\infty D^3 v_t(D) N(D) \Lambda D \quad (4-9)$$

où:

R : intensité des précipitations

D^3 : volume de la goutte d'eau proportionnel à Z

$v_t(D)$: vitesse terminale d'une goutte d'eau d'un diamètre D

ρ : densité de l'eau.

Lorsque N_0 est constante, la relation Z - R peut être décrite par l'équation (4-10):

$$Z = AR^b \quad (4-10)$$

où Z est généralement exprimé en $\text{dB}_Z = 10 \log Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3\text{)}$ et A et b sont des constantes. (A est la constante de diffusion et b le multiplicateur de cadence). La relation Z - R la plus fréquemment utilisée est celle de Marshall-Palmer où: $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ les valeurs Z et R sont exprimées respectivement en mm^6/m^3 et en mm/h . Il existe toutefois plusieurs relations Z - R . Les variables A et b dépendent de la distribution de la dimension des gouttes, qui varie selon le type et l'intensité de la pluie.

4.2.4 Systèmes d'émission, stratégies de balayage et modes de fonctionnement des radars météorologiques

4.2.4.1 Systèmes d'émission

Pour effectuer un balayage volumique (d'une durée de l'ordre de 5 à 15 min), les radars météorologiques utilisent divers systèmes d'émission à différentes élévations, avec des ensembles de différentes largeurs d'impulsion, fréquence de répétition des impulsions (FRI) et vitesses de rotation, dans le cadre de ce qu'on appelle les «stratégies de balayage». Il n'existe pas un seul système 'type'; en effet, les systèmes varient en fonction de plusieurs facteurs, tels que les capacités du radar et l'environnement du radar pour les produits météorologiques requis. Les systèmes sont donc adaptés pour répondre au mieux aux exigences.

À titre d'exemple, les radars météorologiques ont montré que les intervalles de valeurs des différents paramètres des systèmes d'émission sont larges:

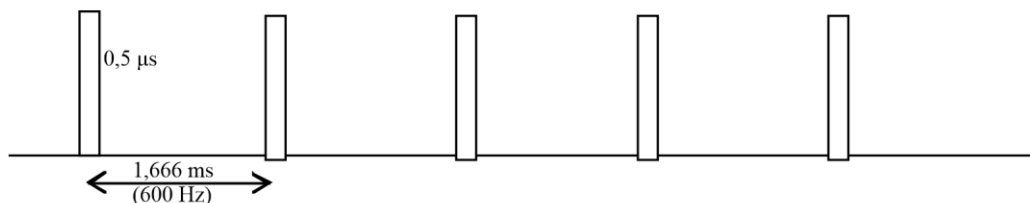
- Élévation de fonctionnement comprise entre 0° et 90° .
- Largeur d'impulsion comprise entre 0,5 et 3,3 μs (dans le cas des radars opérationnels) pour les impulsions non compressées, une situation typique pour les radars dotés d'émetteurs utilisant des tubes à vide classiques (magnétrons et klystrons). Certains radars dotés d'émetteurs à semi-conducteurs utilisent une compression d'impulsion avec une largeur d'impulsion comprise entre 30 μs et 200 μs (il est à noter que la compression d'impulsion fait augmenter la largeur de bande de 3 dB (jusqu'à 10 MHz)).
- Fréquence de répétition des impulsions (FRI) comprise entre 250 et 2 400 Hz (pour les radars opérationnels). Certains radars existants peuvent émettre des impulsions dont la FRI peut aller jusqu'à 20 000 Hz.
- Vitesse de rotation comprise entre 1 et 10 tr/min.
- Utilisation pour un radar donné de différents systèmes d'émission combinant différentes largeurs d'impulsion et FRI, et utilisant notamment une FRI fixe, des FRI décalées ou des FRI entrelacées (c'est-à-dire différentes FRI dans un même système).
- Différents systèmes de codage de phase des impulsions transmises pour les radars utilisant des émetteurs cohérents en phase (klystrons ou à semi-conducteurs), comme la phase constante ou la phase aléatoire, ou des codes spécifiques tels que SZ8/64 conçu pour aider à la récupération du deuxième trajet.

Des exemples de différents systèmes d'émission sont présentés dans la Fig. 4-3.

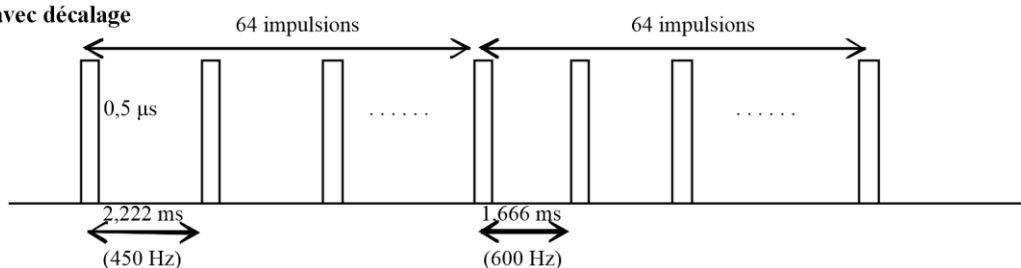
FIGURE 4-3

Types de systèmes d'émission des radars météorologiques

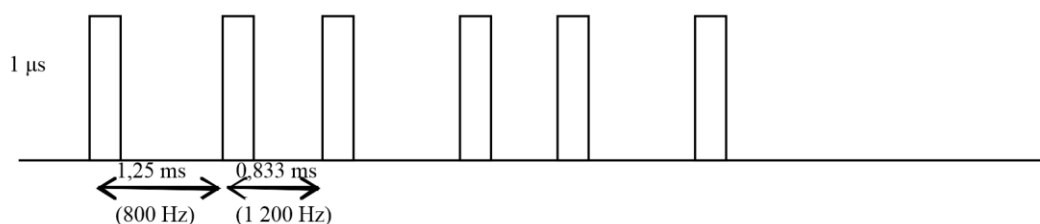
FRI fixe



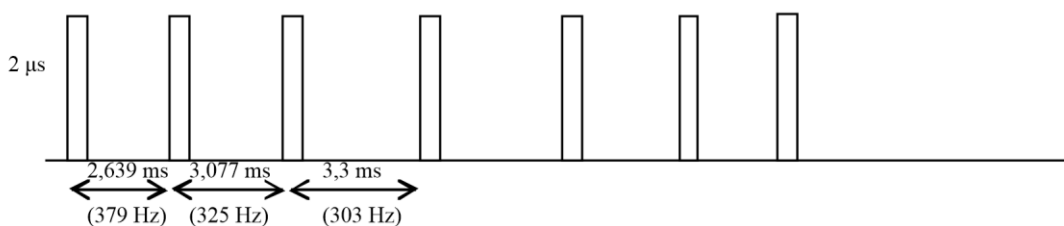
FRI avec décalage



Double durée de répétition des impulsions entrelacée (double FRI)



Triple durée de répétition des impulsions entrelacée (triple FRI)



Meteo-04-03

Ces différents systèmes d'émission sont utilisés par un certain nombre de radars dans leur stratégie de balayage, qui, pour différentes élévations et vitesses de rotation, fait intervenir un seul système d'émission.

Il convient de souligner que, d'un radar à l'autre, les valeurs de FRI et de largeur d'impulsion données dans ces exemples varient dans les intervalles définis ci-dessus. De plus, pour un système donné, la largeur d'impulsion peut varier d'une impulsion à l'autre.

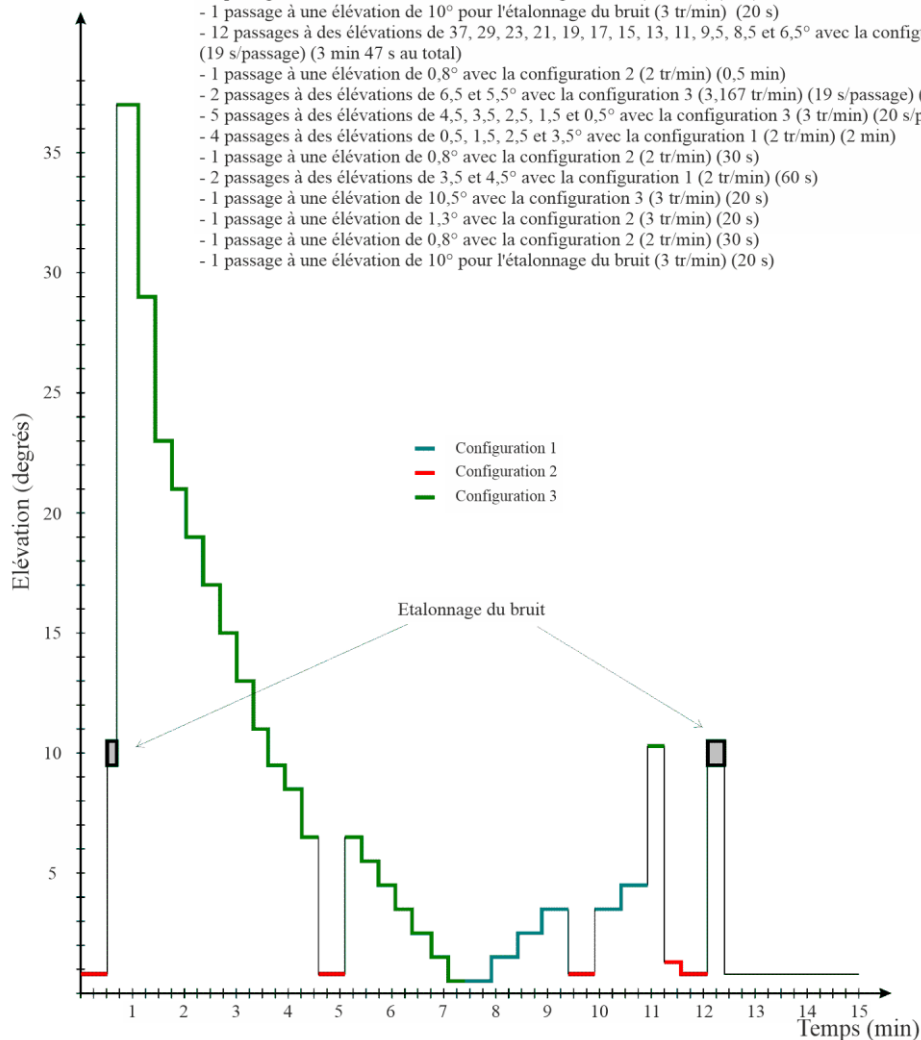
On trouvera ci-dessous un exemple de stratégie de balayage.

FIGURE 4-4

Description d'une stratégie de balayage d'un radar météorologique

Stratégie de balayage type (durée totale d'environ 15 min):

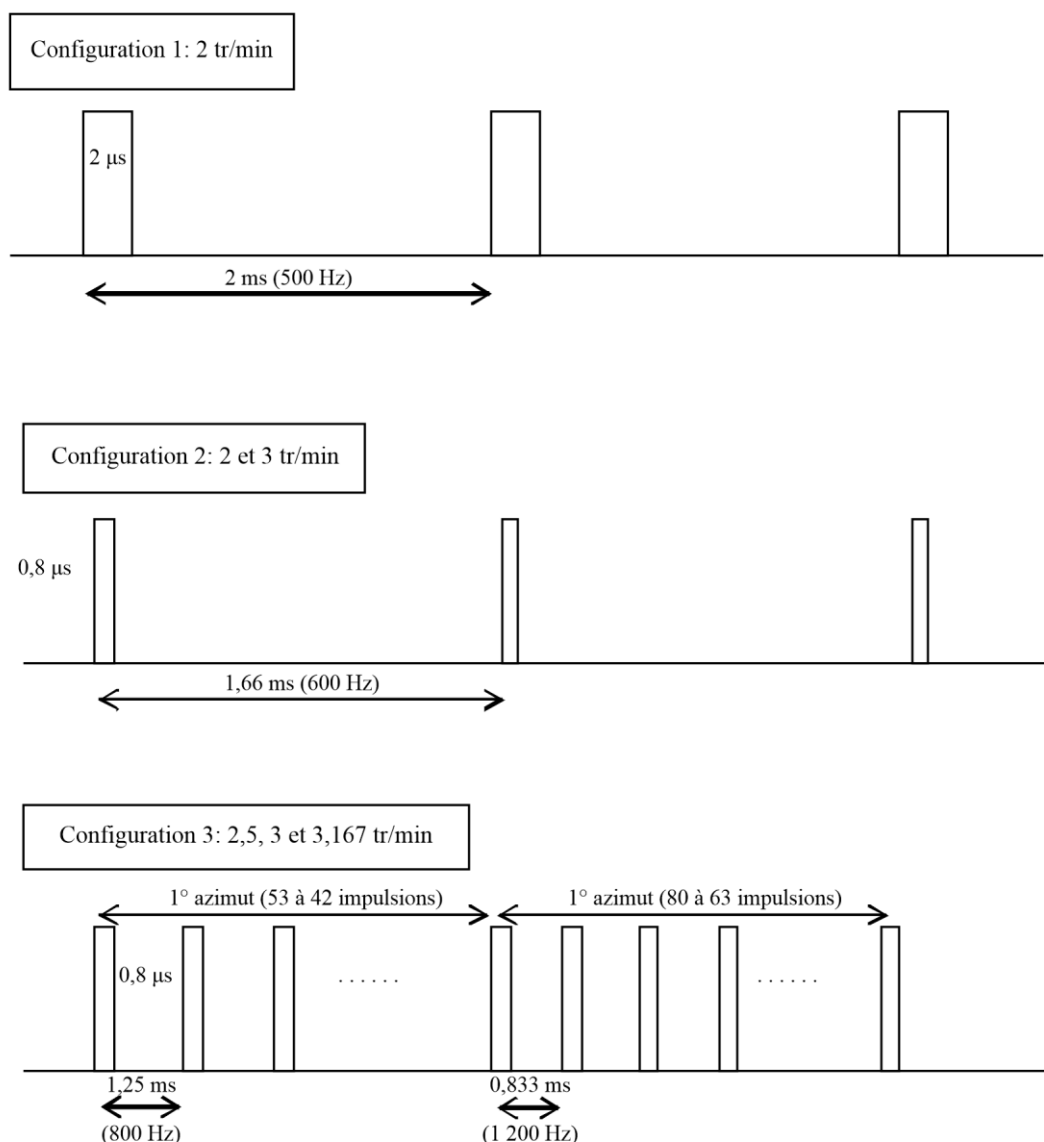
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 1 passage à une élévation de 10° pour l'étalonnage du bruit (3 tr/min) (20 s)
- 12 passages à des élévations de 37, 29, 23, 21, 19, 17, 15, 13, 11, 9,5, 8,5 et 6,5° avec la configuration 3 (3,167 tr/min) (19 s/passage) (3 min 47 s au total)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (0,5 min)
- 2 passages à des élévations de 6,5 et 5,5° avec la configuration 3 (3,167 tr/min) (19 s/passage) (38 s au total)
- 5 passages à des élévations de 4,5, 3,5, 2,5, 1,5 et 0,5° avec la configuration 3 (3 tr/min) (20 s/passage) (40 s au total)
- 4 passages à des élévations de 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5° avec la configuration 1 (2 tr/min) (2 min)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 2 passages à des élévations de 3,5 et 4,5° avec la configuration 1 (2 tr/min) (60 s)
- 1 passage à une élévation de 10,5° avec la configuration 3 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 1,3° avec la configuration 2 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 1 passage à une élévation de 10° pour l'étalonnage du bruit (3 tr/min) (20 s)



Meteo-04-04

FIGURE 4-5

Systèmes d'émission associés à la stratégie de balayage de la Fig. 4-4



4.2.4.2 Étalonnage du bruit

Étant donné que le signal d'écho parvenant aux radars météorologiques est faible, il faut en extraire le niveau de bruit afin d'obtenir les mesures les plus précises possible et des produits météorologiques pertinents.

Soit N le niveau de bruit et S le signal utile (c'est-à-dire le signal d'écho météorologique), les radars météorologiques procèdent comme suit:

- 1) Pour chaque fenêtre, le radar mesure le signal d'écho, qui correspond au signal utile (S) et au bruit (N), à savoir $N + S$.
- 2) Pour obtenir S , le radar extrait de $N + S$ le niveau de bruit, N .
- 3) Puis, à partir de S , le radar est capable de déterminer tous les produits météorologiques, tels que les précipitations (dBz) ou la vitesse du vent, par analyse Doppler.

Afin d'obtenir les produits météorologiques les plus précis possibles, le signal S doit être aussi précis que possible, ce qui signifie que l'étalonnage du bruit du radar, appelé «contrôle du zéro», est extrêmement important.

Le «contrôle du zéro» est donc réalisé régulièrement, soit pendant des émissions normales du radar (par estimation), soit pendant des périodes spécifiques (voir l'exemple de stratégie de balayage ci-dessous) pendant lesquelles le bruit est mesuré.

La mesure de l'étalonnage du bruit est en principe réalisée sans transmission du radar, ce qui pourrait en particulier avoir un impact sur la conception de certains systèmes radioélectriques qui cherchent à détecter les signaux du radar pour réduire les brouillages.

Dans tous les cas, les brouillages reçus pendant l'étalonnage du bruit vont systématiquement altérer toutes les collectes de données ultérieures jusqu'à ce que l'étalonnage suivant sans brouillage soit réalisé. Ces brouillages pourraient entraîner une sous-estimation des intensités de précipitations par rapport aux intensités réelles, avec des conséquences évidentes sur les processus opérationnels et les processus d'alerte.

4.2.4.3 Modes de fonctionnement des radars météorologiques

Les radars de certains réseaux, par exemple NEXRAD aux États-Unis, fonctionnent dans deux modes sélectionnables par l'utilisateur: mode temps clair et mode précipitations. Le mode précipitations peut être sélectionné manuellement à tout moment pendant le fonctionnement ou peut être activé automatiquement chaque fois que le radar météorologique détecte des précipitations (sur la base de valeurs prédéterminées de la réflectivité dans la zone de couverture). Le radar peut repasser au mode temps clair manuellement, ou automatiquement si des précipitations ne sont pas détectées (sur la base des valeurs prédéterminées de la couverture de surface limite et de la durée).

D'une manière générale, les radars météorologiques mettent à profit les deux modes.

4.2.4.3.1 Mode temps clair

Le mode temps clair permet aux radars météorologiques de détecter des signes annonciateurs de précipitations.

Certaines petites variations de vitesse et de densité de l'air permettent de détecter des précipitations potentielles. Le radar utilise une vitesse de balayage faible, couplée avec une faible FRI, pour une sensibilité élevée, idéale pour des modifications très subtiles des conditions atmosphériques à des distances élevées. Le mode temps clair est particulièrement utile lorsque l'activité de convection est faible voire inexistante dans la zone de couverture du radar, et convient parfaitement pour détecter les signes annonciateurs de tempêtes ou d'autres types de phénomènes météorologiques graves, et de faibles chutes de neige.

La sensibilité élevée du radar météorologique est liée au schéma de balayage volumique dans le mode temps clair. En choisissant un schéma dans le mode temps clair, l'antenne du radar est capable de rester pendant une période étendue dans n'importe quel volume spatial et reçoit plusieurs échos, tout en permettant un fonctionnement avec un faible rapport signal/bruit (S/N). Cette configuration combine deux paramètres clés, une grande largeur d'impulsion pour une transmission d'énergie accrue et une faible FRI pour un temps d'écoute prolongé. Ensemble, ces éléments donnent approximativement une puissance d'écho additionnelle de 8 dB pour un dBz donné de réflectivité et contribuent ainsi à améliorer significativement la détection des signaux atmosphériques faibles.

4.2.4.3.2 Mode précipitations

Le mode précipitations a une finalité distincte de celle du mode temps clair. La vitesse de balayage pour le mode précipitations est fonction de l'angle d'élévation. Cette dépendance permet d'avoir le nombre le plus élevé possible d'angles d'élévation pour échantillonner le volume radar total. Dans le mode précipitations, on tire parti de multiples schémas de couverture volumique (VCP) pour mettre en œuvre différents types de stratégies de balayage (voir l'exemple du § 4.2) avec un échantillonnage différent en fonction de l'élévation. Le mode précipitations cible précisément les phénomènes météorologiques comme les tempêtes convectives (grêle, orages violents, tornades, par exemple), des événements d'intenses précipitations et des systèmes synoptiques à grande échelle.

4.2.4.4 Suppression des échos fixes

Les échos fixes comprennent plusieurs composantes fixes cachées, une qui inclut la diffusion basse fréquence et une autre les fréquences supérieures (par exemple dues à la végétation qui ondule sous le vent). Ceux dus à d'autres cibles que les précipitations, appelés fouillis radar, doivent être éliminés. On a recours à différentes méthodes de suppression du fouillis de sol avec les radars actuels.

- Utilisation d'un filtre Doppler passe-haut pour réduire le fouillis de sol à faible vitesse. Ce procédé est efficace si la vitesse radiale du vent dépasse la fréquence de coupure du filtre.
- Application du filtrage statistique qui exploite les différences en termes de variations de la réflectivité pour distinguer les précipitations (forte variabilité spatiale/temporelle) du fouillis de sol (retours stables statistiquement), puisque les variations de la réflectivité de la pluie sont supérieures aux variations de la réflectivité du fouillis de sol. Cette méthode donne de bons résultats même lorsque la vitesse radiale de la pluie est nulle (pluie tangentielle).
- Recours au radar polarimétrique pour distinguer la pluie du fouillis de sol.

4.2.5 Les radars Doppler

Les radars Doppler, employés depuis le début des années 1970 en recherche atmosphérique pour mesurer la convection dans les orages et pour détecter les fronts de rafale, sont maintenant couramment utilisés en exploitation par la météorologie. Contrairement aux anciens radars, ces appareils sont non seulement capables de déterminer l'existence et la position de cibles réflectrices mais également leur vitesse radiale. Cela permet de mesurer la vitesse des vents, de détecter les tornades et de mesurer un champ de vent à l'aide du balayage à affichage azimutal de la vitesse.

La possibilité de supprimer le fouillis de sol est importante. Les progrès récents dans ce domaine portent sur des émetteurs cohérents, comme les klystrons (qui sont aujourd'hui à la pointe de la technologie), les tubes à ondes progressives (TOP) ou les semi-conducteurs. Dans le radar classique, la pureté de phase du spectre était limitée par la technologie du magnétron de la génération précédente, mais les magnétrons modernes offrent une pureté de phase suffisante pour annuler efficacement le fouillis de sol. Quoi qu'il en soit, les magnétrons existants peuvent produire de manière économique une puissance moyenne élevée qui permet d'accroître le rapport signal/bruit.

4.2.6 Radars à double polarisation

Les radars polarimétriques ou à double polarisation émettent à la fois une impulsion à polarisation horizontale (h) et une impulsion à polarisation verticale (v). Cette technologie permet de déterminer la nature des diffuseurs par télé-détection de leur forme et de leur homogénéité. Ils sont nettement plus performants que les systèmes non polarimétriques en ce qui concerne l'estimation des précipitations, la classification des précipitations, la qualité des données et la détection des risques météorologiques.

Pour les estimations des précipitations, on utilise maintenant le fait que les gouttes de pluie ont tendance à s'aplatir dans leur chute (sphéroïdes aplatis), phénomène qui augmente avec la taille des gouttes dans le sens horizontal. Une combinaison de la réflectivité et des champs pour les deux polarisations permet de mieux évaluer les coefficients A et b de la relation $Z-R$ dans l'équation (4-10). D'autres algorithmes, basés sur la phase différentielle $\phi_h - \phi_v$ et l'affaiblissement différentiel, sont jugés très prometteurs pour améliorer encore la précision des estimations des précipitations.

Outre leur forme, les hydrométéores se distinguent par leurs constantes diélectriques dépendantes de la fréquence, facteur déterminant dans le calcul des sections de diffusion et d'affaiblissement. Les propriétés diélectriques des hydrométéores varient selon la fréquence radar, l'eau liquide et la glace réagissant de manière très différente. Compte tenu de ces caractéristiques, on a mis en œuvre des algorithmes pouvant distinguer la pluie de la neige et quantifier l'eau liquide et la glace dans les nuages au moyen de mesures de l'affaiblissement différentiel.

4.2.7 Données de base produites par les radars météorologiques classiques

Un radar météorologique Doppler produit trois catégories de données de base à partir des échos: réflectivité de base, vitesse radiale moyenne et largeur spectrale. Tous les produits de niveau supérieur sont générés à partir de ces trois produits de base. La précision des produits de base fait souvent partie des spécifications fondamentales de performance pour la conception des radars. Sans la précision requise à ce niveau inférieur, comme indiqué au Tableau 4-2, la précision des produits dérivés de niveau supérieur ne peut pas être atteinte.

TABLEAU 4-2

Précision requise des données de base pour un radar météorologique type

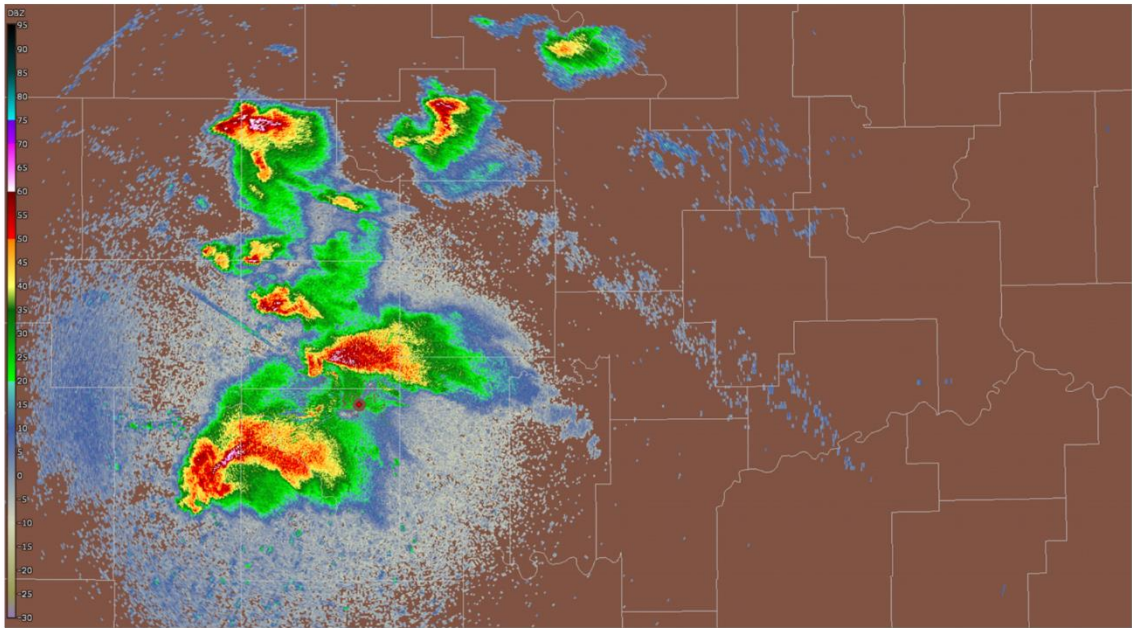
Données de base produites	Précision nominale requise
Réflectivité de base	< 1 dB
Vitesse radiale moyenne	< 1 m/s
Largeur spectrale	< 1 m/s

4.2.7.1 Réflectivité de base

La réflectivité de base est utilisée dans de multiples applications des radars météorologiques, la plus importante étant l'estimation de l'intensité des précipitations. La réflectivité de base est l'intensité des impulsions échos, et elle est calculée à partir d'une moyenne linéaire de la puissance d'écho. La puissance des éventuels brouillages causés au radar s'ajoute à la puissance des impulsions échos, ce qui biaise les valeurs de la réflectivité. Les mesures de la réflectivité peuvent être compromises si le biais est supérieur à la précision requise des données de base.

FIGURE 4-6

Exemple de larges supercellules observées au cours d'une tornade avec une réflectivité obtenue à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC

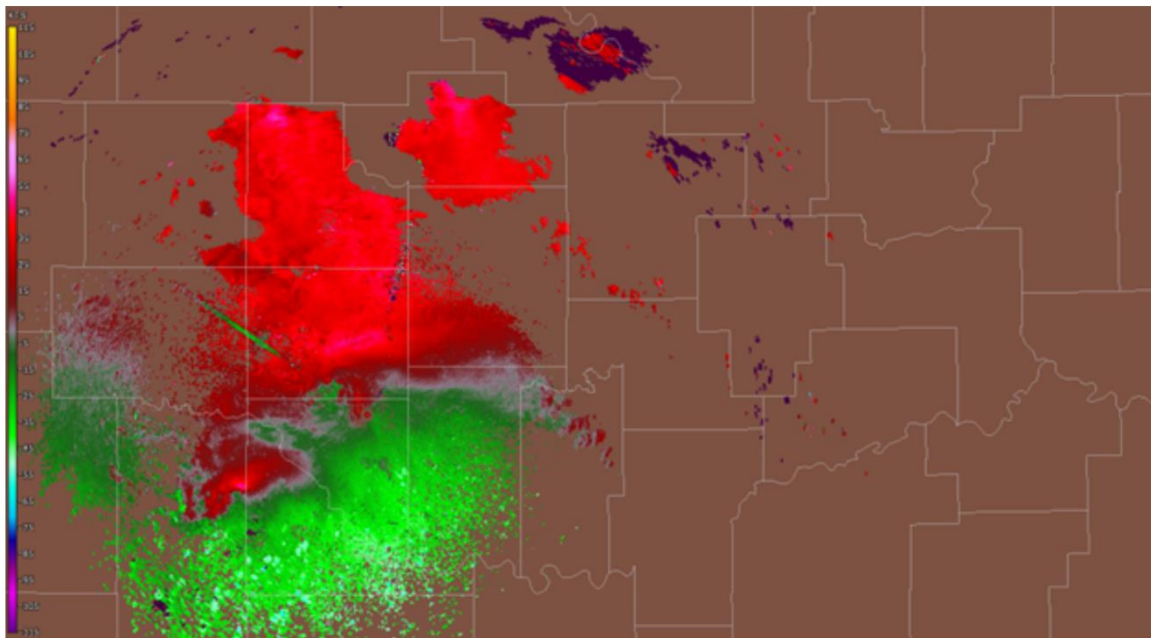


4.2.7.2 Vitesse radiale moyenne

La vitesse radiale moyenne est également appelée vitesse Doppler moyenne, et représente la vitesse moyenne des cibles pondérée par la réflectivité dans un échantillon de volume donné. Ce produit de données de base, qui constitue le premier moment de la densité spectrale Doppler, est généralement obtenu à partir de multiples impulsions successives à travers l'analyse de la fonction d'autocorrélation complexe avec décalage unique. L'argument de covariance complexe donne une estimation du déplacement angulaire du vecteur de signal Doppler entre les impulsions radar qui se succèdent. La vitesse angulaire du vecteur Doppler est égale au déplacement divisé par l'intervalle de temps entre impulsions. Le spectre Doppler complet est caractéristique de la distribution intégrale des vitesses radiales dans le volume de résolution, chaque composante de la vitesse étant pondérée par la réflectivité des cibles et la fonction de pondération du faisceau du radar.

FIGURE 4-7

Exemple de larges supercellules observées au cours d'une tornade sous l'angle de la vitesse radiale moyenne obtenue à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC



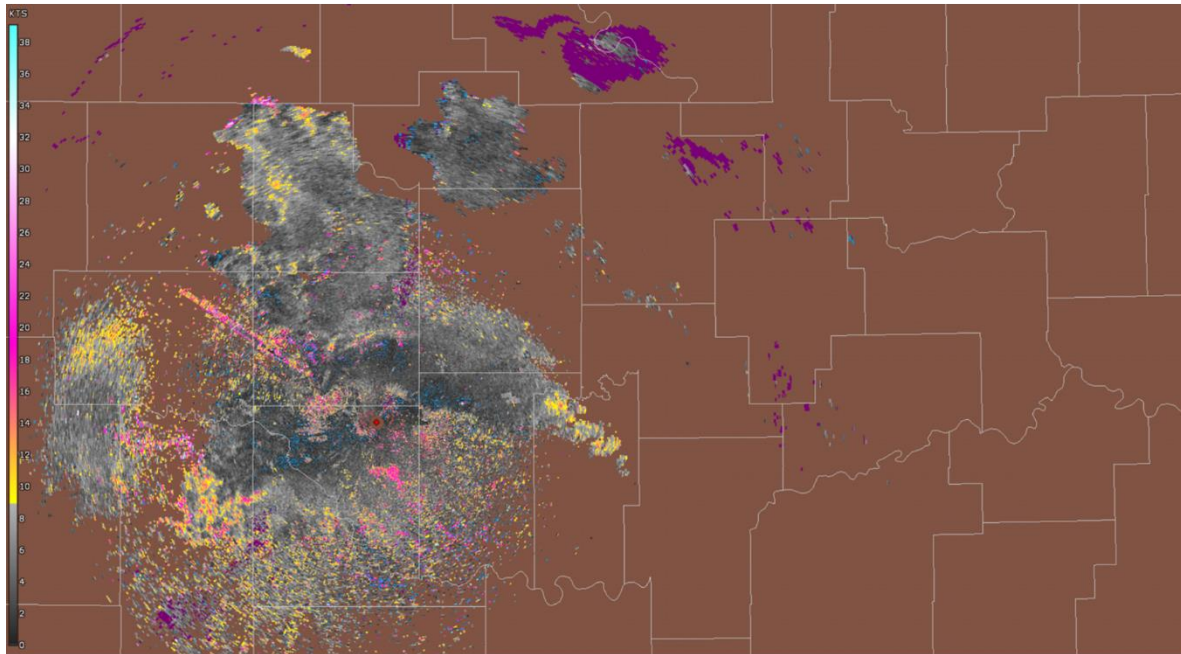
Meteo-04-07

4.2.7.3 Largeur spectrale

Dans le cas des systèmes de radars météorologiques, la largeur spectrale est obtenue à partir de la corrélation avec décalage unique dans l'hypothèse d'une densité spectrale gaussienne. C'est une mesure de la dispersion des vitesses dans le volume échantillon du radar et c'est l'écart type du spectre de vitesse. La largeur spectrale dépend des gradients de réflectivité et de vitesse à travers le volume radar et de la turbulence dans ce volume [Doviak and Zrnic, 1984].

FIGURE 4-8

Exemple de larges supercellules observées au cours d'une tornade sous l'angle de la largeur du spectre obtenue à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC



Meteo-04-08

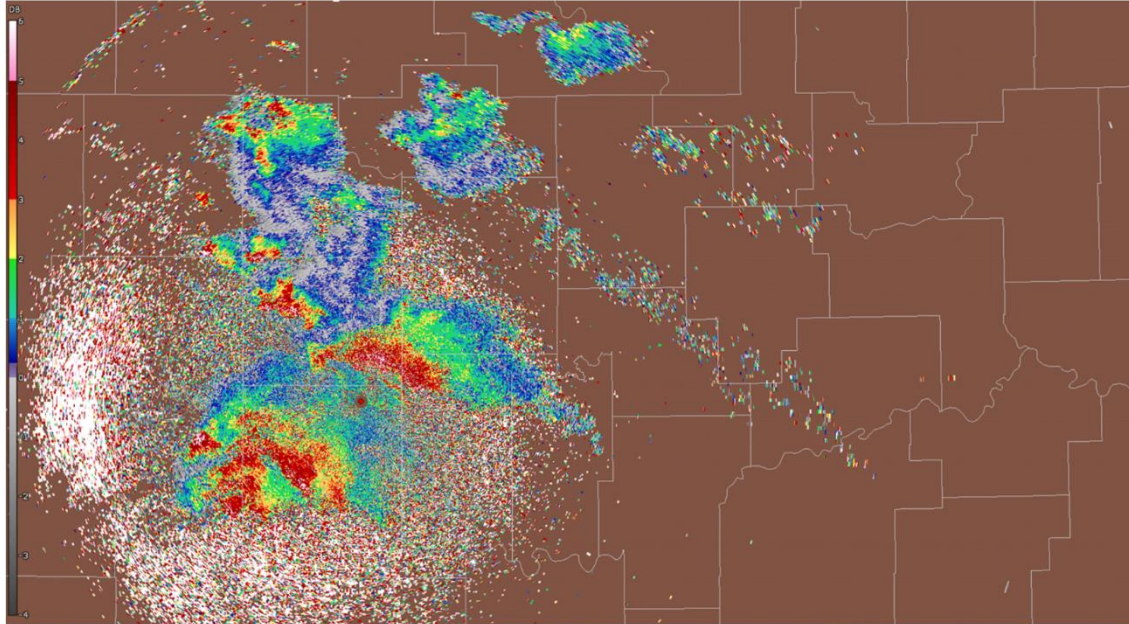
4.2.7.4 Produits de radars météorologiques à double polarisation

4.2.7.4.1 Réflectivité différentielle

La réflectivité différentielle est un produit radar polarimétrique fondamental se définissant comme le rapport entre les puissances réfléchies horizontalement et verticalement. Entre autres choses, c'est un bon indicateur de la forme des particules, qui, à son tour, donne une bonne estimation de la taille moyenne des particules.

FIGURE 4-9

Exemple de larges supercellules au cours d'une tornade observées sous l'angle de la réflectivité différentielle obtenue à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC



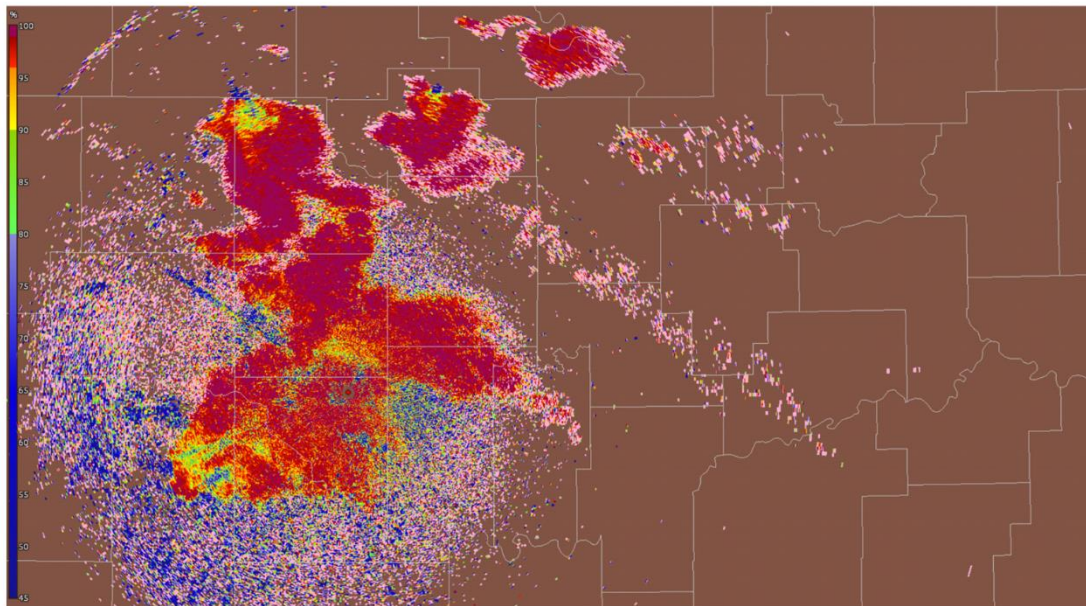
Meteo-04-09

4.2.7.4.2 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est un produit de radar météorologique polarimétrique et c'est une corrélation statistique entre les signaux de retour polarisés horizontalement et verticalement. Le coefficient de corrélation décrit les analogies dans les caractéristiques de rétrodiffusion des échos polarisés horizontalement et verticalement. C'est un bon indicateur des régions dans lesquelles différents types de précipitations sont mélangés (par exemple, pluie et neige).

FIGURE 4-10

Exemple de larges supercellules au cours d'une tornade observées sous l'angle du coefficient de corrélation obtenu à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC



Meteo-04-10

4.2.7.4.3 Taux de dépolarisation linéaire

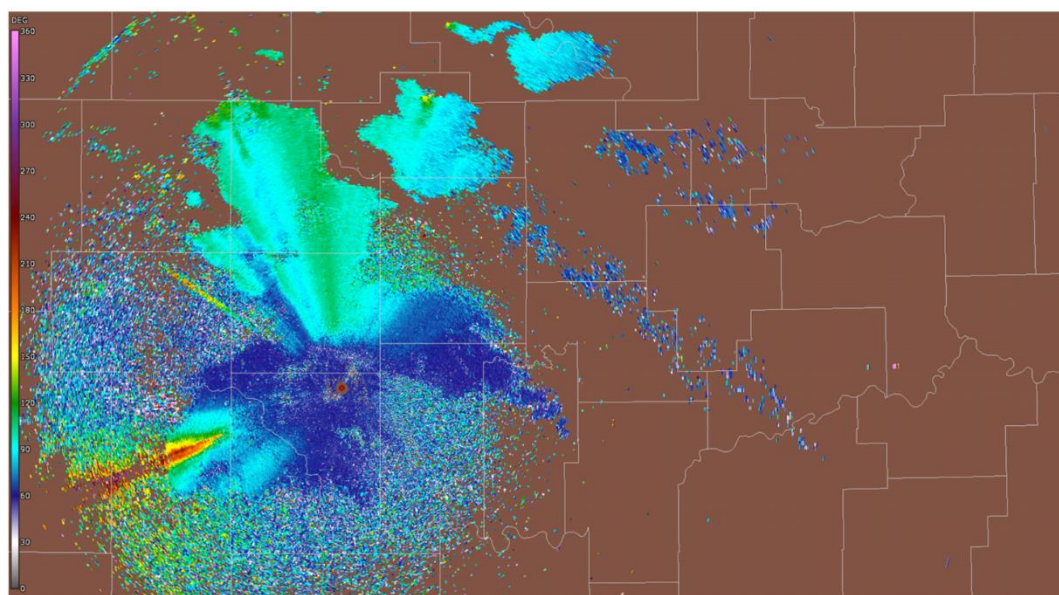
Le taux de dépolarisation linéaire est un autre produit de radar polarimétrique, qui donne le taux de puissance reçue dans la polarisation orthogonale (transmission verticale à horizontale, ou transmission horizontale à verticale) et de puissance reçue dans la même polarisation que la transmission. Tout comme le coefficient de corrélation, c'est un bon indicateur des régions dans lesquelles différents types de précipitations sont mélangés.

4.2.7.4.4 Phase différentielle

La phase différentielle est une comparaison de la différence de phase retournée entre les impulsions horizontale et verticale. Cette différence de phase est due à la différence de nombre de cycles d'onde (ou longueurs d'onde) le long du trajet de propagation pour les ondes polarisées horizontalement et verticalement. Il ne faut pas la confondre avec le décalage de fréquence Doppler, qui est dû au déplacement des nuages et des particules de précipitation. Contrairement à la réflectivité différentielle, au coefficient de corrélation et au taux de dépolarisation linéaire, qui dépendent tous de la puissance réfléchie, la phase différentielle est un «effet de propagation». Elle donne également une très bonne estimation de l'intensité des précipitations et de l'affaiblissement dû à la pluie. La phase différentielle spécifique (non illustrée), obtenue à partir de la phase différentielle, donne la vitesse du décalage de la phase. Elle est particulièrement utile pour identifier les régions à fortes précipitations.

FIGURE 4-11

Exemple de larges supercellules au cours d'une tornade observées sous l'angle de la phase différentielle obtenue à partir d'un radar KTLX le 20 avril 2023 à 00:10 UTC



Meteo-04-11

4.2.7.5 Données dérivées produites

À partir des données de base produites, le processeur produit des données dérivées de niveau supérieur pour l'utilisateur du radar. Le présent document ne donne pas de détail sur les produits dérivés car ceux-ci varient d'un radar à l'autre et sont relativement nombreux. Pour faire en sorte que les données dérivées produites soient précises, il faut disposer de données de base produites précises.

4.2.8 Diagramme de l'antenne et comportement dynamique de l'antenne

4.2.8.1 Diagrammes d'antenne

Les radars météorologiques utilisent généralement des antennes de type réflecteur parabolique qui émettent un faisceau-crayon. On utilise le comportement dynamique de l'antenne dans les plans horizontal et vertical pour effectuer un balayage volumique. Un exemple de comportement dynamique est décrit au § 4.2.4.1 ci-dessus.

Trois modèles mathématiques de diagramme d'antenne sont actuellement utilisés pour les radars météorologiques; ils sont donnés dans les Recommandations UIT-R F.699 (valeurs de crête pour les lobes latéraux), UIT-R F.1245 (valeurs moyennes pour les lobes latéraux) et UIT-R M.1652. Représentatifs d'antennes paraboliques, ces modèles ont tendance à surestimer légèrement l'ouverture du faisceau-crayon.

Il est à noter qu'à l'heure actuelle, l'UIT-R ne dispose d'aucune équation définie pour représenter les diagrammes de rayonnement d'antenne radar à faisceau-crayon.

4.2.8.2 Mouvement de l'antenne pour un balayage volumique

La couverture horizontale et verticale nécessaire pour un balayage volumique afin de produire un balayage horizontal, est obtenue par une rotation de l'antenne dans le plan horizontal à un angle d'élévation constant. On modifie l'angle d'élévation de l'antenne d'un incrément prédéfini après chaque balayage. L'angle d'élévation le plus faible est généralement compris entre -2° et 1° , et le plus élevé entre 20° et 30° , mais pour certaines applications, il peut aller jusqu'à 60° . Pour un étalonnage de la réflectivité différentielle (Z_{dr}), l'antenne pointe généralement à un angle d'élévation de 90° et effectue une rotation d'au moins 360° , ce que l'on appelle un balayage «bird-bath». La vitesse de rotation de l'antenne varie en fonction des conditions météorologiques et du produit nécessaire à l'instant considéré. La vitesse de rotation, l'intervalle des angles d'élévation, les incréments intermédiaires d'angle d'élévation et la fréquence de répétition des impulsions sont réglés de façon

à optimiser la performance. Une rotation d'antenne lente permet de rester longtemps sur chaque radiale pour une sensibilité maximale.

Une vitesse de rotation d'antenne élevée permet à l'opérateur d'effectuer un balayage volumique en un temps court lorsqu'on souhaite couvrir la totalité du volume aussi rapidement que possible. La variation des incréments d'angle d'élévation et de la vitesse de rotation font que la durée d'acquisition du balayage volumique est comprise entre une minute et 15 min. Les longues durées nécessaires pour un balayage volumique complet, par rapport à d'autres radars qui effectuent une rotation à un angle d'élévation constant, s'expliquent par la nécessité d'obtenir un échantillonnage de résultats significatif sur le plan statistique.

4.2.8.3 Autres stratégies de mouvement de l'antenne

Les radars météorologiques utilisent aussi d'autres stratégies de mouvement de l'antenne pour des applications spéciales et la recherche.

Il peut s'agir notamment des stratégies courantes ci-après:

- Balayages sectoriels: obtenir une partie de coupe à un angle d'élévation donné, ou balayages volumiques sectoriels: effectuer un balayage volumique sur un intervalle d'angles d'azimut de 360° à différents angles d'élévation.
- Balayages dans une direction de pointage unique: l'antenne est maintenue à un angle d'azimut et à un angle d'élévation constants pour surveiller un point précis dans l'atmosphère.
- Balayages RHI (*Range Height Indicator*, indicateur distance/altitude): l'antenne est maintenue à un angle d'azimut constant et balaie en élévation au lieu d'obtenir des informations verticales détaillées à un seul relèvement.
- Balayages de trame: petite plaque rectangulaire limitée par un angle d'azimut et des angles d'élévation fixes balayée en zigzag. Ce type de balayage est fréquemment utilisé pour observer le Soleil dans le cadre d'activités d'étalonnage solaire.

4.2.9 Besoins actuels et futurs de spectre

À l'instar de nombreux systèmes radar, le choix de la bande de fréquences (ou longueur d'onde λ) résulte d'un compromis entre le rapport portée/réflexivité, qui varie selon λ^{-4} , l'affaiblissement dû à la pluie, la précision des variables météorologiques et le coût. L'affaiblissement dû aux précipitations, qui baisse à mesure que λ augmente et devient négligeable aux longueurs d'onde décimétriques, est le principal aspect à prendre en considération. La bande Ka (au voisinage de 35 GHz avec une longueur d'onde de 8,6 mm) convient bien à la détection des petites gouttes d'eau dans les nuages sans précipitations. La bande S (2 700-3 000 MHz, longueur d'onde de 10 cm) peut être privilégiée quand on veut déceler les fortes pluies à de très longues distances (jusqu'à 300 km) sous les climats tropicaux et tempérés.

4.2.9.1 Bandes de fréquences utilisées par les radars météorologiques

Les trois bandes les plus couramment employées par les radars météorologiques sont la bande S (2 700-3 000 MHz), la bande C (5 250-5 725 MHz) et la bande X (9 100-9 700 MHz).

La bande S (2 700-3 000 MHz, avec une longueur d'onde nominale de 10 cm) est, d'une manière générale, le meilleur choix en termes de précision quantitative et de performance pour les longues distances, en raison des faibles valeurs de l'affaiblissement dû à l'absorption par les gaz et de l'affaiblissement dû aux précipitations (Fabry, 2015; Doviak, 1993). La grande longueur d'onde permet en outre d'atténuer les problèmes d'ambiguïté Doppler concernant la distance (Doviak, 1978 et 1979). Cependant, le coût est un facteur à prendre en compte dans le choix de la bande S, car la grande longueur d'onde nécessite des composants matériels de grandes dimensions et une grande antenne pour une ouverture de faisceau et un gain donnés.

La bande C (5 250-5 725 MHz, avec une longueur d'onde de 5 cm) est généralement employée sous les climats tempérés et dans les pays dans lesquels les zones géographiques à couvrir sont relativement peu étendues. Elle représente un bon compromis entre les paramètres susmentionnés, car elle permet de détecter la pluie à de longues distances (jusqu'à 200 km), même si la quantification est quelque peu limitée au-delà de 100 km, mais elle est plus avantageuse financièrement du fait de la moindre puissance nécessaire et de la plus petite taille d'antenne par rapport aux radars à plus basse fréquence ayant la même résolution spatiale.

Les radars météorologiques en bande X (9 100-9 700 MHz, avec une longueur d'onde de 3 cm) sont plus sensibles et peuvent détecter de plus petites particules mais, comme ils subissent un affaiblissement plus fort, ils servent uniquement pour l'observation météorologique à très faibles distances (environ 50 km). Ces radars servent aux études sur la formation des nuages, car elles peuvent détecter de minuscules particules d'eau. Ils détectent également les faibles précipitations, comme la neige. De surcroît, du fait de leur petite taille, les radars météorologiques en bande X sont souvent utilisés comme unités mobiles portatives. Ces radars sont également utilisés pour détecter les variations des vents, en particulier à des fins aéronautiques (cisaillement du vent, vortex, etc.).

4.2.9.2 Affaiblissement

Les ondes électromagnétiques sont affaiblies par la vapeur d'eau, l'absorption par les gaz, les nuages et les précipitations lorsqu'elles se propagent dans l'atmosphère (Fabry, 2015). L'affaiblissement est avant tout dû aux précipitations, et plus particulièrement aux fortes pluies. Les propriétés physiques de la propagation font que le taux d'affaiblissement (en dB par unité de longueur) dans la bande C (5 cm) est près de six à huit fois plus élevé que dans la bande S (10 cm), en fonction des intensités des précipitations [Bean et Dutton, 1966, Burrows et Attwood, 1949]. Dans la bande X, la situation est bien pire, avec des taux d'affaiblissement plus de 100 fois plus élevés que dans la bande S et plus de 15 fois plus élevés que dans la bande C pour une intensité des précipitations de 6 mm/h.

Les graves incidences de l'affaiblissement atmosphérique aux petites longueurs d'ondes sont bien décrites dans la littérature. Des comparaisons directes de la performance entre des radars à 5 et 10 cm, effectuées par le National Severe Storms Laboratory dans les années 1980, ont démontré que l'utilisation d'une longueur d'onde de 5 cm en cas de fortes pluies pouvait avoir de graves conséquences sur les activités de prévision et d'alerte en cas de forte tempête (Allen, 1981).

La correction de l'affaiblissement présente d'importants problèmes techniques pour les petites longueurs d'ondes, en raison des exigences strictes de précision de mesure de la puissance (Hitschfeld, 1954). Les valeurs de précision d'étalonnage requises pour la réflectivité dans les bandes C et X, nécessaires pour les algorithmes de correction de l'affaiblissement, sont supérieures aux valeurs actuellement requises dans le programme NEXRAD (*Next Generation Radar*) des États-Unis et sont difficiles à respecter dans la pratique. L'introduction de la polarimétrie dans les radars météorologiques a beaucoup changé les choses, car la phase différentielle fournit des estimations de l'affaiblissement qui ne dépendent pas de la précision d'étalonnage pour la réflectivité.

Un problème quelque peu lié à l'affaiblissement entraîne la nécessité pour les radars météorologiques d'utiliser une polarisation linéaire. Lorsque le radar en bande S WSR-88D (NEXRAD Weather Surveillance Radar – 1988 Doppler) des États-Unis a été déployé, le système comportait une polarisation elliptique et ce, pour des raisons d'efficacité et de coût de la conception du matériel utilisé pour l'émission et la réception du signal RF. Cependant, les gestionnaires du système se sont rapidement aperçus que la dépolarisation lors des fortes pluies avait des répercussions importantes et le radar a été modifié pour utiliser une polarisation horizontale linéaire (Sirmans, 1993). Étant donné que la polarisation est un facteur entrant en ligne de compte pour ce qui est de la sensibilité aux brouillages, il convient de préserver la possibilité qui est actuellement offerte d'utiliser une polarisation linéaire (horizontale ou verticale).

4.2.9.3 Estimations de la portée et de la vitesse non ambiguës maximales

Le choix de la fréquence du radar définit également les caractéristiques de performance en matière de vitesse maximale du vent mesurable et de portée maximale. Avec le radar à impulsion, le temps entre les impulsions détermine la portée non ambiguë⁶ maximale de l'appareil. Le signal réfléchi doit revenir au récepteur avant l'émission de l'impulsion suivante, faute de quoi il devient ambigu. Dans les systèmes radar Doppler, la portée et la vitesse non ambiguës maximales pouvant être mesurées sont déterminées par la fréquence de répétition des impulsions (FRI) (Doviak, 1979). Le concepteur de l'appareil est restreint par le produit portée-vitesse non ambiguë, une constante définie de la façon suivante:

⁶ La portée non ambiguë maximale est la distance maximum que peut parcourir une impulsion émise aller-retour jusqu'au radar avant l'émission de la prochaine impulsion. Autrement dit, c'est la distance maximum aller-retour d'un signal radar entre deux impulsions tout en continuant de fournir des informations fiables.

$$R_m \cdot V_m = c \frac{\lambda}{8} \quad (4-11)$$

où:

R_m : portée non ambiguë du radar (portée maximale de mesure par le radar)

V_m : vitesse non ambiguë du radar (vitesse maximale pouvant être mesurée)

c : vitesse de la lumière (3×10^8 m/s)

λ : longueur d'onde du signal radar.

La longueur d'onde du signal, établie par la fréquence radar, est le seul paramètre que l'on peut définir pour optimiser la portée maximale et la vitesse maximale. Sa réduction exige de diminuer la portée utile, la capacité effective de mesure de la vitesse ou les deux de manière proportionnelle à l'augmentation de la fréquence. Pour limiter l'ambiguïté et améliorer le produit portée-vitesse, il n'est pas rare que les radars météorologiques modernes, et plus particulièrement en bande C, utilisent plusieurs systèmes d'émission combinant différentes FRI (voir le § 4.2.4).

Les valeurs sont données pour différentes technologies – magnétrons, klystrons et TOP – la dernière ayant la capacité de produire des impulsions courtes caractérisées par un spectre plus large. Certains magnétrons présentent un déplacement de fréquence inférieur à 1 MHz sur une vaste gamme de températures ambiantes. La technique de compression des impulsions peut avoir besoin de davantage de spectre.

Même pour une grande longueur d'onde (bande S), il peut être difficile de parvenir à une performance radar acceptable sur de longues distances et pour un intervalle de vitesses étendu. Par exemple, dans le cadre du programme NEXRAD des États-Unis, il est fait appel à de nombreuses méthodes d'atténuation, notamment plusieurs balayages à la même élévation avec des PRI différentes et un codage de phase systématique. La difficulté est nettement accrue aux longueurs d'onde plus petites.

4.2.9.4 Cohérence d'écho

La limite de vitesse non ambiguë (fréquence de Nyquist) est déterminée par la relation entre la FRI et la longueur d'onde. Le co-intervalle de Nyquist (intervalle de vitesses non ambiguës) est directement proportionnel à la longueur d'onde. L'équation pertinente est la suivante:

$$V_a = \frac{\lambda \cdot FRI}{4} \quad (4-12)$$

Ainsi, pour une FRI donnée, la longueur d'onde détermine le co-intervalle de Nyquist, lequel limite la précision des estimations Doppler en termes de largeur spectrale. Lorsque la largeur spectrale devient grande par rapport au co-intervalle de Nyquist, les échantillons radar deviennent incohérents entre les impulsions et la précision des estimations diminue. L'augmentation de la largeur spectrale (élargissement spectral) peut être due à plusieurs facteurs – turbulences, cisaillements de vent, vitesses de chute, etc. (Fabry, 2015, section 5.2). Si la largeur spectrale est supérieure à environ $(2\pi)^{-1}$ fois le co-intervalle de Nyquist, la variance des estimations de vitesse Doppler augmente de manière exponentielle (Doviak, 1978).

Etant donné que les effets de turbulence et de cisaillement augmentent à mesure que le volume des échantillons radar augmente, la largeur spectrale est fonction de l'ouverture de faisceau et de la portée effectives du radar. La «portée de cohérence» peut être définie comme étant la portée maximale pour laquelle on peut obtenir des estimations Doppler de qualité acceptable. Pour une ouverture de faisceau donnée, il est préférable d'utiliser une grande longueur d'onde (par exemple 10 cm, bande S).

4.2.9.5 Effets de résonance – mesures quantitatives de l'intensité

La section transversale équivalente de rétrodiffusion des particules sphériques dépend dans une large mesure de la longueur d'onde du signal incident et du diamètre de la sphère (Rheinstein, 1968). Pour obtenir des estimations précises de la réflectivité, qui donnent les sections transversales de rétrodiffusion, la puissance retournée doit varier de manière linéaire en fonction de la taille des gouttes. Il faut donc que la rétrodiffusion radar ait lieu dans la région de Rayleigh et il convient d'éviter la région de Mie, qui est fortement non linéaire, pour les diamètres des gouttes de pluie normalement attendus (Fabry, 2015). En plus de l'affaiblissement, les effets de résonance peuvent avoir une incidence négative sur les estimations des variables polarimétriques (Zrnica, 2000). Comme décrit par Zrnica, à une longueur d'onde de 5 cm, une résonance se produit pour des gouttes de plus de 5 mm environ et les variables polarimétriques présentent un comportement non linéaire (non monotone), rendant impossibles des estimations quantitatives précises. Les effets sur le coefficient de corrélation sont tout à fait évidents pour la bande C, en particulier pour les valeurs de réflectivité supérieures à 30 dBZ (Ryzhkov, 2005).

L'incertitude dans la relation entre le diamètre des gouttes et la section transversale de rétrodiffusion dans la région de Mie peut empêcher d'obtenir des estimations de réflectivité acceptables pour une petite longueur d'onde. Aux longueurs d'onde d'affaiblissement, de petites erreurs dans les constantes d'étalonnage radar provoquent de grandes erreurs dans les intensités de pluie estimées (Hitschfeld, 1954).

4.2.9.6 Conclusions

Le choix de la gamme de fréquences pour les radars météorologiques est lié à la distance à couvrir. Si une longue distance doit être couverte ou dans les zones géographiques dans lesquelles les fortes pluies sont fréquentes, la bande S permet d'obtenir des estimations de meilleure qualité pour les paramètres basés sur l'intensité et pour les estimations Doppler. Dans les autres zones géographiques, les radars en bande C conviennent mieux et pour les distances plus courtes, ce sont les radars en bande X qui conviennent mieux. Parmi les autres éléments importants entrant en ligne de compte, figurent l'incapacité d'atténuer suffisamment les ambiguïtés de distance et de vitesse en raison d'une distance sans équivoque plus courte requise par des FRI suffisamment élevées pour pouvoir effectuer des estimations Doppler précises. Les effets de résonance (diffusion de Mie/diffusion de Rayleigh) ont également une incidence sur la précision des données. Ils donnent lieu à des relations non linéaires entre la puissance de retour (signal rétrodiffusé) et les distributions de diamètre des gouttes de pluie, avec comme conséquences l'impossibilité d'obtenir une estimation précise de l'intensité de pluie et une dégradation importante des algorithmes d'identification des particules.

4.2.10 Risques de brouillage des radars météorologiques

Un radar météorologique détermine la distance des cibles (météorologiques) en mesurant le temps de parcours d'un signal qui va de l'émetteur vers la cible et revient vers le radar. Ce temps est fonction de la longueur du trajet. La précision avec laquelle il peut être mesuré dépend essentiellement des temps de montée et de descente. Plus les transitions sont brutales, plus la détection de la synchronisation est précise. Le front avant ou arrière d'une impulsion est le marqueur qui sert à mesurer le temps d'arrivée d'une impulsion réfléchie; plus il est court, plus les résultats ont des chances d'être précis.

Pour préserver des temps de transition brefs, il faut assurer la linéarité des phases au niveau de l'émetteur et du récepteur sur une grande largeur de bande. La largeur de bande du radar nécessaire est à peu près proportionnelle au plus court des deux temps de transition; ramener la largeur de bande du signal émis (en augmentant le filtrage, etc.) sous la valeur requise abaisse la précision du système. La largeur de bande du radar étonne souvent ceux qui ne connaissent pas les systèmes radar. La largeur de bande de 3 dB d'un radar météorologique peut être comprise entre 5 et 10 MHz. Le brouillage reçu dans cette bande détériore également la performance.

Il faut également rappeler que, si la plupart des transmissions de radiocommunication exigent seulement de franchir la distance qui sépare des antennes aux caractéristiques connues, un signal radar doit parcourir deux fois la même distance. Par ailleurs, la réflexion se fait sur des objets (gouttes de pluie, grêlons, débris emportés par le vent) qui ne sont pas conçus pour cela. Les signaux reçus sont donc extrêmement faibles.

Même si l'on a souvent recours à de grandes puissances d'émission et à des récepteurs très sensibles, les radars sont très sensibles au bruit et au brouillage.

4.2.10.1 Types de brouillage possibles

La capacité de radars météorologiques à donner une image précise de l'état actuel des conditions atmosphériques peut être détériorée par différentes formes de brouillage, jusqu'à empêcher les radars de détecter la vitesse et la direction du vent à différentes altitudes, de quantifier correctement les intensités et les cumuls de pluie, ou de localiser et suivre les ouragans, les typhons, les tornades, les coups de vent et autres phénomènes typiques des tempêtes. La sensibilité exceptionnelle nécessaire pour la détection météorologique rend les radars météorologiques particulièrement vulnérables aux brouillages, qui peuvent sérieusement nuire à leur efficacité opérationnelle. Il est donc important d'identifier les types de brouillage pouvant affecter les capacités opérationnelles des radars.

Les principaux sont des signaux de brouillage constants, ceux qui varient dans le temps et ceux qui s'apparentent à des impulsions. Une fois ces formes de brouillage identifiées, il convient d'établir le niveau maximum de brouillage que peuvent supporter les radars météorologiques avant que leur capacité de prévision soit compromise.

Les niveaux des critères de protection des radars météorologiques figurent dans la Recommandation UIT-R M.1849-1, en particulier $I/N = -10$ dB maximum pour le brouillage constant.

4.2.10.2 Impact d'un brouillage constant

4.2.10.2.1 Couverture géographique

Un brouillage constant peut limiter la portée opérationnelle du radar et donc la zone géographique couverte du fait de l'intensification du bruit correspondant.

Un critère de protection $I/N = -10$ dB correspond à une augmentation de bruit ou d'énergie de 0,5 dB.

Partant du principe que les radars sont étalonnés afin de faire coïncider le niveau de bruit du récepteur (c'est-à-dire environ -113 dBm) avec le niveau de réflectivité de 0 dBz à 100 km, une augmentation de bruit modifie les conditions nominales du radar, ce qui a pour effet de réduire la portée opérationnelle du radar.

La couverture des radars météorologiques types en bande C atteint actuellement environ 200 km. Le Tableau 4-3 indique les pertes de portée et de couverture en fonction de l'augmentation du brouillage et du bruit.

TABLEAU 4-3

Pertes de portée et de couverture

Augmentation du bruit (dB)	I/N (dB) correspondant	Perte de couverture (km)	Perte de couverture (% de la surface)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

4.2.10.2.2 Intensité des précipitations

Le brouillage constant peut également intensifier le signal reçu par le radar et influencer la mesure de réflectivité des différents types de précipitations (pluie, neige, grêlons, etc.). Le Tableau 4-4 confronte l'augmentation de brouillage (bruit) et ses effets en pourcentage sur les événements de différentes précipitations.

D'après la description donnée au § 4.1.2, l'intensité des précipitations correspondant à un certain niveau de réflectivité (dB) est donnée par:

$$Z = AR^B \quad (4-13)$$

où:

Z : réflectivité

A : constante de diffusion

B : multiplicateur d'intensité

et

$$Z = 10 \log Z \quad (\text{dBz})$$

où:

dBz: réflectivité (dB).

Une réorganisation des termes permet d'aboutir à la formule de R suivante:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6}\right)} \quad (4-14)$$

Dans l'hypothèse d'une augmentation d'énergie constante, C , l'intensité des précipitations résultante est la suivante:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}+C}{10}\right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6}\right)} \quad (4-15)$$

L'augmentation de l'intensité des précipitations en pourcentage est alors une constante qui est donnée par:

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16}\right)} - 1 \right) \quad (4-16)$$

Le Tableau 4-4 contient des valeurs types de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité pour plusieurs types de précipitations⁷.

TABLEAU 4-4

Valeurs de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité pour divers types de précipitations

Variables	Pluie stratiforme	Pluie convective	Neige	Grêle
Constante de diffusion (A)	200	500	2 000	2 000
Multiplicateur d'intensité (B)	1,6	1,5	2	1,29

Le Tableau 4-5 donne l'augmentation d'intensité en pourcentage pour plusieurs types de précipitations.

⁷ Les valeurs de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité pour une pluie stratiforme, une pluie convective, de la neige et de la grêle sont obtenues à partir de mesures.

TABLEAU 4-5

Augmentation de l'intensité des précipitations

Augmentation du bruit (dB)	I/N (dB) correspondant	Augm. intensité pour une pluie stratiforme (%)	Augm. intensité pour une pluie convective (%)	Augm. intensité pour de la neige (%)	Augm. intensité pour de la grêle (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

Ces calculs montrent que, quels que soient la valeur de l'intensité et le type de précipitations, le pourcentage de surestimation correspondant à une augmentation d'énergie constante donnée est également constant, et ne peut donc pas être négligé.

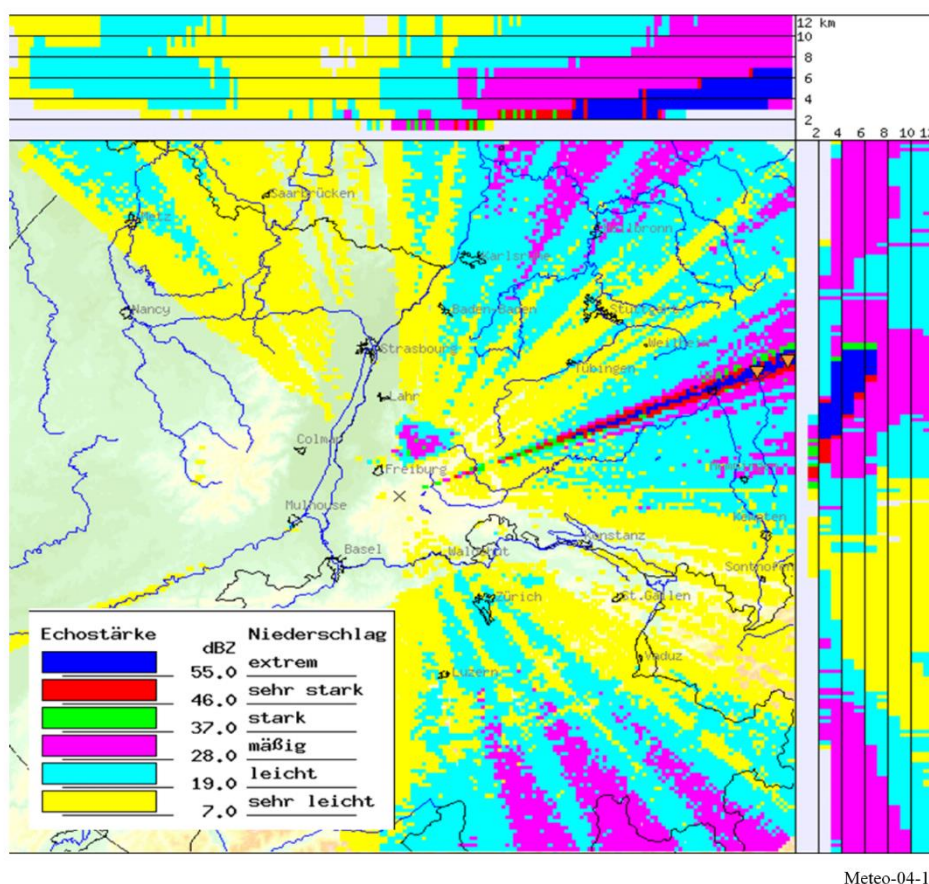
Par ailleurs, si on considère le calcul de la réflectivité pour une case distance donnée qui est fondée sur la moyenne (dBz), parmi toutes les estimations, et l'écart type associé, il convient de noter que l'augmentation du brouillage ne modifiera en rien la capacité des radars à détecter les foyers pluvieux (autrement dit, une mesure d'autre chose qu'un foyer pluvieux ne pourra pas être considérée comme telle) mais bien la mesure de l'intensité des précipitations.

Il faut également noter que, dans le cas de la perte de couverture comme dans celui de la surestimation de l'intensité des précipitations, l'actuel critère de protection convenu de -10 dB pour I/N vaut pour la dégradation de performance d'un radar dans la plage comprise entre 7 et 11 %, à l'image des pourcentages de dégradation de performance généralement admis par l'ensemble des services de radiocommunication.

La Fig. 4-12 donne un exemple d'impact d'un brouillage constant sur le mode précipitation d'un radar. Même s'il s'agit d'un brouillage constant, il est important de souligner que la variation d'impact est le résultat de la rotation de l'antenne, le brouillage maximum (en vert sur l'illustration) étant produit à l'azimut de la source du brouillage.

FIGURE 4-12

Exemple d'impact d'un brouillage constant sur le mode précipitation d'un radar météorologique



4.2.10.2.3 Mesure des vents

Dans le cas de mesures Doppler, un brouillage constant donné affecte de manière différente l'estimation de la vitesse des vents, principalement via la distorsion de phase du signal souhaité. Les incidences dépendent essentiellement de la façon dont la phase du signal brouilleur altère la phase du signal composite utilisée pour le traitement Doppler.

Il n'est pas évident de déterminer l'ampleur de la modification et celle-ci dépend pour beaucoup du signal et/ou de l'environnement. Voici, néanmoins, les deux cas d'un point de vue théorique:

- *Cas 1* – Si la phase du signal de brouillage détectée par le radar est aléatoire, le vecteur résultant sera statistiquement nul; et ce indépendamment de son niveau. Il n'y aura donc théoriquement pas d'altération des mesures des vents.
- *Cas 2* – Au contraire, si la phase détectée n'est pas aléatoire mais quasi constante, il en résultera un vecteur constant avec un certain module et les conséquences sur les mesures des vents dépendront à la fois de la phase et du module dudit vecteur. Dans tous les cas, il n'est pas simple de déterminer un tel impact, même avec un niveau de brouillage constant, et cette procédure n'est pas réalisée en pratique pour le moment.

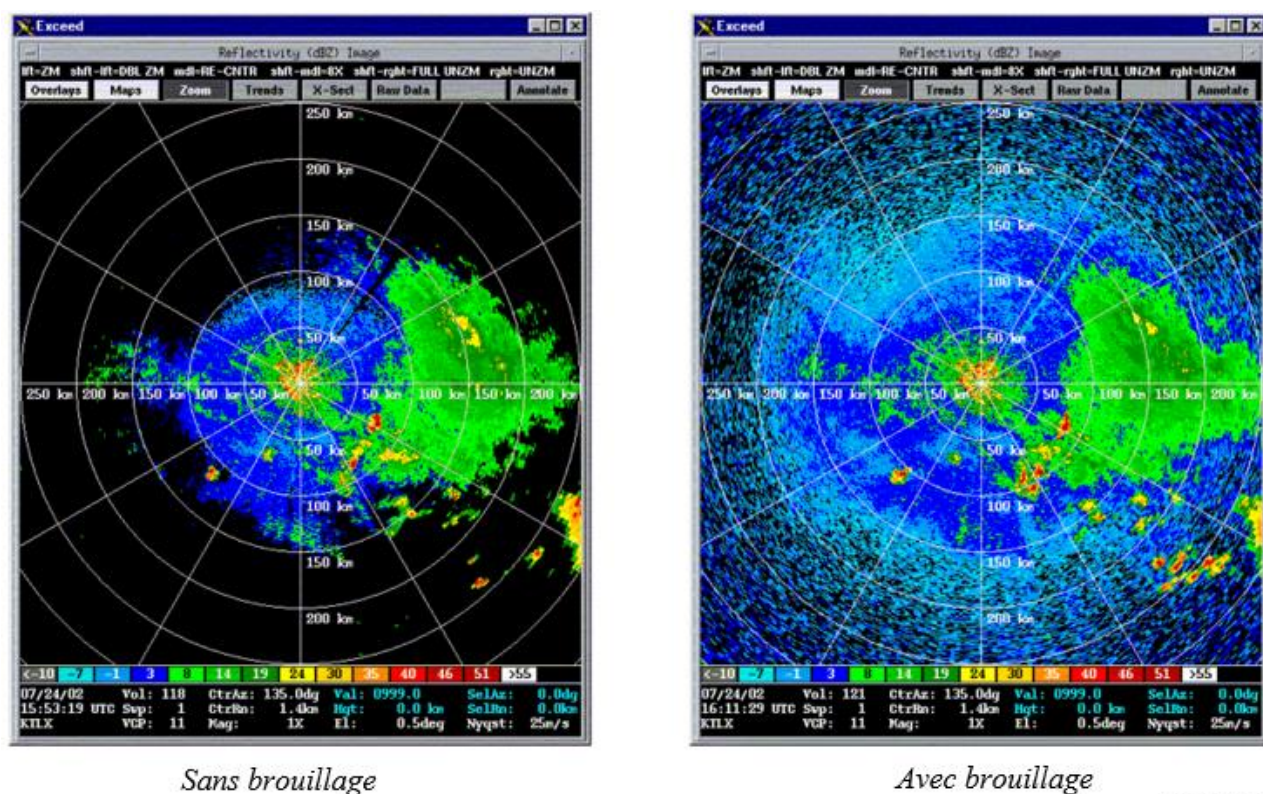
De plus, on peut également estimer que lorsque le niveau de brouillage est nettement inférieur au signal attendu, la phase de ce dernier ne sera pas modifiée tandis que, au contraire, si le signal de brouillage est nettement supérieur, alors la phase détectée par le radar sera la phase du signal de brouillage. Dans ce dernier cas, on peut se référer aux Cas 1 et 2 ci-avant. Dans l'intermédiaire, autrement dit quand les niveaux des signaux de brouillage et attendu sont équivalents, il apparaît difficile d'évaluer lequel des signaux détermine la détection de phase.

4.2.10.3 Impact d'un brouillage par impulsion persistant

Le brouillage par impulsion peut modifier grandement les données de réflectivité et donner des données en réception qui ne permettent pas de produire une image fiable des cibles dans l'atmosphère. Un exemple en est donné à la Fig. 4-13.

FIGURE 4-13

Comparaison d'images sans et avec brouillage du mode précipitation d'un radar météorologique

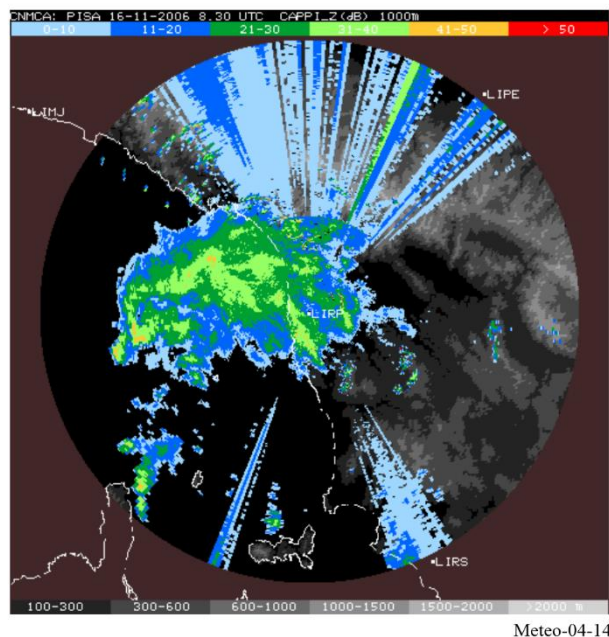


Meteo-04-13

La Fig. 4-14 illustre un autre exemple de brouillage causé à un radar météorologique par un seul émetteur de faible puissance en intérieur. Ce brouillage se présente comme des faisceau-crayon dans les produits de sortie de radar. La réception continue des signaux brouilleurs et l'amplitude constante à l'intérieur et au voisinage de la largeur de bande opérationnelle sont à l'origine de ces artefacts. Leur intensité visuelle dépend de la distance entre la source du brouillage et l'emplacement du radar, ainsi que du facteur de correction de la distance appliqué par le radar basé sur la force du brouillage reçu (voir les détails au § 4.2.10.5).

FIGURE 4-14

Brouillage causé à un radar météorologique (mode précipitations)



4.2.10.4 Brouillages et coexistence entre les radars météorologiques et d'autres systèmes radar

Les radars météorologiques sont généralement protégés contre les brouillages constants causés par des systèmes d'autres services en garantissant un rapport brouillage assimilé à du bruit/bruit (I/N) de -10 dB.

Toutefois, la coexistence entre deux radars météorologiques ou entre des radars météorologiques et des radars non météorologiques pourrait être moins restrictive sur la base d'une analyse au cas par cas. Cela s'explique par le fait que la dynamique de brouillage entre deux systèmes radar à impulsions est fondamentalement différente du partage des fréquences radar avec les systèmes d'autres services. Les facteurs ci-dessous donnent quelques exemples de ces différences:

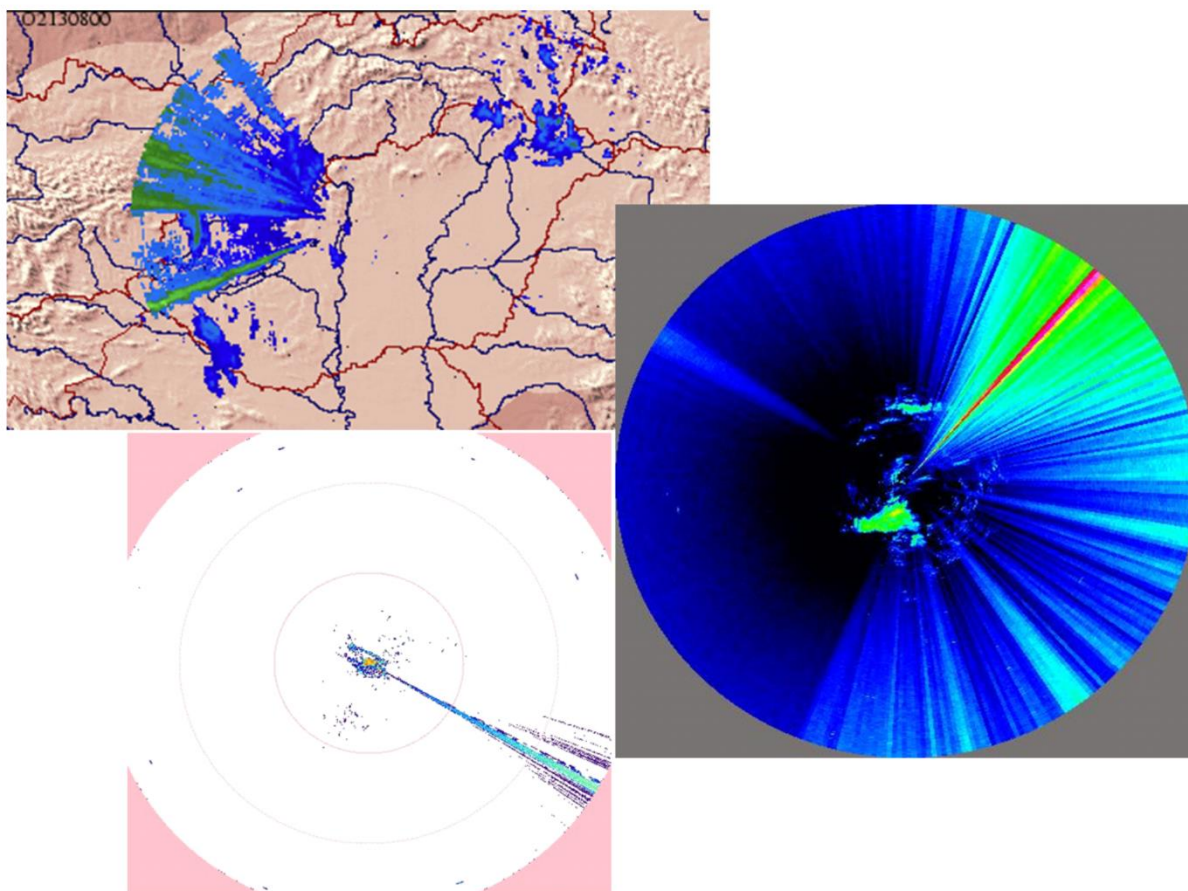
- **Nature asynchrone du brouillage:** la stratégie de balayage d'un radar n'est pas synchronisée avec le fonctionnement d'un autre radar, ce qui minimise le risque de perturbation continue.
- **Faible facteur d'utilisation:** les systèmes radar émettent généralement des signaux par intermittence dans une plage allant de 0,05 à 0,2%, ce qui réduit la probabilité de brouillage continu.
- **Faible probabilité de couplage des faisceaux principaux:** la probabilité que les faisceaux principaux de deux radars se brouillent est faible, en particulier lorsque les systèmes sont correctement alignés et espacés.
- **Traitement du signal robuste:** les systèmes radar modernes sont équipés de circuits de rejet des brouillages et de capacités de traitement du signal avancés qui leur permettent de filtrer les signaux indésirables.
- **Techniques de suppression des brouillages:** des techniques telles que les sauts de fréquence ou l'utilisation de filtres à bande étroite aident à supprimer les brouillages entre les radars.

4.2.10.5 Brouillages causés aux radars en bande C par les réseaux WAS/RLAN

La CMR-03 a décidé d'autoriser les réseaux WAS/RLAN (comme le réseau WiFi) dans les bandes 5 150-5 350 MHz et 5 470-5 725 MHz. La décision de la CMR-03 a été associée à l'obligation pour les réseaux WAS/RLAN de mettre en œuvre la sélection dynamique des fréquences pour détecter et éviter les fréquences radar.

Malheureusement, les brouillages causés aux radars météorologiques ont commencé assez tôt, en 2006 en Europe, principalement dans les pays de l'Est, et sont maintenant observés dans le monde entier dans la plupart des pays où des radars en bande C sont déployés dans la bande des 5,6 GHz.

FIGURE 4-15

Exemples de brouillages causés par les réseaux WAS/RLAN aux radars météorologiques

Meteo-04-15

Il est apparu rapidement que les spécifications relatives à la sélection dynamique des fréquences ne tenaient pas suffisamment compte des spécificités des radars météorologiques:

- stratégie de répétition du balayage volumique (généralement de 10 à 15 min);
- élévation de fonctionnement comprise entre 0° et 90°;
- largeur d'impulsion comprise entre 0,5 et 2,5 μ s (pour les radars opérationnels);
- fréquence de répétition des impulsions (FRI) comprise entre 250 et 1 200 Hz (pour les radars opérationnels);
- FRI fixe, décalée ou entrelacée;
- vitesse de rotation comprise entre 1 et 6 tr/min;
- étalonnage du bruit.

En Europe, la norme EN 301 893 sur les réseaux WAS/RLAN de l'Institut européen des normes de télécommunication (ETSI) a été modifiée pour inclure de nouvelles spécifications sur la sélection dynamique des fréquences, afin de tenir compte des spécificités énumérées ci-dessus.

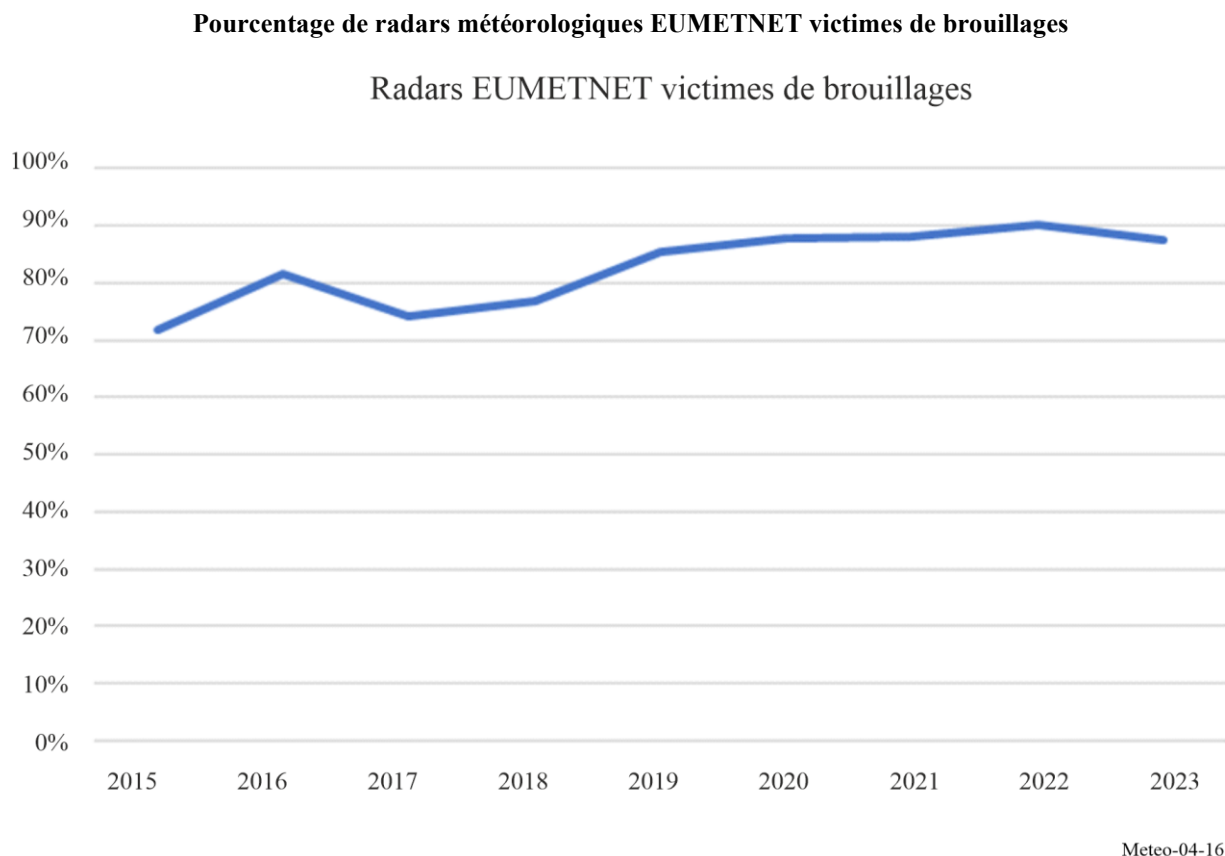
Toutefois, au bout de quelques années, les cas de brouillage ont commencé à augmenter considérablement. Des études plus approfondies ont montré que ces brouillages étaient causés, et sont encore causés aujourd'hui, par les réseaux WAS/RLAN non conformes:

- pas de sélection dynamique des fréquences à l'intérieur;
- sélection dynamique des fréquences désactivée;

- spécifications relatives à la sélection dynamique des fréquences pas complètement mises en œuvre.

Depuis lors, la communauté météorologique, en particulier en Europe (par le biais d'EUMETNET), n'a cessé de discuter avec les régulateurs pour trouver une solution définitive. Malgré l'adoption de rapports, de plans d'action ou d'une «liste d'options envisageables qui pourraient aider à atténuer le problème», rien n'a changé au fil des ans. On trouvera dans la Fig. 4-16 le pourcentage de radars météorologiques en Europe victimes de brouillages, à savoir près de 90% par an.

FIGURE 4-16



En outre, la dernière surveillance du marché menée en Europe a révélé que deux tiers des équipements RLAN sur le marché européen n'étaient pas conformes. Depuis 2015, EUMETNET publie chaque année un questionnaire qui ne montre aucune amélioration.

Cette situation est de plus en plus perçue comme une menace majeure pour le fonctionnement des radars en bande C. Un certain nombre de mesures d'atténuation ont été envisagées, notamment les suivantes:

- interdire aux équipements WAS/RLAN d'utiliser la bande 5 600-5 650 MHz;
- interdire aux réseaux RLAN fixes en extérieur d'utiliser la bande 5 600-5 650 MHz;
- améliorer la surveillance du marché;
- mettre en évidence la bande 5 350-5 470 MHz (non utilisée par les réseaux RLAN) comme alternative à la bande 5,6 GHz.

Bien que ces mesures soient énoncées dans des rapports en Europe (comme dans le rapport du CCR), les régulateurs n'ont mené aucune action concrète en ce qui concerne la plupart des solutions envisagées, ou les ont même rejetées.

Pour l'heure, seule la bande 5 365-5 470 MHz est considérée comme une solution éventuelle pour atténuer les brouillages causés par les réseaux WAS/RLAN; la mise en œuvre de cette solution s'effectuerait aux frais et par les propres efforts de la communauté météorologique. Toutefois, avant d'entreprendre quoi que ce soit, il est essentiel de s'assurer que cette bande de fréquences est exempte de brouillage en effectuant les mesures nécessaires.

4.2.10.6 Utilisation de la bande 5,4 GHz pour les radars en bande C

La bande 5 350-5 470 MHz est déjà utilisée dans certains pays comme bande de fréquences nominale pour les radars météorologiques (par exemple en Suisse ou en Chine).

Avant d'envisager une utilisation plus large, une analyse technique a été effectuée pour vérifier qu'un déploiement de radars météorologiques dans cette bande est compatible avec l'exploitation de capteurs du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active). Cette analyse a conduit à l'adoption du Rapport 346 du Comité des communications électroniques, qui montre que «la compatibilité entre les radars météorologiques et le SETS (active) dans la bande 5 365-5 470 MHz peut être assurée sans qu'il soit nécessaire de prévoir des conditions d'exploitation particulières pour les radars météorologiques», un constat valable pour un déploiement relativement important de radars météorologiques (environ un tiers des radars existants).

Il convient de souligner que certaines administrations des radiocommunications en Europe ne sont pas favorables à une telle démarche. Cette position est pleinement respectée, mais ces administrations ne proposent donc actuellement aucune alternative à leur service météorologique.

Il est à noter également que l'utilisation de la bande des 5,4 GHz pourrait donner lieu à des contraintes supplémentaires, en particulier en ce qui concerne les systèmes (radars météorologiques embarqués) fonctionnant dans le cadre du service de radionavigation aéronautique, ainsi que pour le déploiement d'autres radars dans le cadre du service de radiolocalisation.

En outre, les radars météorologiques au sol perdront le statut réglementaire qui leur est conféré dans la bande 5 600-5 650 MHz par le numéro **5.450B** du RR et deviendront secondaires (voir le numéro **5.448D** du RR).

Enfin, une autre question importante a trait à ce qui a été soulevé récemment par deux pays d'Europe de l'Est, à savoir l'utilisation de la bande des 5,4 GHz par les réseaux WAS/RLAN, bien que cette utilisation ne soit pas autorisée. Cela doit encore être confirmé en vérifiant si cette situation pourrait s'appliquer à la plupart des pays à l'avenir, car l'utilisation potentielle de la bande 5 365-5 470 MHz pourrait être évidemment compromise, alors qu'il s'agit actuellement de la seule solution réelle et durable pour résoudre le problème actuel des brouillages à 5,6 GHz.

4.2.10.7 Brouillage causé par les parcs éoliens

Ces dernières années, des éoliennes toujours plus imposantes sont fabriquées et le nombre de centrales de production d'électricité (ou parcs éoliens, comprenant de nombreuses éoliennes) ne cesse d'augmenter. Les éoliennes et les parcs, même à des distances relativement grandes, présentent un gros risque de dégrader les données météorologiques sur de très grandes superficies et leur effet est non négligeable sur les études et prévisions du temps.

Pour que les prévisions météorologiques soient précises, les radars météorologiques sont conçus pour effectuer des observations dans une bande d'altitude relativement étroite. En raison de la sensibilité des radars, des éoliennes déployées en visibilité directe sur le plan radioélectrique d'une installation de radar météorologique peuvent bloquer la propagation vers l'avant des signaux radar, causer un fouillis radar et produire des échos radar induits par la turbulence de sillage. Ces mécanismes de brouillage peuvent se traduire par de fausses estimations radar de l'accumulation des précipitations, de fausses signatures de tornade ou de mésocyclone et une identification incorrecte de caractéristiques d'orages ou de cellules de tempête. Ils peuvent aussi entraîner une dégradation de la performance des radars et nuire aux activités de prévision et d'alerte. Les trois mécanismes qui peuvent contribuer à la dégradation de performance sont l'effet d'écran, le fouillis radar et la rétrodiffusion.

4.2.10.7.1 Effet d'écran

Toute caractéristique géographique ou structure se trouvant entre le radar et la cible entraînera un effet d'écran. Suivant leur taille, les éoliennes peuvent entraîner des effets d'écran, qui devraient varier en fonction de leurs dimensions, du type de radar émetteur et de la configuration (hauteur, angle de calage des pales, vitesse de rotation et position de l'éolienne par rapport au radar).

4.2.10.7.2 Fouillis radar

Des échos radar peuvent être reçus à partir de n'importe quelle surface réfléchissant les signaux radar. Dans certaines zones géographiques, ou dans des conditions météorologiques particulières, la performance des radars peut être affectée par des échos parasites, appelés fouillis radar, qui peuvent masquer les échos utiles. Pour les météorologues, une ou plusieurs éoliennes situées au voisinage d'un radar météorologique peuvent poser des problèmes d'exploitation du radar.

Les signaux de fouillis de sol présentent une grande réflectivité, un décalage Doppler proche de zéro, une faible largeur spectrale et une localisation homogène. Par rapport au fouillis de sol qui se produit couramment, le brouillage causé par les éoliennes est beaucoup plus problématique. Des réflexions directes seront reçues en provenance à la fois du mât (stationnaire) et des pales (mobiles). Comme le fouillis de sol, les signaux de fouillis causé par les éoliennes devraient aussi présenter une réflectivité relativement grande, avec une modulation possible due à la rotation des pales causant une variation systématique dans la section efficace du radar.

Le décalage Doppler sera affecté par plusieurs facteurs, notamment la vitesse de rotation des pales et l'orientation du rotor par rapport au faisceau radar. Les vitesses Doppler devraient être maximales lorsque le rotor est orienté à 90 degrés par rapport à l'axe de visée du radar, et proches de zéro lorsque la face avant ou la face arrière du rotor est tournée vers le radar. Etant donné que le volume de résolution du radar comprendra probablement la totalité de la structure de l'éolienne, la largeur spectrale devrait être nettement agrandie. Ceci est due à la rotation des pales qui s'éloignent et se rapprochent du radar. La présence de plusieurs éoliennes dans un même volume de résolution ne ferait qu'exacerber cet effet.

4.2.10.7.3 Énergie rétrodiffusée par des tourbillons turbulents

En plus du fouillis radar causé par les réflexions depuis les éoliennes, on peut aussi observer une énergie rétrodiffusée par des tourbillons turbulents dans le sillage du parc éolien. Les échos correspondants devraient présenter des caractéristiques analogues à celles découlant de la rétrodiffusion par temps clair à partir de discontinuités dans l'indice de réfraction à l'échelle de Bragg du radar. En principe, ces échos de sillage présenteront une certaine dérive en fonction du champ de vent et auront une réflectivité beaucoup plus faible que les échos associés aux réflexions directes depuis les éoliennes. Néanmoins, ils peuvent agrandir considérablement la zone de couverture radar affectée par le fouillis causé par les éoliennes et, par conséquent, exacerber le problème.

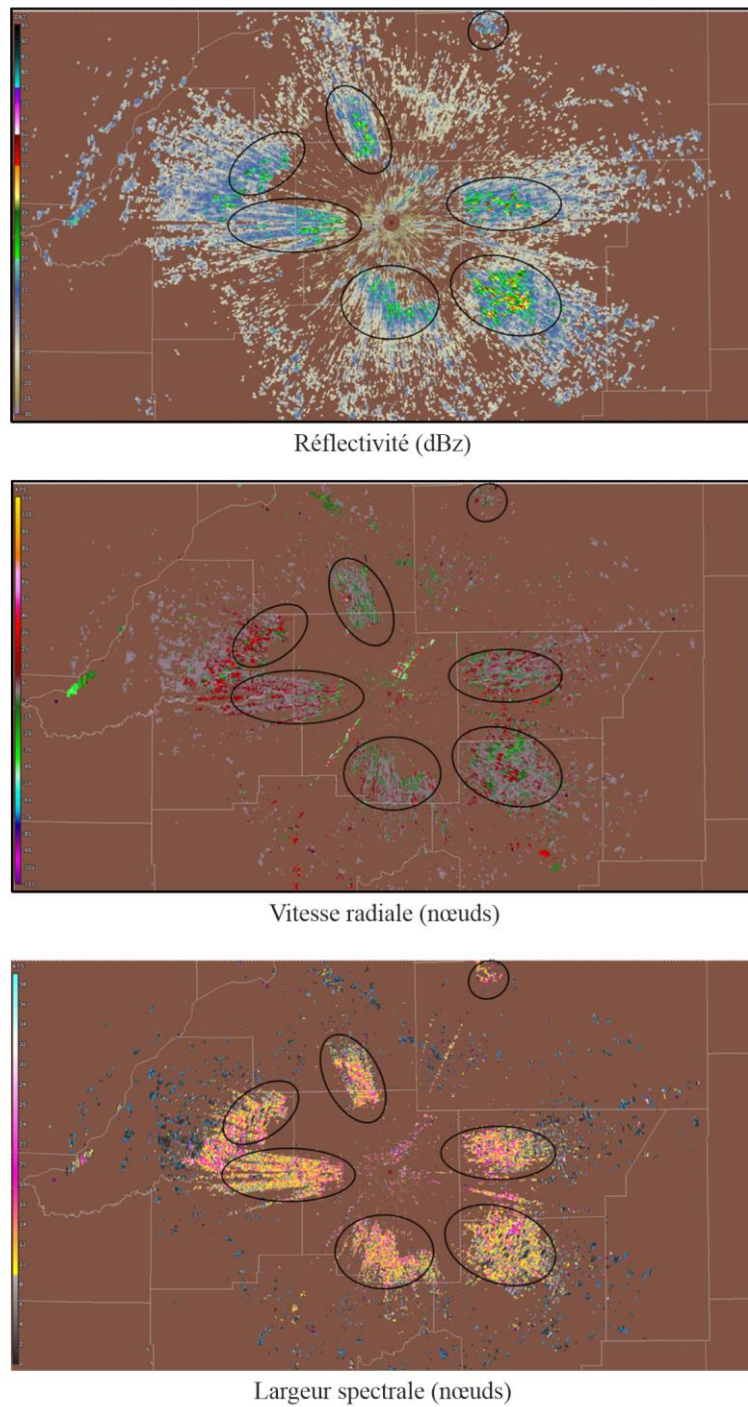
4.2.10.7.4 Exemples de fouillis radar causé par des éoliennes

Deux exemples distincts de brouillage causé par les parcs éoliens⁸ sont donnés à la Fig. 4-17. Comme attendu, les valeurs de réflectivité sont fortes, proches de 45 dBz, avec des largeurs de spectre sporadiquement grandes, au-delà de 10 m/s. La région relativement petite de forte réflectivité au sud-ouest du radar est nettement visible et correspond à la position d'un parc éolien qui se situe à environ 45 km des radars météorologiques.

⁸ Les parcs éoliens sont des champs d'éoliennes qui servent à produire de l'électricité.

FIGURE 4-17

Exemples de brouillage de radar météo (entouré) causé par un parc éolien en conditions de ciel clair

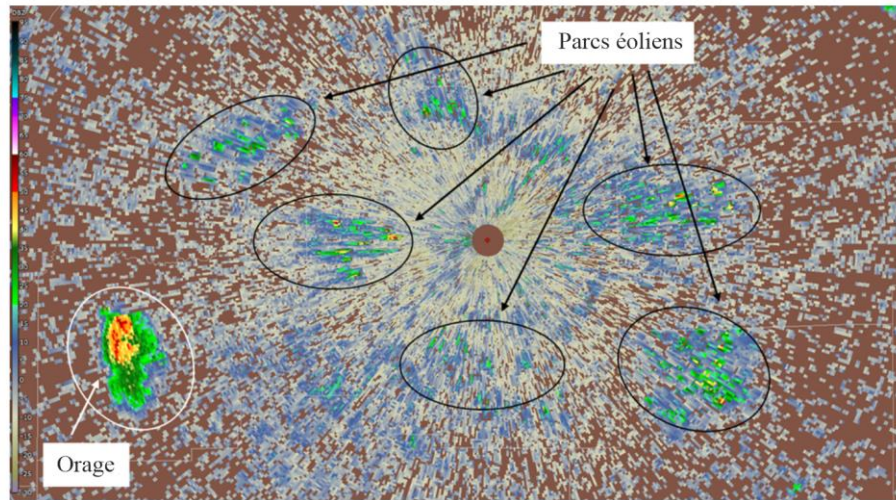


Meteo-04-17

La Fig. 4-18 illustre le même parc éolien lors d'un orage.

FIGURE 4-18

Exemple de brouillage causé par un parc éolien et de son impact sur la réflectivité en situation d'orage isolé

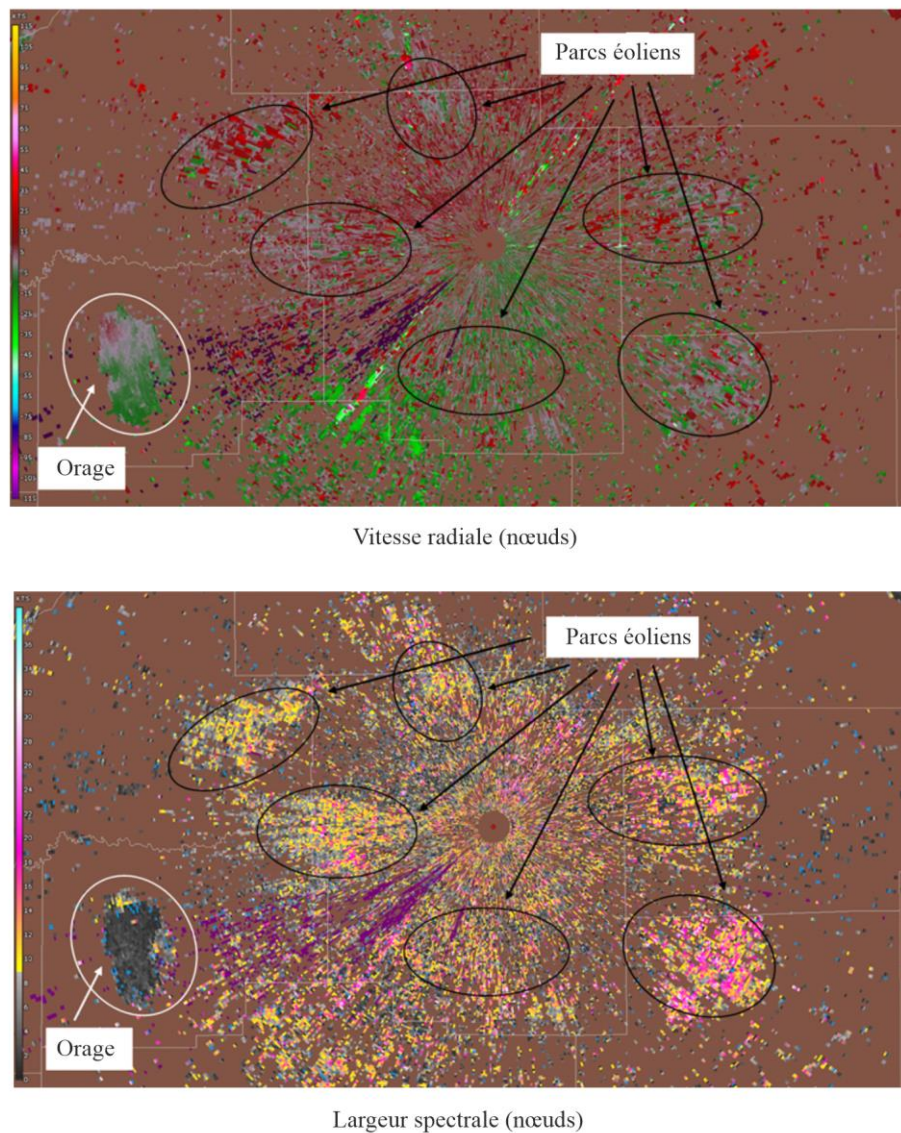


Réflectivité (dBz)

Meteo-04-18

Sans connaissance préalable, il serait extrêmement difficile de faire une distinction entre le fouillis radar causé par les éoliennes et les orages. Étant donné qu'en tournant, les pales s'éloignent et se rapprochent du radar, la vitesse Doppler moyenne devrait être proche de zéro. Les grandes largeurs spectrales réduiront la précision des estimations de vitesse Doppler par de petits écarts par rapport à zéro (voir la Fig. 4-19).

FIGURE 4-19

Exemple d'estimation de vitesse Doppler lors d'un orage

Meteo-04-19

4.2.10.7.5 Impact du fouillis radar causé par des éoliennes sur le fonctionnement des radars météorologiques et la précision des prévisions

Des études sur le terrain ont illustré l'impact du fouillis causé par des éoliennes sur les radars météorologiques. Elles ont montré que les parcs éoliens peuvent avoir des effets considérables sur les radars météorologiques et dégrader de ce fait la précision de détection des phénomènes météorologiques extrêmes.

Ces analyses ont montré que le fouillis produit par une éolienne se propage sur un vaste secteur (plusieurs dizaines de degrés) par rapport à la direction de l'éolienne, même à des distances relativement grandes. L'impact des éoliennes sur les données de réflectivité des radars météorologiques ne peut donc pas être négligé.

Plus particulièrement, les analyses ont montré que l'impact d'une seule éolienne sur le mode Doppler de radars météorologiques est considérable, même à plusieurs dizaines de kilomètres. Et, à des distances inférieures à 10 km, toutes les données produites par un radar seront erronées à tous les azimuts, même à 180° du secteur correspondant au parc éolien.

Il faudra donc trouver les moyens de limiter les WTC pour protéger les radars météorologiques des effets néfastes du brouillage causé par les parcs éoliens. Avant de décider des méthodes à appliquer pour réduire les WTC, il convient d'étudier plus avant les WTC pour mieux comprendre leur portée et leurs effets sur les radars météorologiques. Une fois ceci fait, et compte tenu de la multiplication attendue des systèmes éoliens de production d'électricité, il faudra développer des méthodes de réduction des WTC.

En attendant les conclusions des études visant à limiter le brouillage des radars météorologiques par les WTC, la seule solution disponible actuellement pour réduire ou éviter les effets néfastes des parcs éoliens est de ménager une distance suffisante entre les deux systèmes. Certains pays européens envisagent, par exemple, les recommandations suivantes:

- 1) qu'aucune éolienne ne puisse être implantée à une distance d'une antenne radar inférieure à:
 - 5 km pour les radars en bande C
 - 10 km pour les radars en bande S
- 2) que les projets de parcs éoliens soient systématiquement soumis à une étude d'impact quand il est prévu de les implanter à moins de:
 - 20 km pour les radars en bande C
 - 30 km pour les radars en bande S.

L'augmentation continue de la taille des structures des éoliennes a conduit à un élargissement de la zone d'impact, laquelle va bien au-delà des limites proposées précédemment sur la base d'éoliennes plus petites. En Australie, par exemple, il existe quelques exemples de parcs éoliens opérationnels situés à plus de 60 km d'un site de radar sur une zone relativement plate, avec des impacts observés sur trois ou quatre balayages du radar en bande C. Ces impacts s'accroissent considérablement avec l'augmentation de la taille et de la hauteur des éoliennes, en particulier dans les cas où le parc éolien est situé à des altitudes plus élevées que le radar lui-même. Dans de tels scénarios, la zone d'impact peut s'étendre au-delà de 100 km lorsqu'on utilise un radar en bande S.

Les parcs éoliens en mer, en particulier, utilisent des structures de turbines beaucoup plus grandes que les parcs terrestres. Les hauteurs en bouts de pales de 350 à 400 m sont devenues la norme pour les turbines en mer. Étant donné que les sites en mer ne présentent pas les caractéristiques naturelles du terrain qui pourraient contribuer à atténuer les brouillages radar (comme les collines ou les montagnes), l'impact des parcs éoliens en mer sur les radars météorologiques – en particulier ceux situés dans les zones côtières – pourrait être considérable. Ces grandes structures d'éoliennes posent un énorme défi aux systèmes de surveillance météorologique, car elles peuvent entraîner un fouillis radar important, voire une perte totale de données radar dans certaines zones, et ainsi nuire à l'efficacité des prévisions et de la surveillance météorologiques.

4.2.11 Vulnérabilités des systèmes partageant leur bande avec d'autres radars météorologiques

On l'a vu, la puissance d'émission et le gain d'antenne des radars météorologiques sont très élevés afin de compenser la longueur des trajets (généralement proche de 100 dBW p.i.r.e. maximum). Cela tend à créer une grande portée propice au brouillage des systèmes qui partagent la même fréquence (compte tenu de la largeur des canaux radar). Des liaisons radar et des liaisons fixes en hyperfréquence ayant coexisté pendant quelque temps sont devenues incompatibles lorsque le système hyperfréquence est passé de l'analogique au numérique, l'équipement étant alors plus sensible au brouillage par impulsion.

4.2.12 Tendances futures

4.2.12.1 Améliorations du matériel et des algorithmes

Les radars météorologiques de diverses administrations font actuellement l'objet d'une importante modernisation du matériel. Il s'agit notamment de mettre en place des radars polarimétriques, qui utilisent une polarisation verticale en plus de la polarisation horizontale utilisée par les radars actuels. En 2016 et en 2024, respectivement, tous les radars NEXRAD aux États-Unis et presque tous les radars OPERA en Europe ont été modernisés pour prendre en charge la double polarisation. En Australie, près de la moitié des radars opérationnels devaient être modernisés pour prendre en charge la double polarisation au plus tard en 2024.

D'autres techniques permettant d'améliorer encore la performance des radars météorologiques sont actuellement étudiées, notamment divers algorithmes permettant de lever les ambiguïtés distance/vitesse, d'accélérer l'acquisition des données, de réduire les effets des artefacts, de diminuer le fouillis radar et de traiter efficacement les signaux pour fournir des estimations météorologiques qui soient les plus précises possible. D'autres efforts sont consacrés à l'utilisation combinée de radars météorologiques et profileurs ainsi que, dans une moindre mesure, à l'étude de la foudre et de ses dangers, pour déterminer si le début et la fin d'un épisode de foudre pourraient être prévisibles.

Les progrès accomplis en ce qui concerne la technologie des semi-conducteurs (principalement les transistors GaN) ont également permis de recourir à des amplificateurs de puissance à semi-conducteurs dans les transmetteurs radar, plutôt qu'à des tubes à vide habituellement utilisés (magnétrons, klystrons ou tubes à ondes progressives). Malgré une puissance de crête moins élevée, les amplificateurs à semi-conducteurs mettent à disposition de longues largeurs d'impulsion et un facteur d'utilisation qui permettent de préserver une énergie impulsione et une sensibilité de mesure semblables à celles offertes par les transmetteurs à tubes classiques.

Des chercheurs ont adapté la technologie de radar à balayage électronique pour l'utiliser dans des applications de surveillance météorologique. Avec cette technologie, les antennes paraboliques orientées mécaniquement devraient être remplacées par une antenne réseau orientée électroniquement. Ainsi, il sera possible de mettre en place des stratégies de balayage plus souples et de faire des mises à jour plus rapides lorsque les conditions météorologiques évoluent. Les premiers tests du radar à balayage électronique se sont avérés prometteurs. Les radars à balayage électronique permettront d'améliorer les connaissances fondamentales concernant l'évolution des tempêtes, ce qui permettra ensuite d'améliorer les modèles informatiques, de faire des prévisions plus précises et d'émettre des alertes plus tôt. Ils sont également susceptibles d'augmenter considérablement le délai moyen qui s'écoule entre l'alerte de tornade et le début de la tornade et qui est actuellement de 13 minutes. Les améliorations, mises en œuvre de façon économique, concernent les sous-systèmes de réception et de traitement du signal. Il est possible que, lors du passage à cette technologie (en cas de mise en œuvre), les émetteurs existants ne soient pas réutilisés mais remplacés par des modules d'émission/réception répartis. Certaines régions ont envisagé la possibilité de mettre en place des radars météorologiques à balayage électronique.

4.2.12.2 Technologie des semi-conducteurs

Certains radars météorologiques utilisant des émetteurs à semi-conducteurs (SSTX, *solid-state transmitters*) depuis quelques années dans la gamme de fréquences 5 250-5 850 MHz sont déjà mentionnés dans la Recommandation UIT-R M.1849-3.

Caractéristiques des radars météorologiques SSTX

La puissance de crête émise par le radar météorologique SSTX est comprise entre 4 et 8 kW, une puissance inférieure à celle d'un radar à tubes (plusieurs centaines de kW en bande S et en bande C); le radar SSTX est donc moins sensible. Pour compenser cet impact et préserver la résolution en portée, on recourt à la compression d'impulsion en augmentant la largeur d'impulsion, laquelle peut atteindre 200 μ s (au lieu de 0,5 à 3,5 μ s pour les systèmes à tubes) afin de compenser la puissance moyenne. Dans un radar à modulation d'impulsions non compressées, la résolution en portée dépend de la durée de l'impulsion. La compression d'impulsion permet d'utiliser des impulsions plus longues et des émetteurs à plus faible puissance de crête sans compromettre la résolution en portée. Pour ce faire, on utilise des techniques appropriées de modulation de fréquence ou de phase.

Le rapport de compression d'impulsion (PCR) peut être défini comme le rapport entre la largeur d'impulsion d'émission non compressée et la largeur d'impulsion compressée, et calculé comme étant le produit de la largeur d'impulsion d'émission et de la largeur de bande à 3 dB. Grâce à la compression d'impulsion, une impulsion d'émission assez longue associée à une puissance de crête relativement faible peut atteindre la même sensibilité et la même résolution en portée que celles prédites par l'équation radar de base.

$$SNR = \frac{\pi^3 |K|^2}{2^{10} \ln(2) c} \cdot \frac{f^2}{r^2} \cdot \underbrace{G^2 \theta^2}_{\text{Antenne}} \cdot \underbrace{\tau P}_{\text{Émission de l'énergie impulsione}} \cdot \underbrace{\frac{1}{k_B T N_F B}}_{\text{Bruit du récepteur}} \cdot Z \quad (4-17)$$

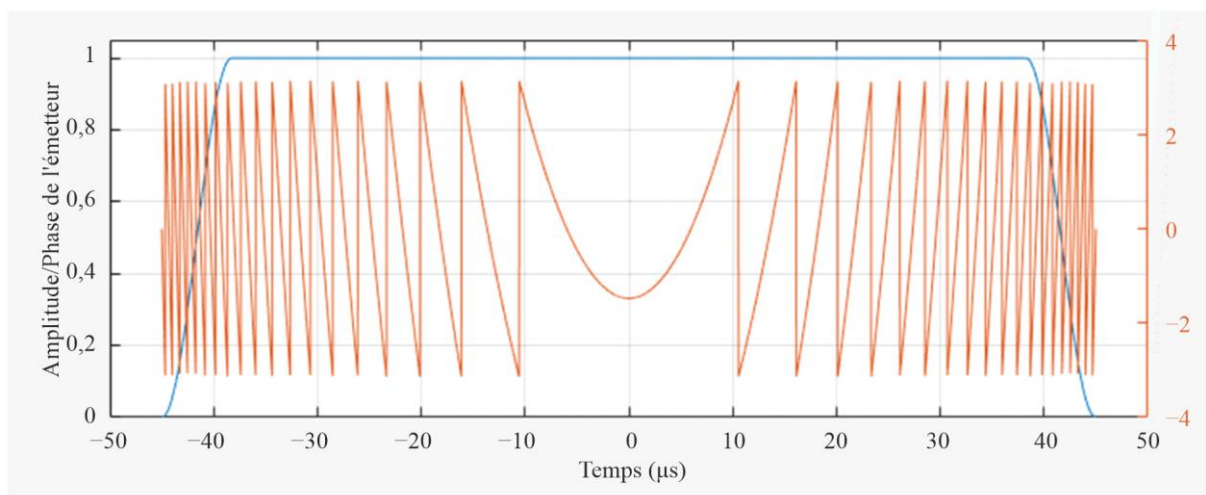
c:	vitesse de la lumière	G:	gain d'antenne	N_F :	facteur de bruit
$ K ^2$:	0,93 (pluie), 0,2 (glace)	θ :	Largeur du faisceau de l'antenne	T:	température
k_B :	constante de Boltzman	τ :	largeur de l'impulsion	r:	portée
SNR:	rapport signal/bruit	P:	puissance de crête	Z:	réflectivité
f:	fréquence	B:	largeur de bande de 3 dB		

La compression d'impulsion permet de régler la résolution et la sensibilité en portée de manière indépendante. La résolution en portée est réglée inversement à la largeur de bande B du signal modulé de l'émetteur. La sensibilité en portée est proportionnelle à l'énergie impulsionnelle τP et inversement proportionnelle à la largeur de bande B . Cela s'explique par la capacité de la compression d'impulsion à détecter les signaux d'écho qui ont disparu dans le bruit avant la compression.

La mise en œuvre de la compression d'impulsion fait appel à des techniques complexes de traitement du signal. Cette complexité nécessite du matériel et des logiciels sophistiqués. Diverses méthodes de modulation peuvent être appliquées dans les méthodes de compression d'impulsion, notamment la modulation de fréquence linéaire ou non linéaire, la modulation de fréquence codée en fonction du temps (par exemple le code Costas) ou la modulation de phase. Habituellement, la modulation de fréquence non linéaire est utilisée dans des applications de radar météorologique. La Fig. 4-20 donne un exemple d'impulsion d'un émetteur avec une largeur d'impulsion d'environ 80 μs .

FIGURE 4-20

Évolution temporelle de l'amplitude (bleu) et de la phase (orange) nominales de l'émetteur



Meteo-04-20

Pendant l'émission des impulsions longues, le récepteur radar ne peut pas recevoir de données. Cela s'explique par la puissance élevée de l'émetteur et l'isolement limité entre l'émetteur et le récepteur. De plus, la puissance est réfléchiée par l'antenne vers le récepteur. Pour protéger l'extrémité frontale du récepteur contre les dommages causés par la puissance élevée, un limiteur à l'émission et à la réception bloque le signal entrant de l'émetteur. Cela crée ce que l'on appelle une zone aveugle dans laquelle le récepteur est bloqué pendant l'émission de l'impulsion longue. Il est donc nécessaire d'utiliser une impulsion courte (environ 1 μs) pour

couvrir la zone aveugle. Comme on peut le constater, le radar météorologique SSTX a toujours besoin qu'une impulsion brève soit émise.

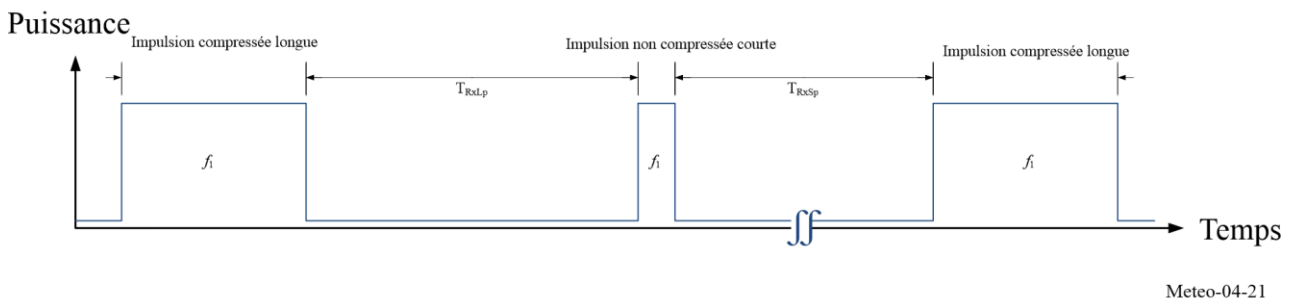
Un radar de ce type doit couvrir la zone aveugle et la longue portée afin d'avoir une image complète de la situation des précipitations. Trois méthodes permettent de satisfaire à cette exigence.

Méthode 1 – Émission d'une double impulsion sur la même fréquence

Les deux impulsions émises (impulsion longue et impulsion courte) sont espacées d'une pause, comme indiqué à la Fig. 4-21. Elles ont la même fréquence, ici f_1 . Le spectre de fréquences occupé est limité à une seule «porteuse». Le temps TR_{xLp} est nécessaire pour échantillonner les échos de l'impulsion compressée pour la gamme souhaitée. Cette méthode présente comme inconvénient un temps de balayage plus long pour obtenir un volume complet.

FIGURE 4-21

Émission à double impulsion utilisant une seule fréquence

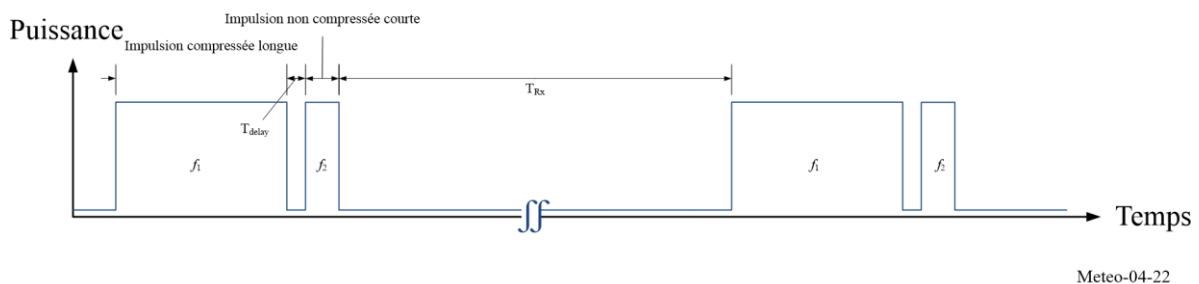


Méthode 2 – Émission d'une double impulsion sur deux fréquences distinctes

Les deux impulsions émises (impulsion longue et impulsion courte) sont légèrement espacées ou non, comme indiqué à la Fig. 4-22. Elles ont des fréquences différentes, ici f_1 et f_2 . Cette méthode présente comme avantage un temps de balayage plus court que celui de la Méthode 1 pour obtenir un volume complet.

FIGURE 4-22

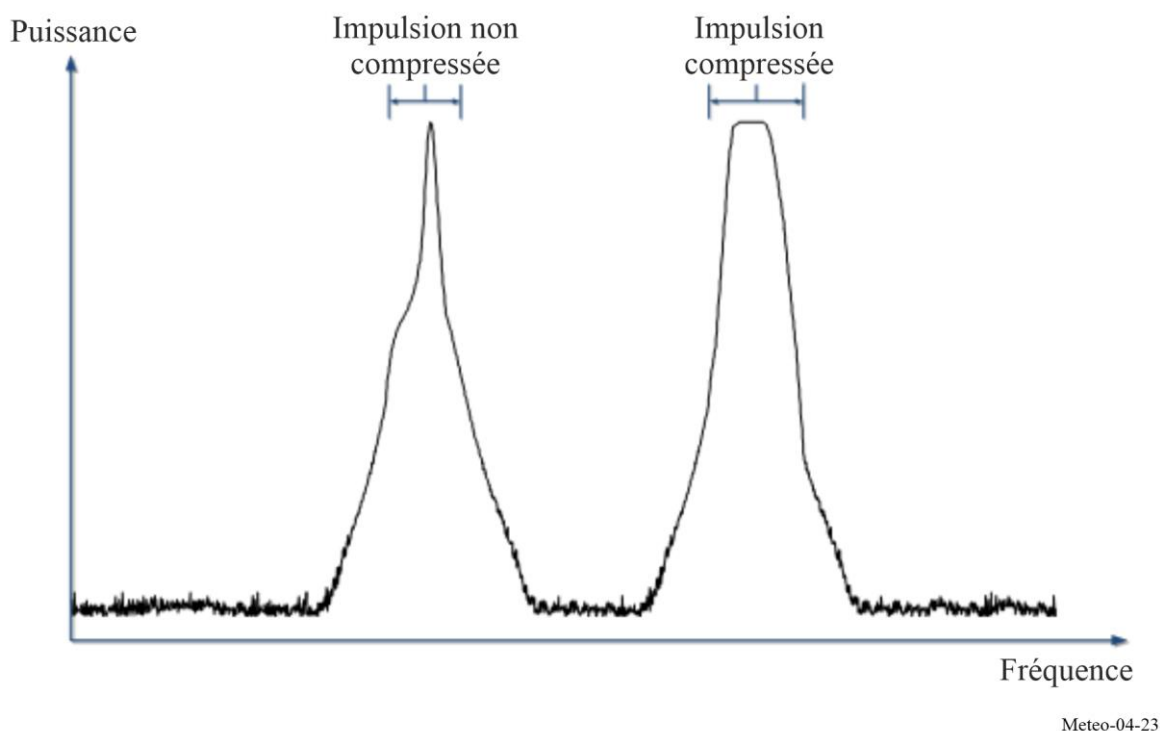
Émission à double impulsion avec deux fréquences distinctes: type A



Cette méthode présente comme inconvénient la nécessité d'élargir le spectre des fréquences. On estime que l'espacement des fréquences est compris entre 3 et 6 MHz. On trouvera dans la Fig. 4-23 un exemple du spectre de fréquences occupé.

FIGURE 4-23

Exemple de spectre de fréquences utilisant la compression d'impulsion sur deux fréquences: type A



Comme il est possible d'effectuer plus rapidement un balayage volumique complet en utilisant deux fréquences pour l'impulsion longue et pour l'impulsion courte, il est à supposer que cette option sera privilégiée pour l'exploitation.

Méthode 3: Émission d'impulsions longues

Il est possible de détecter les cibles de la zone aveugle en utilisant uniquement une impulsion longue, sans impulsion courte.

Déploiement des radars météorologiques SSTX

Des radars météorologiques SSTX sont déjà déployés dans certains pays et l'exploitation de ces systèmes suscite un intérêt croissant dans le monde entier. Toutefois, en raison du grand nombre de radars météorologiques à tubes existants (plus de 1 500), et de leur cycle de vie opérationnel pouvant atteindre 20 ans, même si le déploiement des radars météorologiques SSTX s'amplifie dans un avenir proche, les deux technologies devront fonctionner ensemble pendant une longue période de transition.

Il convient de noter qu'un risque a été identifié en ce qui concerne le partage avec les dispositifs des réseaux locaux hertziens (RLAN) dans la bande des 5 GHz. Les radars météorologiques à tubes existants subissent déjà d'importants brouillages de la part des systèmes RLAN, malgré la mise en place de la sélection dynamique des fréquences visant à garantir que les radars et les dispositifs RLAN puissent partager la bande de fréquences des 5 GHz sans qu'aucun brouillage ne nuise au fonctionnement du radar. Les émetteurs à semi-conducteurs étant beaucoup moins puissants que les émetteurs à tubes, ils affichent donc de moins bonnes performances de détection dans le dispositif RLAN et une portée de détection possiblement plus faible. En outre, on ne sait pas très bien comment se comporteront les dispositifs RLAN, car les impulsions des émetteurs à semi-conducteurs diffèrent des paramètres des signaux d'essai radar stockés dans ces dispositifs. Cette question est de la plus haute importance pour les radars météorologiques utilisant la technologie des émetteurs à semi-conducteurs. Cette question a été soulevée à l'UIT-R et des études sont en cours afin d'assurer la protection future des radars météorologiques SSTX contre les brouillages causés par les réseaux RLAN.

Il faudra suivre ces tendances futures qui, au fur et à mesure de l'évolution des technologies, auront un impact sur les futures stratégies d'atténuation des effets du brouillage et sur les définitions des critères de protection.

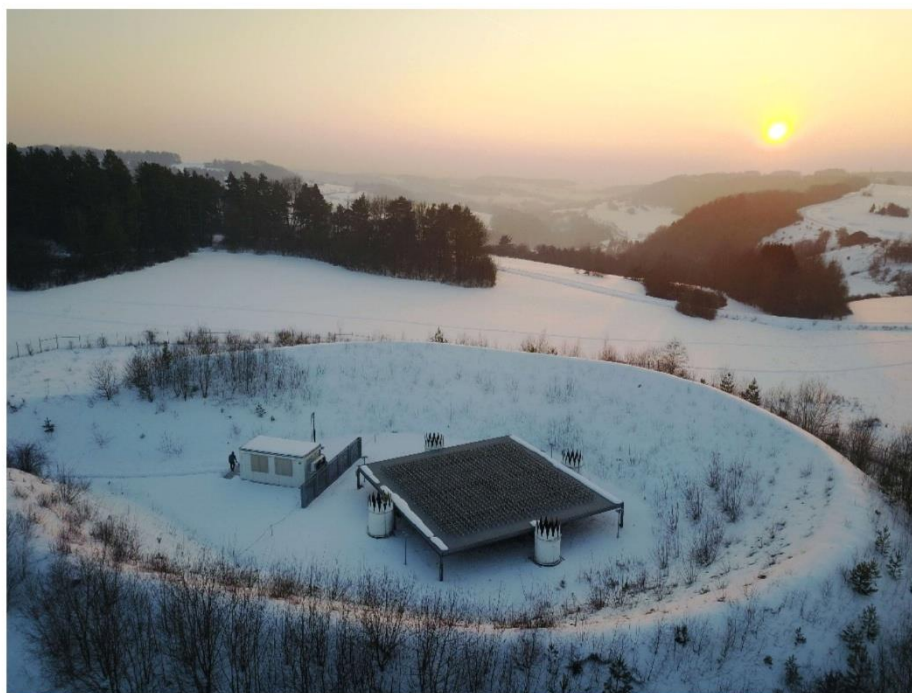
4.3 Les radars profileurs de vent

Les radars profileurs de vent permettent d'obtenir les profils verticaux du vent en détectant l'infime partie de la puissance émise rétrodiffusée par l'atmosphère quelles que soient les conditions météorologiques, à la fois dans l'atmosphère claire et dans l'atmosphère nuageuse. Il convient de souligner qu'aucun autre système de télédétection pour les vents ne peut être utilisé indépendamment des conditions météorologiques, en raison des propriétés de propagation des ondes électromagnétiques plutôt longues dans la gamme allant des ondes métriques à la bande L.

La Fig. 4-24 est une photographie d'une installation classique de radar profileur de vent fixe.

FIGURE 4-24

Photographie d'une installation de radar profileur de vent de 482 MHz à Bayreuth (Allemagne)



Meteo-04-24

L'un des principaux avantages des profileurs de vent sur d'autres systèmes de mesure est leur capacité à surveiller en continu le profil vertical du champ de vent horizontal au-dessus du site de l'instrument. Ils peuvent également servir à détecter des précipitations, observer des caractéristiques importantes dans le champ de vitesse vertical (ondes de gravité et ascendances de convection), évaluer l'intensité de turbulences ou encore mesurer la stabilité atmosphérique. Ils peuvent également donner des informations détaillées sur le profil vertical de la température virtuelle de l'air par l'ajout d'un système de sondage radio-acoustique (RASS, *radar acoustic sounding system*)⁹.

⁹ Un système RASS utilise une source acoustique avec corrélation de fréquence, de sorte que la longueur de l'onde acoustique corresponde à la demi-longueur de l'onde électromagnétique émise par le radar (condition de Bragg). Le système RASS mesure la vitesse de l'onde acoustique laquelle dépend de la température. Ainsi, on obtient une mesure à distance de la température virtuelle de l'air.

4.3.1 Besoins des utilisateurs

Les radars profileurs de vent servent principalement à mesurer le profil vertical du vent sur les sites des instruments 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, avec une résolution temporelle élevée. Ces données sont importantes pour la prévision numérique du temps, ainsi que pour l'étalonnage/la validation des satellites (comme le lidar Doppler Aeolus de l'ASE – ALADIN). Dans un environnement opérationnel, l'utilisateur doit avant tout disposer d'une grande précision, d'une résolution verticale suffisante (comparable à la résolution verticale type des modèles numériques de prévision météorologique) et d'une bonne couverture en altitude.

La précision de l'estimation des vents dépend, entre autres, de la disponibilité de spectre radiofréquence non contaminé. Ces radars étant très sensibles à la mesure des faibles échos provenant d'une atmosphère optiquement claire, tout brouillage dans la bande est facilement préjudiciable. Si un traitement sophistiqué du signal permet parfois de réduire ces effets, les mesures logicielles d'atténuation des brouillages radioélectriques conduisent souvent à une réduction de la couverture en altitude, car la sensibilité du radar est inévitablement réduite.

La couverture en altitude atteignable est déterminée par l'intensité la plus faible de l'onde rétrodiffusée qui peut encore être analysée correctement. Le signal du récepteur doit donc avoir un rapport signal/bruit (SNR, *signal-to-noise ratio*) minimal. Ce rapport dépend d'un certain nombre de facteurs qui figurent dans l'équation radar. L'équation radar simplifiée suivante pour la diffusion par temps clair, obtenue à partir de [Gossard et Strauch, 1983, équation 12-3], est utile pour analyser l'impact des besoins sur les paramètres de fonctionnement et sur la conception des profileurs:

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2} C_n^2}{T_{sys} z^2} \quad (4-18)$$

où:

- $\bar{P}_t$: puissance émise moyenne (W)
- A_e : ouverture équivalente (m²)
- Δ_z : résolution verticale (m)
- z : hauteur (m)
- λ : longueur d'onde (m)
- t_{obs} : temps d'observation (d'intégration)
- T_{sys} : température du bruit du système (K)
- C_n^2 : paramètre de structure (de l'indice de réfraction (m^{-2/3})).

La diffusion par temps clair produit généralement des signaux avec un rapport signal/bruit plus faible que la diffusion par les particules de précipitation; cela constitue donc une situation plus délicate, car un fonctionnement fiable par tous les temps nécessite un rapport signal/bruit adéquat même en présence de faibles conditions de diffusion dans l'atmosphère. On retrouve par exemple ces conditions en période hivernale de faible humidité et en présence de faible turbulence, c'est-à-dire quand le courant-jet est à 10-15 km d'altitude.

L'équation (4-18) n'est valable que si la demi-longueur d'onde du radar (appelée longueur d'onde de Bragg) dans le sous-domaine inertiel de la turbulence atmosphérique se situe dans le sous-domaine inertiel de la turbulence complètement développée, c'est-à-dire $l_0 \leq \lambda/2 \leq L_0$, où l_0 désigne l'échelle intérieure (limite inférieure de ce sous-domaine inertiel) et L_0 l'échelle externe de la turbulence.

De fait, la structure de la turbulence atmosphérique restreint concrètement les longueurs d'onde utilisables du radar profileur de vent à une plage d'environ 10 à 0,2 m (30 à 1 500 MHz). Les structures turbulentes du champ de l'indice de réfraction de taille inférieure à l_0 se dissipent rapidement sous forme de chaleur par viscosité, et entraînent ainsi une coupure visqueuse du processus de diffusion. Les petites longueurs d'onde ne peuvent donc pas être utilisées pour l'établissement de profils du vent par temps clair en raison de l'absence de fluctuations de l'indice de réfraction à une échelle de $\lambda/2$.

De plus, même si le paramètre de structure de l'indice de réfraction est indépendant de la fréquence à l'intérieur de la plage de longueurs d'onde de Bragg correspondant au sous-domaine inertiel, il dépend fortement de la hauteur et varie de plusieurs ordres de grandeur.

La dépendance en fréquence restante est principalement liée au facteur de longueur d'onde, le bruit cosmique contribuant dans une large mesure à la seule température de bruit du système pour les longueurs d'onde supérieures à environ 1 m.

Le rapport signal/bruit (selon l'équation (4-18)) peut évidemment être augmenté en utilisant les éléments suivants:

- antennes à grande ouverture;
- puissance de crête et FRI élevées pour augmenter la puissance moyenne;
- techniques de compression d'impulsion;
- grande longueur d'onde;
- grande sensibilité du récepteur et faible niveau de bruit du récepteur;
- résolution de la hauteur plus grossière (impulsions plus longues); et
- temps d'intégration plus long.

Toutefois, de telles mesures ont toujours des conséquences sur d'autres paramètres de qualité de fonctionnement du radar, ainsi que sur le coût de l'instrument. Il convient de noter en particulier que l'augmentation de la FRI n'est possible que dans la mesure où les problèmes d'ambiguïté de portée (échos de deuxième trajet) sont évités. La résolution en portée étant déterminée par la largeur de l'impulsion, il y a en outre un compromis direct entre la résolution en portée et la couverture en altitude. C'est pourquoi les radars profileurs de vent fonctionnent souvent dans deux modes: un mode inférieur utilisant une impulsion courte pour obtenir la meilleure résolution verticale possible au détriment de la portée verticale; et un mode supérieur, où on utilise une impulsion plus longue avec une résolution plus grossière pour maximiser la couverture en altitude.

4.3.2 Aspects relatifs au fonctionnement et aux fréquences

Une large ouverture d'antenne et une grande puissance d'émission moyenne coûtent cher. L'antenne et l'amplificateur de puissance d'un radar profileur de vent représentent souvent plus de la moitié du coût total d'un système en place. Par conséquent, les progrès technologiques dans ces domaines constituent des moyens relativement onéreux d'accroître la performance.

S'agissant des ouvertures d'antenne, toutefois, un autre facteur détermine une taille minimale. Les radars profileurs de vent orientent successivement le faisceau principal vers différentes directions indépendantes (au moins trois). Pour relever les données, les systèmes précédents utilisaient généralement deux ou quatre azimuts orthogonaux, à des angles d'élévation d'environ 75° et parfois à la verticale. Les modèles d'antenne plus récents offrent nettement plus de souplesse pour l'orientation du faisceau. L'ouverture du faisceau doit être assez faible pour délimiter les différentes positions. On peut utiliser des ouvertures angulaires pleine largeur 3 dB de 3° à 10°, qui correspondent à des gains d'antenne de 36 dBi à 27 dBi. Le gain détermine l'ouverture équivalente selon l'équation (4-19):

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-19)$$

En raison du brouillage, de la congestion dans le spectre et de la réglementation nécessaire, on ne peut choisir librement les fréquences pour les radars profileurs. Certaines applications exigeantes, comme le radar de recherche MU au Japon et l'Eastern and Western Space Launch Ranges aux États-Unis d'Amérique, ont nécessité l'emploi de radars très gros (environ 10 000 m²), puissants (250 kW et plus en crête, 12,5 kW et plus en moyenne), à impulsions courtes (1 µs), qui fonctionnent au voisinage de 50 MHz. La recherche a aussi utilisé d'autres profileurs sans brouillage à des fréquences de 40 à 70 MHz.

Les radars profileurs de vent en ondes métriques, par exemple dans la gamme 46-68 MHz, conformément au numéro **5.162A** du RR, fourniront des profils de vent jusqu'à 30 km d'altitude et constitueront donc une composante importante des systèmes météorologiques. Les radars profileurs de vent en ondes métriques possèdent généralement les caractéristiques suivantes:

- Puissance maximale comprise entre 10 et 80 kW et puissance moyenne inférieure à 2 000 W.
- L'antenne comprend normalement un réseau de plus de 100 éléments qui sont regroupés différemment pour les modes d'émission et de réception, avec un gain de 20 à 30 dBi.

- Normalement alignés verticalement, mais peuvent pivoter par rapport au zénith de 20 degrés au maximum; la résolution en altitude des radars en ondes métriques est comprise entre 150 et 1 500 m selon la durée de l'impulsion et l'altitude du profil.
- La largeur de bande nécessaire normale est de 1 MHz.

Les profileurs qui fonctionnent dans la gamme 400-500 MHz ont été conçus pour (voir aussi la Recommandation UIT-R M.1085):

- mesurer les profils du vent de 0,5 km à 16 km au-dessus du radar avec une résolution verticale de 150-250 m à basse altitude et de 300-1 000 m à haute altitude, au moyen d'antennes présentant un gain de 32-34 dBi environ;
- des puissances moyennes de 500 et 2 000 W pour les sondages à basse et à haute altitude respectivement;
- des largeurs de bande nécessaires inférieures à 2 MHz.

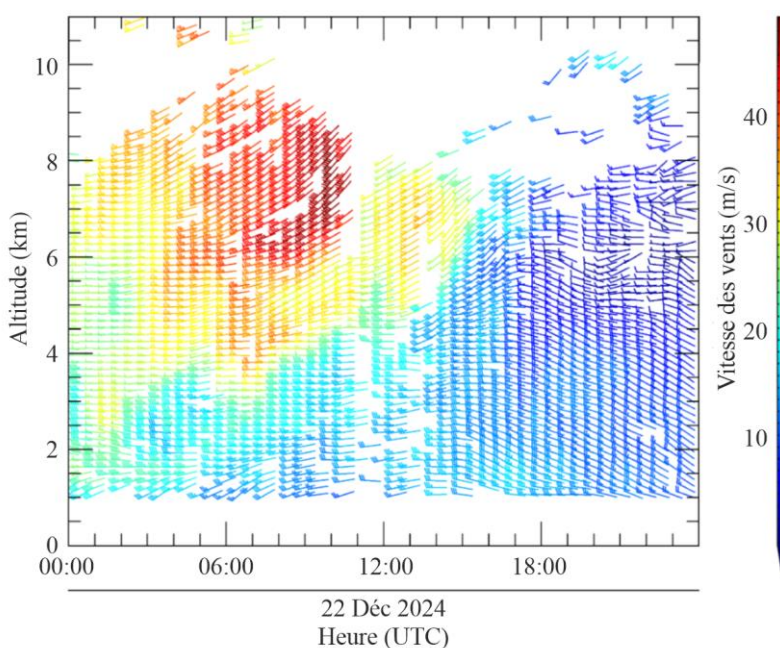
Augmenter la fréquence opérationnelle d'un radar profileur de vent permet d'obtenir une résolution de mesure supérieure mais au prix d'un nombre inférieur de mesures de la hauteur. Les appareils qui fonctionnent à 915 MHz ou plus sont généralement considérés comme des profileurs de la couche limite qui ne peuvent mesurer les profils du vent que dans les premiers kilomètres de l'atmosphère. Ils offrent une résolution verticale d'environ 100 m, sont munis d'antennes dont le gain est inférieur à 30 dBi et ont une puissance moyenne de quelque 50 W dans les largeurs de bande d'environ 2,5 MHz.

À titre d'exemple, des graphiques vitesse des vents/altitude produits par une installation fixe de profileur fonctionnant à 482 MHz est illustré aux Fig. 4-25 et 4-26. L'orientation de chaque barre représente la direction en fonction de l'altitude (axe vertical) et du temps (axe horizontal), la couleur indique la vitesse.

Le graphique de la Fig. 4-25 montre des données pour le mode dit inférieur, dans lequel on utilise une largeur d'impulsion courte de 1 700 ns et une plage d'échantillonnage allant jusqu'à 10,5 km environ. Les données du mode supérieur utilisant une impulsion de 3 300 ns à 4 bits (compression d'impulsion avec un codage de phase binaire utilisant des séquences complémentaires) sont présentées dans la Fig. 4-26. Il convient de noter que l'échantillonnage de distance commence à environ 5 km d'altitude seulement et s'étend jusqu'à une quinzaine de km.

FIGURE 4-25

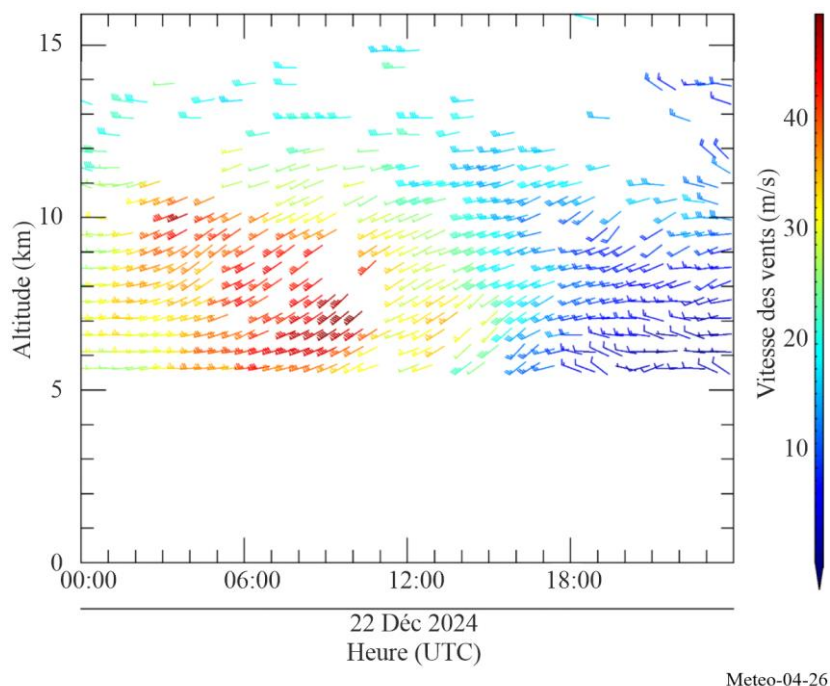
Vitesse des vents en fonction de l'altitude – mode inférieur (impulsion de 1 700 ns)



Meteo-04-25

FIGURE 4-26

Vitesse des vents en fonction de l'altitude – mode supérieur (impulsion de 3 300 ns, codage en phase, 4 bits)



4.3.3 Besoins actuels et futurs de spectre

Les radars profileurs de vent sont des systèmes au sol à antenne de un ou deux mètres de hauteur et essentiellement à faisceaux verticaux. L'espacement géographique et l'effet d'écran du terrain offrent une protection efficace contre le brouillage entre appareils. Ainsi, dans un réseau, des profileurs distants d'au moins 50 km sur terrain plat – moins sur sol accidenté ou arboré – pourraient fonctionner sur la même fréquence. Les profileurs sont souvent plus facilement compatibles avec les services au sol pour les mêmes raisons. Cependant, il pourrait être difficile d'assurer la coexistence entre les radars profileurs de vent et les systèmes à satellites, car les radars profileurs sont tournés vers le haut. Dans ce scénario, le partage de la même bande pourrait s'avérer inconfortable.

Il est communément admis qu'il faut une largeur de bande de 0,5 à 1,5 MHz pour les radars profileurs de vent en ondes métriques, une largeur de bande de 2 à 3 MHz au voisinage de 400 MHz pour les systèmes en ondes décimétriques, et une largeur de bande de 2,5 MHz au voisinage de 1 000 MHz ou 1 300 MHz pour les radars profileurs de vent. On peut donc convenir que la Résolution **217 (Rév.CMR-23)** assure un choix suffisant de fréquences radioélectriques:

«... de prier instamment les administrations de mettre en œuvre les radars profileurs de vent en tant que systèmes du service de radiolocalisation dans les bandes suivantes, en tenant dûment compte de l'incompatibilité possible avec d'autres services et des assignations aux stations de ces services, et donc du principe de l'espacement géographique, en particulier pour les pays voisins, et ayant à l'esprit la catégorie de chacun de ces services:

- 46-68 MHz conformément au numéro **5.162A**
- 440-450 MHz
- 470-494 MHz conformément au numéro **5.291A**
- 904-928 MHz dans la Région 2 seulement
- 1 270-1 295 MHz
- 1 300-1 375 MHz»

«... qu'au cas où la compatibilité entre les radars profileurs de vent et les autres systèmes radioélectriques fonctionnant dans la bande 440-450 MHz ou 470-494 MHz ne pourrait pas être assurée, on pourrait envisager d'utiliser la bande de fréquences 420-435 MHz ou 438-440 MHz».

4.3.4 Partage du spectre

Les bandes attribuées aux profileurs par la CMR-97 ont été soigneusement choisies pour minimiser le brouillage potentiel entre les différents utilisateurs. Avant que les bandes pour les profileurs de vent aient été identifiées, un réseau a été développé à titre expérimental dans la bande 400,15-406 MHz. Or l'expérience a montré que l'utilisation de radars profileurs de vent dans la bande 400,15-406 MHz perturbait le fonctionnement du système COSPAS-SARSAT.

La Résolution **217 (Rév.CMR-23)** identifie le spectre à utiliser pour les radars profileurs de vent et recommande donc spécifiquement de ne pas utiliser de radars profileurs de vent dans la bande de fréquences 400,15-406 MHz. Ce réseau expérimental a néanmoins permis de collecter quantité d'informations sur la compatibilité des radars profileurs de vent avec d'autres services. La densité spectrale de p.i.r.e. de ces profileurs dans le plan horizontal est d'environ:

- -18 dB (W/kHz), à la fréquence centrale (449 MHz)
- -36 dB (W/kHz), décalé de 0,5 MHz
- -55 dB (W/kHz), décalé de 1 MHz
- -70 dB (W/kHz), décalé de 2 MHz
- -79 dB (W/kHz), décalé de 4 MHz

L'espacement géographique est un moyen très efficace de partage vu ces faibles valeurs, combinées à des antennes basses et à des affaiblissements en cours de trajet proportionnels à $1/r^4$ à la surface de la Terre.

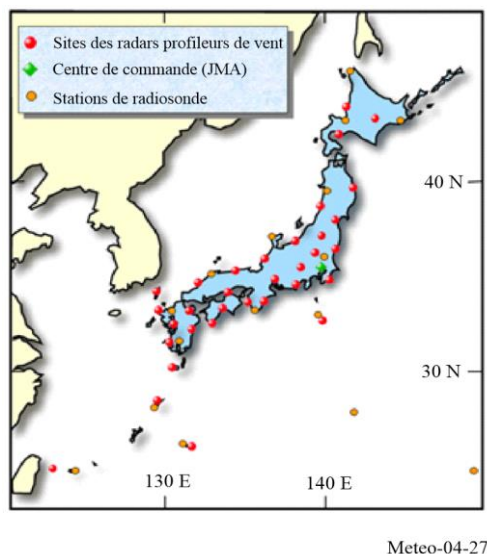
Dans le faisceau principal, la densité spectrale de p.i.r.e. est accrue de 57 dB. En conséquence, les récepteurs aéroportés et satellitaires sont soumis à un brouillage nettement plus fort. Des affaiblissements en cours de trajet proportionnels à $1/r^2$ aggravent le problème. Les efforts pour résoudre le problème posé par les radars profileurs de vent dans la bande 400,15-406 MHz ont montré que la modulation dont se servaient ces profileurs à 404 MHz avait un impact notable sur leurs caractéristiques de partage. Actuellement, les impulsions sont codées en phase afin de distinguer les deux ou trois éléments de chaque impulsion et d'effectuer la compression. Sans ce codage, le spectre émis serait formé de lignes séparées par la FRI. On a toutefois imposé un membre d'une séquence de codage de phase pseudo-aléatoire de 64 bits de longueur sur chaque impulsion, en succession, de manière que les lignes spectrales apparaissent à intervalle de FRI/64 avec une puissance réduite d'un facteur de 64. De plus, les émetteurs des profileurs étaient éteints par commande informatique dès qu'un satellite COSPAS-SARSAT était détecté à plus de 41 degrés au-dessus de l'horizon du profileur. (Comme ces satellites sont peu nombreux, les pertes de données sont négligeables.)

Le codage de phase appliqué aux émissions des profileurs à 404 MHz doit être «défait» par le récepteur afin que le brouillage provenant de systèmes autres apparaisse incohérent et semblable à du bruit. Ainsi, le signal minimal détectable (profileur) se situe à environ -170 dBm, alors que le brouillage ne commence à être gênant qu'à -135 dBm et plus.

Autre exemple de partage avec les radars profileurs de vent, la bande 1 215-1 300 MHz est attribuée au service de radionavigation par satellite depuis la CMR-2000. Depuis, des études techniques ont été menées pour évaluer la compatibilité entre les systèmes du service de radionavigation par satellite et les radars profileurs de vent dans la bande 1 270-1 295 MHz. Le bilan de ces études figure dans le rapport ECC 90 du Comité sur les Communications électroniques. Il y est dit que les systèmes du service de radionavigation par satellite peuvent, dans certaines conditions, perturber voire dégrader le fonctionnement des profileurs de vent, tout du moins ceux à trois faisceaux. Ce rapport propose toutefois une liste de techniques (matérielles ou logicielles) qui pourraient aider à dépasser ces difficultés. Parmi ces techniques, on propose de bien choisir la direction de l'antenne, d'ajouter des faisceaux ou de choisir les fréquences 1 274 ou 1 294 MHz pour les radars profileurs de vent, aux zéros des modulations des systèmes du service de radionavigation par satellite, cette dernière proposition étant probablement la plus simple.

Le Service météorologique japonais (JMA, Japan Meteorological Agency) utilise un réseau WINDAS (Wind Profiler Network and Data Acquisition System) aux fins de surveillance du développement et de prévision de phénomènes météorologiques extrêmes. Ce réseau se compose de trente-trois profileurs de vent à 1,3 GHz installés partout au Japon et qui communiquent avec un centre de commande situé au siège du JMA à Tokyo (voir la Fig. 4-27).

FIGURE 4-27

Exemple d'un réseau de radars profileurs de vent

Les données sont ensuite diffusées partout dans le monde, via le Système mondial de télécommunication, et peuvent également être consultées sur le site web du JMA (<http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>). En outre, ces données sont recoupées avec celles de radars Doppler et d'aéronefs commerciaux pour obtenir une analyse complète d'observation des vents en altitude.

4.4 Radar océanographique à ondes décamétriques

En océanographie, le radar à ondes décamétriques est une technologie de télédétection utilisée pour surveiller les courants de surface océaniques, les vagues et la direction des vents. Ces systèmes radar, qui fonctionnent dans la bande des ondes décamétriques (3-30 MHz), extraient des informations à la surface des océans grâce aux phénomènes de diffusion de Bragg.

Dans ce contexte, la diffusion de Bragg décrit la superposition des ondes radioélectriques diffusées par les ondes de surface océaniques, où la longueur d'une onde océanique correspond à la moitié de celle d'une onde radioélectrique. Les radars océanographiques sont cohérents et peuvent utiliser le décalage Doppler induit par le mouvement de la surface de l'océan pour estimer la vitesse de la surface de l'océan.

Les systèmes radar d'observation des océans utilisent actuellement divers types d'antenne. Certains utilisent une antenne Yagi à trois éléments; d'autres un système à commande de phase permettant d'effectuer un balayage dans la direction azimutale à l'aide de plusieurs ensembles d'antennes d'émission de type Yagi, limitant ainsi la zone géographique de propagation du signal radar océanographique. Deux grandes techniques d'émission sont utilisées dans les radars océanographiques: les impulsions de type à ondes entretenues et les impulsions comprimées de type à ondes entretenues modulées linéairement en fréquence.

Les radars sont généralement déployés en réseaux le long des côtes et fournissent des informations dans des zones côtières étendues jusqu'à 200 km du littoral. Environ 500 systèmes sont déployés dans le monde. Les systèmes sont répartis dans chacune des trois Régions de l'UIT, la majorité étant situés le long des côtes de l'Amérique du Nord, de l'Europe et de l'Asie. On prévoit que le nombre de systèmes doublera au cours des 20 prochaines années.

Lors de la CMR-12, l'UIT a approuvé la Résolution **612 (Rév.CMR-12)**, qui donne des précisions sur l'espace spectral pour les radars océanographiques à ondes décamétriques. Les bandes de fréquences sont délimitées dans chaque Région de l'UIT et sont indiquées dans le Tableau 4-6.

TABLEAU 4-6

Bandes de fréquences et largeurs spectrales totales attribuées aux radars océanographiques en ondes décimétriques

Bandes de fréquences attribuées (kHz)		
Région 1 de l'UIT	Région 2 de l'UIT	Région 3 de l'UIT
4 438-4 488		
5 250-5 275		
9 305-9 355	Pas d'attribution dans cette Région	9 305-9 355
13 450-13 550		
16 100-16 200		
24 450-24 600		
26 200-26 350		
39 000-39 500	Pas d'attribution dans cette Région	39 500-40 000
42 000-42 500	Pas d'attribution dans cette Région	Pas d'attribution dans cette Région

Références

Springer Handbook of Atmospheric Measurements | SpringerLink – Chapitre 31 (2021).

Cambridge University Press Atmospheric Radar (2016).

Radar for Meteorological and Atmospheric Observations | SpringerLink (2014).

CHAPITRE 5

La télédétection spatiale passive et active pour les activités météorologiques et les activités environnementales connexes

5.1 Introduction

Les satellites météorologiques sont connus dans la plupart des régions du monde et les images qu'ils produisent apparaissent régulièrement à la télévision, dans la presse populaire et sur l'Internet. Aujourd'hui, on a l'habitude de voir des images à couleurs rehaussées, superposées à des cartes, présentant la nébulosité, les températures de surface, la couverture de neige et d'autres phénomènes. On peut voir aussi, moins fréquemment, l'emplacement des feux de friche et les nuages de fumée qui s'en dégagent, les cendres volcaniques et les températures à la surface de la mer, qui suscitent davantage l'attention en raison du phénomène *El Niño*.

Toutes ces images sont générées essentiellement à partir des données enregistrées à l'aide de capteurs fonctionnant dans le visible et l'infrarouge. Toutefois, quantité de ces produits et autres produits sont développés à l'aide d'une grande variété d'hyperfréquences, parfois combinées à des mesures à d'autres fréquences.

Ainsi, rares sont ceux qui savent que les systèmes de télédétection spatiale de la surface et de l'atmosphère de la Terre qui fonctionnent dans des fréquences radioélectriques, des ondes métriques aux hyperfréquences et jusqu'aux régions supérieures du spectre, jouent un rôle de plus en plus essentiel dans la recherche et l'exploitation météorologiques, en particulier pour limiter l'impact des catastrophes liées au temps et au climat, et pour la compréhension scientifique, la surveillance et la prévision des changements climatiques et de leurs effets.

Les impressionnants progrès réalisés ces dernières années en matière d'analyses et de prévisions météorologiques et climatiques, notamment en termes d'alertes sur les phénomènes météorologiques dangereux (fortes pluies, tempêtes, cyclones) pouvant toucher toutes les populations et les économies, sont en grande partie attribuables aux données d'observations spatiales et à leur intégration dans des modèles numériques.

La télédétection (passive et active) contribue dans une large mesure à la qualité des prévisions numériques du temps (PNT), en améliorant de 50% les capacités de prévision (40% de cette amélioration est attribuable aux capteurs passifs et les 10% restants aux capteurs actifs) grâce à toutes les données d'observation qui alimentent en temps réel les modèles. Du fait de cette amélioration conséquente, on peut reconnaître aux capteurs passifs et actifs à hyperfréquences en fonctionnement sur les satellites météorologiques et d'observation de la Terre une grande part des retombées socio-économiques considérables des prévisions météorologiques.

Les systèmes de télédétection spatiale les plus employés appartiennent à deux catégories: les systèmes **passifs** et les systèmes **actifs**. Relevant du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS), ils sont exploités principalement sur des satellites non géostationnaires, bien que certains systèmes du SETS (passive) qu'il est prévu d'exploiter fonctionneront sur l'orbite géostationnaire.

Dans la **télédétection passive**, on emploie que des récepteurs, sans émetteur. Le rayonnement ciblé par ces récepteurs est d'origine naturelle, de très faible intensité, et contient des informations essentielles sur les processus physiques étudiés. On s'intéresse surtout aux pointes de rayonnement, qui signalent la présence de certains produits chimiques, ou à l'absence de rayonnement à certaines fréquences, qui dénote l'absorption des signaux par des gaz atmosphériques. L'intensité ou l'absence de signaux à des fréquences précises indique si certains gaz (humidité et polluants, par exemple) sont présents et, si c'est le cas, en quelle quantité et à quel endroit. On recueille ainsi une foule d'informations sur l'environnement. Les bandes de fréquences à utiliser sont choisies en fonction des propriétés physiques précises (par exemple la résonance du rayonnement moléculaire ou l'absorption) de la substance examinée, propriétés qui varient suivant les bandes de fréquences. Comme l'intensité des signaux à une fréquence donnée peut dépendre de diverses variables, il faut utiliser plusieurs fréquences afin de résoudre les multiples inconnues. C'est la technique la plus courante pour mesurer certaines caractéristiques de l'atmosphère et de la surface de la Terre.

La **télédétection active**, quant à elle, fait appel à la fois à des émetteurs et à des récepteurs embarqués sur un satellite. Normalement, c'est le même satellite qui transmet le signal et reçoit le signal réfléchi, bien ce ne soit pas toujours le cas. Ses applications comprennent notamment, mais non exclusivement, la mesure des caractéristiques de la surface de la mer, par exemple la hauteur des vagues et les vents, et l'établissement de la densité des arbres dans les forêts ombrophiles.

La compatibilité des deux types de télédétection soulève les mêmes questions que dans le cas des autres services spatiaux: brouillage mutuel entre le récepteur du satellite et d'autres stations d'émission, que ce soit au sol ou dans l'espace. Les problèmes sont résolus par des techniques bien connues, accompagnées souvent d'efforts de coordination avec les autres utilisateurs en ce qui concerne les limites de puissance, les caractéristiques d'antenne, le temps et le partage des fréquences.

Les satellites de télédétection passive, en particulier ceux couvrant une grande zone de mesure, présentent une sensibilité particulière parce que, pour chaque mesure, est accumulé le rayonnement produit par une multitude d'émetteurs au sol, dans la bande et en dehors. Si un seul émetteur de Terre ne risque pas d'entraîner des erreurs dans les mesures de télédétection passive, l'effet conjugué d'un grand nombre d'entre eux peut entraîner une accumulation de signaux brouilleurs et venir fausser les mesures effectuées. Ce brouillage cumulatif causé par plusieurs émetteurs est source de préoccupations, notamment en ce qui concerne les applications mobiles ou le mobile large bande à haute densité (y compris les Télécommunications mobiles internationales), les émissions du service fixe à haute densité (SFHD), les applications à bande ultralarge (UWB, *ultra wide-band*) et les systèmes de courte portée (SRD, *short-range device*) ou systèmes destinés à une utilisation industrielle, scientifique et médicale (ISM). Le problème potentiel vient de la densité spatiale de ces émetteurs dans une zone de mesure conjuguée à leurs caractéristiques individuelles. La situation tend à devenir de plus en plus problématique du fait de la densité croissante de ces systèmes actifs de Terre; des cas de brouillage préjudiciable ont d'ailleurs déjà été signalés.

Plusieurs paramètres géophysiques contribuent, à degrés divers, aux émissions naturelles pour un paramètre spécifique à observer à une fréquence donnée. Il faut donc effectuer des mesures simultanées à plusieurs fréquences dans le spectre des hyperfréquences afin d'isoler et de définir chaque contribution aux émissions naturelles globales et extraire les paramètres requis de la série de mesures donnée. Par conséquent, les brouillages qui ont un impact sur une quelconque bande de fréquences «passive» pourront avoir un impact sur les mesures globales d'un composant atmosphérique donné obtenues sur un ensemble de fréquences prescrites.

Dans le cas d'un ensemble émetteur-récepteur, on connaît la nature et les caractéristiques du signal et il est relativement simple d'établir si celui-ci est reçu correctement. Une foule d'études ont été consacrées à la détection et la correction des erreurs relatives aux systèmes de radiocommunication. Malheureusement, ces techniques sont inutiles quand on ne connaît pas les caractéristiques des divers signaux reçus, ce qui est précisément le cas dans la télédétection passive, dont la sensibilité particulière aux brouillages est attribuable à la nature indéterminée du signal naturel qu'il doit recevoir et à la très faible intensité du rayonnement naturel mesuré.

De très faibles niveaux de brouillage reçus par un capteur passif suffisent à dégrader la qualité de ses données. Le plus gros risque avec ce type de système est que le brouillage passe inaperçu et que les données erronées recueillies faussent gravement les analyses et les conclusions. Dans la plupart des cas, les capteurs passifs ne font pas la différence entre émissions d'origine naturelle et anthropiques. Les erreurs résultantes peuvent ainsi passer inaperçues et ne pas être corrigées. Il apparaît donc qu'à l'heure actuelle, le maintien de l'intégrité des données repose uniquement sur la prévention du brouillage et l'utilisation de restrictions réglementaires en matière de brouillage et de limites de puissance des émetteurs à l'échelle mondiale. On peut noter qu'un certain nombre de dispositions du Règlement des radiocommunications prévoit l'application de ces limites de puissance aux émetteurs actifs pour protéger les capteurs passifs contre le brouillage dans la bande et en dehors.

On s'est beaucoup intéressé ces dernières années à l'utilisation de radars de détection des nuages à ondes millimétriques pour la recherche. Mieux comprendre le rôle des nuages dans le système climatique est hautement prioritaire pour les travaux sur l'évolution du climat. Ces besoins ont été à l'origine de la mise au point de radars profileurs de nuage à ondes millimétriques, permise par les récents progrès technologiques réalisés. Fonctionnant surtout au voisinage de 36 GHz (bande Ka) et de 94 GHz (bande W), ces radars fournissent maintenant les informations qualitatives et quantitatives dont les chercheurs en climatologie ont besoin. Leur capacité de déceler les petits hydrométéores, leur résolution spatiale élevée, leur sensibilité minimale aux échos parasites au sol et leur taille assez réduite en font d'excellents outils pour les études sur les nuages. Ils peuvent être utilisés au sol en service fixe ou mobile, à bord d'aéronefs et sur des plates-formes spatiales.

5.2 La radiométrie passive à hyperfréquences

La radiométrie passive à hyperfréquences est fondamentale pour l'observation de la Terre. Dans le cadre du SETS, on utilise des capteurs passifs conçus pour recevoir et mesurer les émissions naturelles provenant de la surface de la Terre et de l'atmosphère. La fréquence et l'intensité de ces émissions déterminent le type et l'état d'un certain nombre de paramètres géophysiques importants de l'atmosphère et de la surface (terre, mer et calotte glaciaire), qui décrivent l'état et les mécanismes du système terres émergées/atmosphère/océans:

- paramètres de la surface de la Terre, par exemple l'humidité du sol, la température de surface de la mer, les contraintes du vent sur les océans, l'étendue et l'âge de la glace, la couverture de neige, les précipitations au-dessus des terres;
- paramètres atmosphériques tridimensionnels (basse, moyenne et haute atmosphère), tels que les profils de température, la teneur en vapeur d'eau et les profils de concentration des gaz à l'état de trace importants du point de vue radioactif et chimique (l'ozone, l'oxyde nitreux et le chlore par exemple).

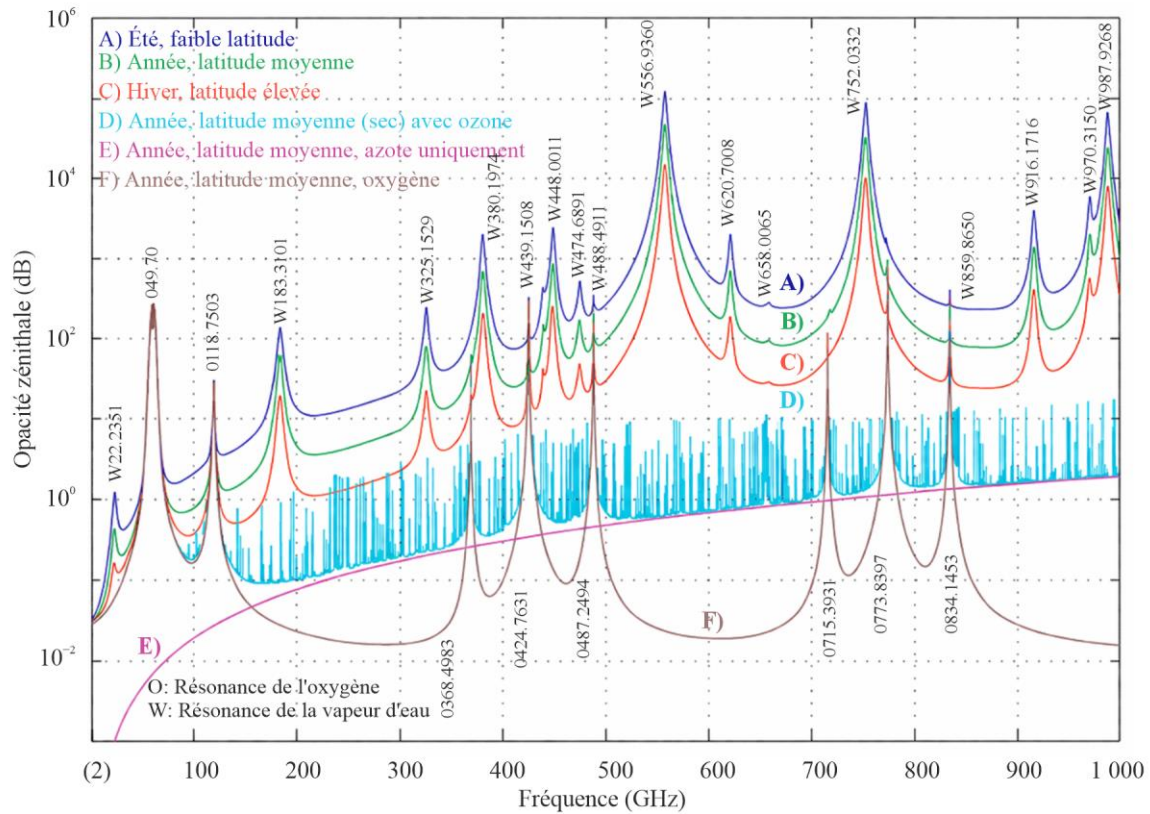
Les techniques à hyperfréquences permettent d'observer la surface de la Terre et l'atmosphère à partir d'une orbite basse, même en présence de nuages car ces derniers sont presque transparents à moins de 100 GHz. Cela présente un intérêt considérable pour l'observation de la Terre car plus de 60% du globe est généralement recouvert de nuages. Outre cette possibilité d'observation par tous les temps, les mesures par capteur passif à hyperfréquences peuvent être effectuées à toute heure de la journée car elles ne nécessitent pas la lumière du jour. La télédétection passive à hyperfréquences est couramment employée en surveillance et en recherche météorologiques, climatologiques et environnementales (applications opérationnelles et scientifiques), où l'on a besoin d'une couverture mondiale répétitive fiable.

5.2.1 Besoins de spectre

En général, plusieurs paramètres géophysiques contribuent, dans une plus ou moins grande mesure, aux émissions naturelles que l'on peut observer à une fréquence donnée. Il faut donc effectuer des mesures simultanées à plusieurs fréquences dans le spectre des hyperfréquences afin d'isoler et de définir chaque contribution. Les caractéristiques d'absorption de l'atmosphère (voir la Fig. 5-1) sont marquées par des crêtes attribuables à la résonance moléculaire des gaz atmosphériques et par le «continuum» de la vapeur d'eau, qui augmente sensiblement en fonction de la fréquence. Dans la Fig. 5-1, l'opacité zénithale révèle à quel point l'atmosphère est transparente pour une onde électromagnétique à une fréquence donnée. Une faible opacité indique qu'un capteur spatioporté est en mesure de prendre des images à une distance plus faible de la surface. Une grande opacité indique que les mesures effectuées dans l'espace dépendront davantage des paramètres atmosphériques qui provoquent cette grande opacité, généralement l'oxygène ou la vapeur d'eau.

FIGURE 5-1

Opacité zénithale de l'atmosphère due à la vapeur d'eau et aux constituants secs



Meteo-05-01

Des graphiques semblables pour les surfaces terrestres et de l'eau sont présentés dans les Fig. 5-2 et 5-3. Ils montrent clairement que chaque portion de spectre est unique sur le plan de la sensibilité à différents paramètres physiques. C'est pourquoi les mesures passives doivent être effectuées à des fréquences précises pour pouvoir mesurer leurs paramètres cibles.

Le choix des fréquences les plus adaptées à la détection passive à hyperfréquences dépend beaucoup des caractéristiques de l'atmosphère:

- pour l'observation des paramètres de surface, on choisit des fréquences inférieures à 100 GHz, où l'absorption atmosphérique est la plus faible. Une fréquence par octave est nécessaire en moyenne;
- pour l'observation des paramètres atmosphériques, on choisit très soigneusement les fréquences, surtout au-dessus de 50 GHz, où se situent les crêtes d'absorption des gaz atmosphériques.

Les fréquences et largeurs de bande nécessaires en deçà de 1 000 GHz sont présentées au Tableau 5-1. La plupart des fréquences attribuées au-dessus de 100 GHz renferment les raies d'absorption d'espèces atmosphériques importantes à l'état de traces.

TABLEAU 5-1

Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées pour la télédétection passive par satellite au-dessous de 1 000 GHz *

Bande de fréquences (GHz)	Largeur de bande (MHz)	Principales mesures
1,37-1,427	57	Humidité du sol, salinité, température à la surface de l'océan, indice de végétation
2,64-2,7	60	Salinité de l'océan, humidité du sol, indice de végétation
4,2-4,4	200	Température à la surface de l'océan
4,95-4,99	40	Température à la surface de l'océan
6,425-7,25 (N° 5.458 du RR)	350	Température à la surface de l'océan (aucune attribution)
10,6-10,7	100	Intensité de pluie, teneur en eau de fonte des neiges, morphologie glaciaire, état de la mer, vitesse du vent océanique
15,2-15,4	200	Vapeur d'eau, intensité de pluie
18,6-18,8	200	Pluie, état de la mer, glace sur les océans, vapeur d'eau, vitesse du vent océanique, pouvoir émissif et humidité du sol
21,2-21,4	200	Vapeur d'eau, eau liquide de nuage
22,21-22,5	290	Vapeur d'eau, eau liquide de nuage
23,6-24	400	Vapeur d'eau, eau à l'état liquide, canal associé pour le sondage atmosphérique
31,3-31,8	500	Glace sur la mer, vapeur d'eau, nappes de pétrole répandu, nuages, eau à l'état liquide, température de surface, fenêtre de référence pour la gamme 50-60 GHz
36-37	1 000	Intensité de pluie, neige, glace sur les océans, nuages
50,2-50,4	200	Fenêtre de référence pour le profil de température atmosphérique (température de surface)
52,6-59,3	6 700 ⁽¹⁾	Profil de température atmosphérique (raies d'absorption O ₂)
86-92	6 000	Nuages, nappes de pétrole répandu, glace, neige, pluie, fenêtre de référence pour sondages de température au voisinage de 118 GHz
100-102	2 000	N ₂ O, NO
109,5-111,8	2 300	O ₃
114,25-122,25	7 000 ⁽¹⁾	Co, profil de température atmosphérique (ligne d'absorption O ₂)
148,5-151,5	3 000	N ₂ O, température de surface de la Terre, paramètres des nuages, fenêtre de référence pour sondages de température
164-167	3 000	N ₂ O, teneur en eau et glace des nuages, pluie, CO, ClO
174,8-191,8	17 000 ⁽¹⁾	N ₂ O, profil de vapeur d'eau, O ₃
200-209	9 000	N ₂ O, ClO, vapeur d'eau, O ₃
226-231,5	5 500	Nuages, humidité, N ₂ O (226,09 GHz), CO (230,54 GHz), O ₃ (231,28 GHz), fenêtre de référence

TABLEAU 5-1 (*fin*)

Bande de fréquences attribuée (GHz)	Largeur de bande attribuée et {souhaitée} (MHz)	Principales mesures
235-238	3 000	O ₃
239,2-242,2	3 000	Particules de nuage de glace
244,2-247,2	3 000	Particules de nuage de glace
250-252	2 000	N ₂ O
275-286	11 000	N ₂ O, ClO
296-306	10 000	Canal latéral pour les sondages de température, oxygène, HNO ₃ , HOCl, N ₂ O, O ₃ , O ¹⁷ O,
313-356	43 000	Profil de vapeur d'eau, nuage, canal latéral pour les sondages de température HDO, ClO, HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , HOCl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O, CO, BrO, CH ₃ CN, N ₂ O, HCN
361-365	4 000	O ₃
369-392	23 000	Profil de vapeur d'eau H ₂ O
397-399	2 000	Profil de vapeur d'eau
409-411	2 000	Sondage de température
416-434	18 000	Oxygène, profil de température, O ₂
439-467	28 000	Profil de vapeur d'eau, nuage HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , N ₂ O, CO
497-502	5 000	Oxygène, profil de température, canal latéral pour profil de vapeur d'eau O ₂ , O ₃ , N ₂ O, BrO,
523-527	4 000	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau
538-581	43 000	Profil de vapeur d'eau ClO, H ₂ O, O ₃ , HNO ₃
611-630	19 000	Profil de vapeur d'eau, oxygène H ₂ O, ClO ₂ , SO ₂ , HNO ₃ , BrO, CH ₃ CN, (H ³⁷ Cl), H ₂ O ₂ , HOCl, O ₃ , HO ₂ , H ³⁵ Cl, CH ₃ Cl, O ¹⁸ O
634-654	20 000	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau HOCl, H ₂ ¹⁸ O, SO ₂ , ClO, HO ₂ , BrO, HNO ₃ , O ₃ , NO, N ₂ O
657-692	35 000	Profil de vapeur d'eau, nuage H ₂ O, HO ₂ , ClO, CH ₃ Cl, CO
713-718	5 000	O ₂
729-733	4 000	HNO ₃ , O ¹⁸ O
750-754	4 000	H ₂ O
771-776	5 000	O ₂
823-846	23 000	O ₂
850-854	4 000	NO
857-862	5 000	H ₂ O
866-882	16 000	Nuage, fenêtre
905-928	23 000	H ₂ O
951-956	5 000	O ₂ , NO, H ₂ O
968-973	5 000	H ₂ O
985-990	5 000	H ₂ O

* NOTE – Pour connaître les fréquences actuellement attribuées aux capteurs passifs, reportez-vous au Tableau d'attribution des bandes de fréquences du Règlement des radiocommunications. Pour en savoir plus sur les fréquences recommandées pour les capteurs passifs, reportez-vous à la dernière version de la Recommandation UIT-R RS.515.

(1) Cette largeur de bande est occupée par des canaux multiples.

5.2.2 Observation des paramètres à la surface de la Terre

Pour mesurer les paramètres de surface (ex. vapeur d'eau, température de surface de la mer, vitesse du vent, intensité des précipitations), il faut choisir les canaux «fenêtre» radiométriques de manière à obtenir un échantillonnage régulier dans le spectre des hyperfréquences, soit de 1 GHz à 90 GHz (une fréquence/octave, en moyenne). Dans certains cas, il n'est pas nécessaire de sélectionner très précisément les fréquences car les émissions naturelles de ces paramètres ne sont pas fortement dépendantes des fréquences. Plusieurs paramètres géophysiques contribuent habituellement, à divers niveaux, aux émissions qui peuvent être observées à une fréquence donnée. On le voit dans les Fig. 5-2 et 5-3, qui présentent la sensibilité des émissions naturelles hyperfréquences à divers paramètres géophysiques, selon la fréquence. La température de luminance mesure l'intensité de rayonnement thermique d'un objet, exprimée en unités de température en raison du lien entre l'intensité de rayonnement et la température physique de l'objet.

5.2.2.1 Observation des mesures sur les surfaces océaniques

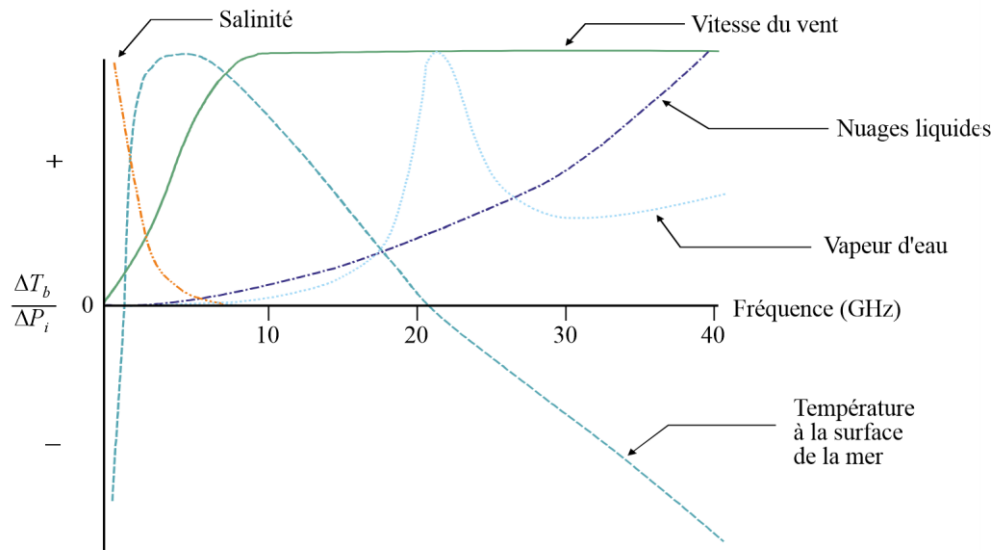
La télédétection sur les surfaces océaniques permet de mesurer quantité des paramètres également mesurés sur les terres (ex. vapeur d'eau, vitesse du vent, intensité des précipitations), ainsi que des paramètres fournissant des informations sur l'état de l'océan (ex. température de surface de la mer, salinité de l'océan, épaisseur de la glace de mer).

La Fig. 5-2 montre la sensibilité de la température de luminance aux paramètres géophysiques sur les surfaces océaniques:

- les mesures à basse fréquence, aux environs de 1,4 GHz, servent à établir la salinité de l'océan;
- les mesures avoisinant 6 GHz présentent la plus grande sensibilité à la température de surface de la mer, mais contiennent un léger apport dû à la salinité et à la vitesse du vent que l'on peut éliminer par des mesures aux alentours de 1,4 GHz et de 10 GHz;
- la région de 17-19 GHz, où la «signature» de la température de surface de la mer et de la vapeur d'eau atmosphérique est très faible, est idéale pour l'émissivité de la surface océanique, qui est directement liée à la vitesse du vent près de la surface ou à la présence de glace de mer. La température des surfaces océaniques est aussi plus ou moins sensible à la teneur totale en vapeur d'eau et aux nuages liquides;
- la teneur totale en vapeur d'eau est surtout mesurée au voisinage de 24 GHz, les nuages liquides au voisinage de 36 GHz;
- pour de nombreuses applications, cinq fréquences (proches de 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 24 GHz et 36 GHz) sont nécessaires pour déterminer les paramètres océaniques dominants.

FIGURE 5-2

Sensibilité de la température de luminance aux paramètres géophysiques au-dessus des océans



Meteo-05-02

5.2.2.2 Observation des mesures sur les terres émergées

Le problème est légèrement plus complexe au-dessus des terres étant donné la grande variabilité temporelle et spatiale des caractéristiques de surface (qui vont des régions recouvertes de neige ou de glace aux déserts et aux forêts ombrophiles tropicales). De plus, le signal reçu par le capteur passif traverse plusieurs milieux différents: le sol, peut-être couvert de neige et/ou de glace, la végétation, l'atmosphère et les nuages, parfois, la pluie ou la neige. Il faut aussi tenir compte du fait que, pour chaque milieu, plusieurs éléments peuvent influencer sur le rayonnement émis. Par exemple, la température de luminance d'un sol varie selon sa température, son humidité, sa texture et les irrégularités de la surface. De même, la contribution de la végétation est associée à la température et à la structure de la couverture végétale, par le biais de l'opacité et de l'albédo à diffusion unique (ex. le rapport lumière réfléchie/lumière incidente). Ces facteurs ont des effets sur les signaux en interdépendance avec les fréquences. La Fig. 5-3 présente la sensibilité normalisée, en fonction de la fréquence, de quelques paramètres clés.

On voit qu'au-dessus des terres et dans une zone tempérée moyenne, il faut avoir:

- une basse fréquence pour mesurer l'humidité du sol (autour de 1 GHz);
- des mesures aux environs de 5 GHz à 10 GHz, afin d'estimer la biomasse végétale une fois que l'on connaît la contribution de l'humidité du sol;
- deux fréquences autour de la crête d'absorption de la vapeur d'eau (généralement 18-19 GHz et 23-24 GHz) pour évaluer l'apport de l'atmosphère;
- une fréquence avoisinant 37 GHz, dans le but de déterminer l'eau liquide des nuages (à 18 GHz) et/ou la structure de la végétation (à 10 GHz) et la rugosité de la surface (à 1 GHz et 5 GHz ou 10 GHz).

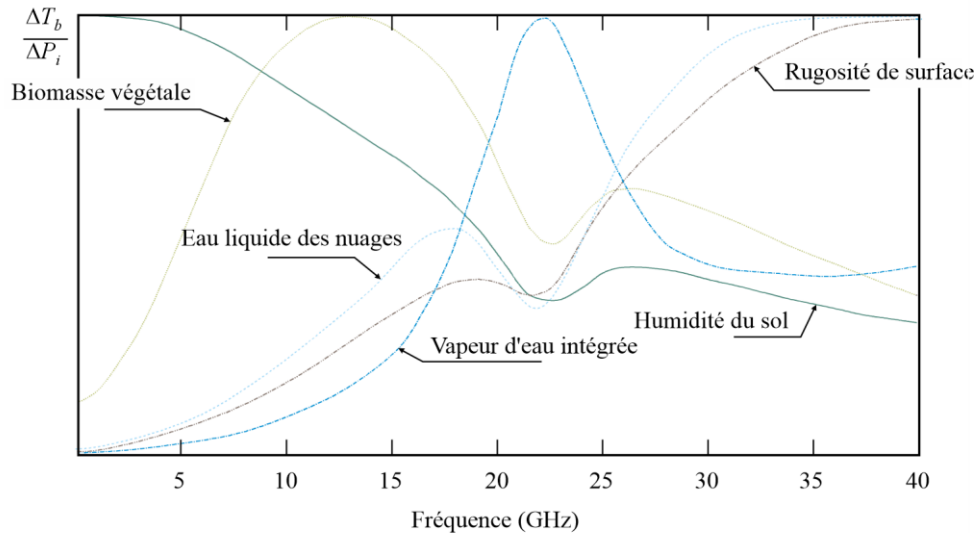
Une fréquence de 85 GHz ou 90 GHz est utile pour surveiller les pluies, mais uniquement lorsque tous les autres facteurs peuvent être évalués à des fréquences plus basses.

Des études effectuées à l'aide du radiomètre en hyperfréquence à balayage multibande (SMMR, *scanning multichannel microwave radiometer*) et de l'imageur en hyperfréquence spécialisé (SSM/I, *special sensor microwave/imager*) ont montré qu'il est possible d'obtenir plusieurs autres variables. Cela inclut la température de surface (mesure moins précise que dans l'infrarouge mais possible par tous les temps) à près de 19 GHz lorsqu'on peut estimer l'apport de la surface et de l'atmosphère.

Il est important de surveiller les zones recouvertes de neige et, là encore, la réalisation de mesures sur plusieurs fréquences est cruciale. On doit distinguer la neige de la glace, ainsi que la fraîcheur de la neige. Le signal est lié à la structure des couches et à la dimension des cristaux. Plusieurs fréquences sont nécessaires pour obtenir ces informations, généralement 19 GHz, 37 GHz et 85-90 GHz.

FIGURE 5-3

Sensibilité de la température de luminance aux paramètres géophysiques au-dessus des terres



Meteo-05-03

5.2.2.3 Paramètres auxiliaires pour d'autres instruments de télédétection

Les altimètres radar spatiaux utilisés à l'échelle planétaire, au-dessus des surfaces océaniques et terrestres, ont d'importantes applications en océanographie et en climatologie (voir § 5.2.3). Afin de supprimer les effets de la réfraction due à l'atmosphère, des données altimétriques très précises acquises par exemple au voisinage de 13,5 GHz doivent être complétées par une série de mesures passives auxiliaires au voisinage de 18,7 GHz, 24 GHz, 31 GHz ou 36 GHz, et certains canaux à haute fréquence pour obtenir de meilleures mesures à proximité des côtes.

Il est impératif d'avoir accès simultanément aux mesures effectuées à cinq fréquences différentes, au moins, pour séparer les différentes contributions aux signaux qui sont mesurés par un satellite.

5.2.3 Caractéristiques techniques

Les capteurs passifs se distinguent par leur sensibilité radiométrique et leur résolution géométrique.

5.2.3.1 Sensibilité radiométrique

Ce paramètre est généralement défini comme la plus petite différence de température, ΔT_e , que le capteur est capable de détecter. ΔT_e est obtenu par la formule suivante:

$$\Delta T_e = \frac{\alpha T_s}{\sqrt{B\tau}} \quad \text{K} \quad (5-1)$$

où:

- B : largeur de bande du récepteur (Hz)
- τ : temps d'intégration (s)
- α : constante du système récepteur (varie selon la configuration)
- T_s : température de bruit du système récepteur (K).

5.2.3.2 Seuil ΔP du radiomètre

C'est le plus petit changement de puissance que le capteur passif est en mesure de détecter. ΔP est obtenu au moyen de la formule suivante:

$$\Delta P = k \Delta T_e B \quad W \quad (5-2)$$

où:

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K), est la constante de Boltzmann.

ΔP est calculé en utilisant ΔT_e ; il est utilisé pour déterminer le brouillage maximal admissible qu'un capteur peut tolérer sans dégradation des mesures. À l'avenir, T_s diminuera ainsi que ΔT_e (voir l'équation (5-1)). Par conséquent, aux fins de protection de l'exploitation des capteurs passifs à l'avenir, il faut calculer ΔP en se basant sur une valeur ΔT_e raisonnable et non sur le ΔT_e de la technologie actuelle. De même, le temps d'intégration, τ augmentera probablement à mesure que de nouvelles technologies de télédétection seront développées (ex. concept de barrette de détecteurs). Aussi, le temps d'intégration doit également être déterminé à partir de prévisions raisonnables.

5.2.3.3 Résolution géométrique

Dans le cas de mesures bidimensionnelles des paramètres de surface, on considère généralement que l'ouverture -3 dB de l'antenne détermine la résolution transversale. Dans le cas de mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques, il faut aussi tenir compte de la résolution longitudinale le long de l'axe de l'antenne. La résolution longitudinale est une fonction complexe des caractéristiques de l'atmosphère liées aux fréquences et de la performance du récepteur du point de vue du bruit et de la largeur de bande.

5.2.3.4 Temps d'intégration

Les récepteurs radiométriques captent les émissions thermiques semblables à du bruit collectées par l'antenne, ainsi que le bruit thermique du récepteur. L'intégration du signal reçu permet de réduire les fluctuations du bruit aléatoire et d'estimer avec précision la somme du bruit du récepteur et l'intensité du bruit d'émission thermique externe. Le temps d'intégration correspond simplement au temps requis par le récepteur pour intégrer le signal reçu. Le temps d'intégration est également un paramètre important, qui résulte d'un compromis entre la résolution géométrique voulue, la configuration de balayage du capteur et sa rapidité par rapport à la scène observée.

5.2.4 Conditions d'exploitation types des capteurs passifs

Les capteurs spatiaux passifs sont surtout installés sur deux types complémentaires de systèmes à satellites: les satellites en orbite basse et les satellites géostationnaires.

5.2.4.1 Satellites en basse orbite

Les systèmes placés sur des satellites en basse orbite polaire héliosynchrone (ex. une orbite à laquelle un satellite passe au-dessus d'un point de la surface de la Terre donné à la même heure solaire locale) servent à recueillir des données haute résolution sur l'environnement du globe. La nature de ces orbites limite le rythme de répétition des mesures. Avec un seul satellite, on obtient au mieux deux couvertures mondiales à intervalle de 12 h chaque jour. Au-dessus des régions polaires, les observations quotidiennes pourraient se répéter autant de fois que les satellites en orbite terrestre basse font le tour de la Terre chaque jour (14); par ailleurs, les trajectoires orbitales convergent au-dessus de ces régions. Les radiomètres passifs fonctionnant à moins de 100 GHz ne se trouvent actuellement que sur des satellites en basse orbite. C'est surtout dû à la difficulté d'obtenir une résolution géométrique adéquate aux fréquences assez basses des orbites plus élevées, mais cela pourrait changer.

5.2.4.2 Satellites géostationnaires

On utilise des systèmes à bord de satellites en orbite géostationnaire pour rassembler des données régionales de basse à moyenne résolution. Le rythme de répétition des mesures n'est limité que par la technologie du matériel.

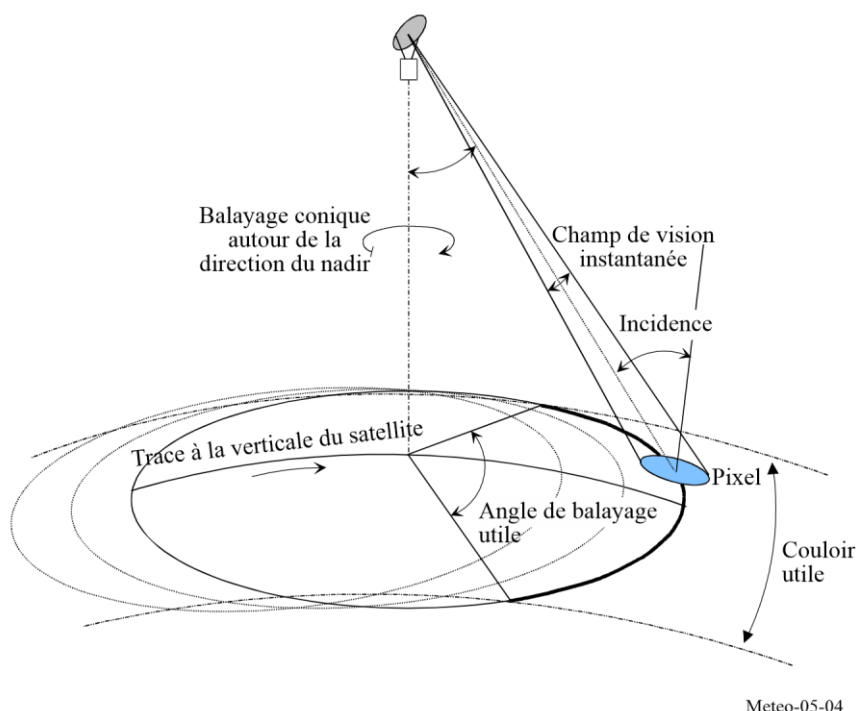
5.2.5 Géométries d'observation

5.2.5.1 Balayage conique

La plupart des capteurs passifs à hyperfréquences conçus pour imager les paramètres à la surface de la Terre font appel à une configuration à balayage conique (voir Fig. 5-4) centrée aux alentours de la direction du nadir (le point situé juste en dessous du satellite). En effet, il est important de maintenir un angle d'incidence au sol constant tout au long des lignes de balayage pour interpréter les mesures. La géométrie des instruments à balayage conique est illustrée à la Fig. 5-4.

FIGURE 5-4

Géométrie type des radiomètres en hyperfréquence à balayage conique



Voici les caractéristiques géométriques types (pour une altitude de 803 km):

- angle d'incidence au sol d'environ 55 degrés;
- angle demi-conique de 46,7 degrés par rapport à la direction du nadir;
- largeur de couloir: 1 600 km (limité par la configuration de balayage), permettant à un instrument d'effectuer deux couvertures complètes par jour, à moyenne et haute latitudes;
- taille du pixel variant selon la fréquence et la dimension de l'antenne, généralement entre 50 km à 6,9 GHz et 5 km à 89 GHz (antenne d'un diamètre de 2 m);
- période de balayage et système d'alimentation de l'antenne choisis pour assurer une couverture complète et un temps d'intégration optimal (résolution radiométrique) à toutes les fréquences, au détriment de la simplicité du matériel.

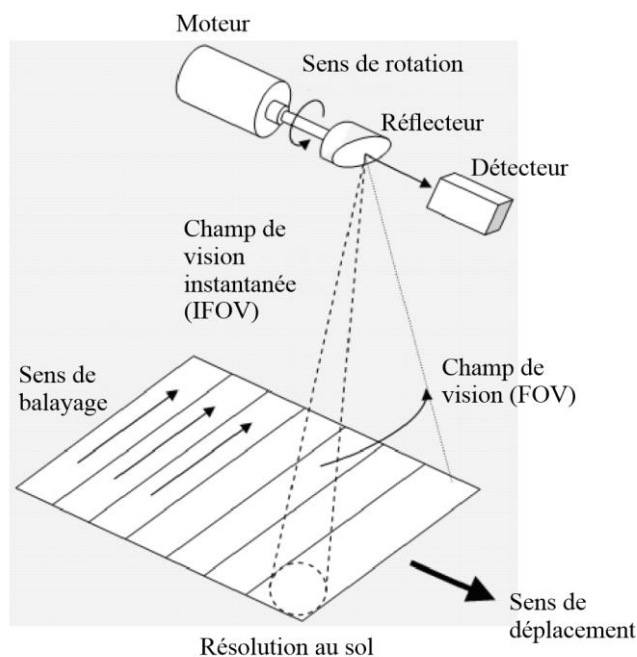
5.2.5.2 Balayage transversal à la trajectoire

Parmi les géométries courantes pour les radiomètres en hyperfréquence figure le balayage transversal à la trajectoire. Les capteurs avec cette géométrie effectuent des mesures dans une direction perpendiculaire au mouvement du satellite, généralement avec un réflecteur rotatif à bord du satellite, comme indiqué dans la Fig. 5-5.

Le balayage transversal à la trajectoire permet aux radiomètres en hyperfréquence d'effectuer des mesures sur un large couloir et, dans le même temps, dans la direction du nadir, où les effets des trajets dans l'atmosphère sont minimales.

FIGURE 5-5

Géométrie type des radiomètres en hyperfréquence à balayage transversal à la trajectoire



Meteo-05-05

Avec cette géométrie, le capteur disposera d'un champ de vision d'une taille variable au sol en fonction de l'angle d'ouverture, qui correspond à l'angle entre le point à la verticale du satellite et la direction du gain de crête de l'antenne. Le champ de vision atteindra sa taille minimale lorsque le capteur sera orienté vers le point sous-satellite.

Pendant une partie de la rotation, le capteur pointera en s'écartant de la Terre. Les mesures effectuées au cours de cette partie de la rotation sont utilisées à des fins d'étalonnage, c'est-à-dire qu'elles servent à pointer le capteur vers l'espace (la charge froide de référence) et vers une charge d'étalonnage chaude à bord de l'engin spatial.

Un capteur transversal présente généralement les caractéristiques suivantes (pour une altitude de 830 km):

- angles de pointage par rapport au nadir compris entre -50 et $+50$ degrés (d'un côté de l'engin spatial à l'autre)
- largeur de couloir: 2 300 km
- période de balayage: 2-8 s
- la taille du pixel varie tout au long du balayage et selon la fréquence et les dimensions de l'antenne.

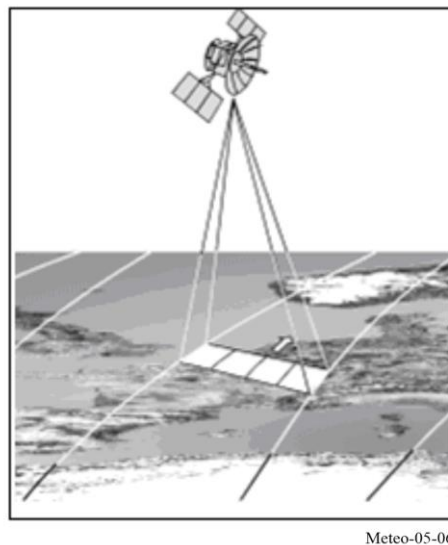
5.2.5.3 Capteurs à barrette de détecteurs

On peut aussi employer des instruments non balayeurs orientés sur le nadir pour fournir des données auxiliaires à des applications particulières, en éliminant les effets atmosphériques des mesures des altimètres radar. Des techniques interférométriques sont développées afin de faciliter leur mise en place sur les satellites, essentiellement pour améliorer la résolution spatiale à basse fréquence. Ces capteurs utiliseront un ensemble fixe de petites antennes au lieu de grandes antennes à balayage.

Un capteur à barrette de détecteurs (longitudinal) consiste en une ligne de capteurs positionnés de manière approximativement perpendiculaire à la direction de vol d'un engin spatial tel que l'illustre la Fig. 5-6. Différentes parties de la surface de la Terre sont détectées au fil du survol de l'engin spatial. Le radiomètre à barrette de détecteurs est un instrument 100% statique, dépourvu de pièces mobiles. Son principal intérêt est qu'il acquiert tous les pixels d'une ligne de balayage simultanément et non de manière séquentielle, contrairement aux capteurs balayés de façon mécanique, ce qui lui permet d'offrir de bien meilleures résolutions radiométriques; cependant, en raison de l'absence de mécanisme de balayage, il est encore plus difficile de prendre des images au-dessus de larges couloirs avec une résolution géométrique fine. Ce type de capteur peut servir à quantité d'applications, notamment la mesure des profils de température de l'atmosphère, de l'humidité du sol et de la salinité de l'océan.

FIGURE 5-6

Géométrie type des radiomètres passifs en hyperfréquence à barrette de détecteurs



Les types de mesures pour les applications du SETS (passive) sont présentés dans la Recommandation UIT-R RS.1861.

5.2.6 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage

Les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage pour les capteurs spatiaux passifs utilisés dans le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) sont décrits dans la Recommandation UIT-R RS.2017.

5.2.7 Mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques

Dans de nombreuses bandes du spectre électromagnétique, la résonance moléculaire déclenche des mécanismes d'absorption par certains gaz atmosphériques (voir la Fig. 5-1). Les fréquences auxquelles se produit ce phénomène caractérisent les gaz en question (O_2 , O_3 , H_2O , ClO). Le coefficient d'absorption dépend de la nature, de la concentration et de la température du gaz. Un ensemble de mesures passives au voisinage de ces fréquences, à partir de plates-formes spatiales, permet d'obtenir le profil de température, de vapeur d'eau ou de concentration des gaz absorbants. Les fréquences de résonance de l'oxygène entre 50 GHz et 70 GHz, à 118,75 GHz, et la fréquence de résonance de la vapeur d'eau à 183,31 GHz présentent un intérêt particulier pour l'observation de la Terre sous 200 GHz.

Un gaz absorbant à une longueur d'onde λ émet un niveau d'énergie (à la même fréquence) proportionnel à sa température T et à son coefficient d'absorption $\alpha = f(\lambda)$. Ce rapport est régi par la relation formulée dans l'équation (5-3):

$$I = \alpha \cdot L \quad (5-3)$$

où:

l : la luminance spectrale du gaz à la température T

$L = 2 - k \cdot T/\lambda^2$: luminance spectrale du corps noir à T ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$)

$k = 1,38 \times 10^{-23}$: constante de Boltzman (J/K)

α : caractérise le gaz (O_2 , CO_2 , H_2O , O_3 , etc.).

Deux gaz atmosphériques, CO_2 et O_2 , jouent un rôle prépondérant dans la télédétection passive appliquée à la météorologie car leur concentration et leur pression atmosphériques (deux paramètres qui déterminent le coefficient d'absorption α) sont presque constantes et connues partout sur la planète. Il est donc possible d'obtenir des profils de la température atmosphérique à partir de mesures radiométriques effectuées à diverses fréquences dans les bandes d'absorption voulues (généralement dans l'infrarouge aux environs de $15 \mu\text{m}$ pour le CO_2 et en hyperfréquence aux alentours de 60 GHz et de 118,75 GHz pour l' O_2).

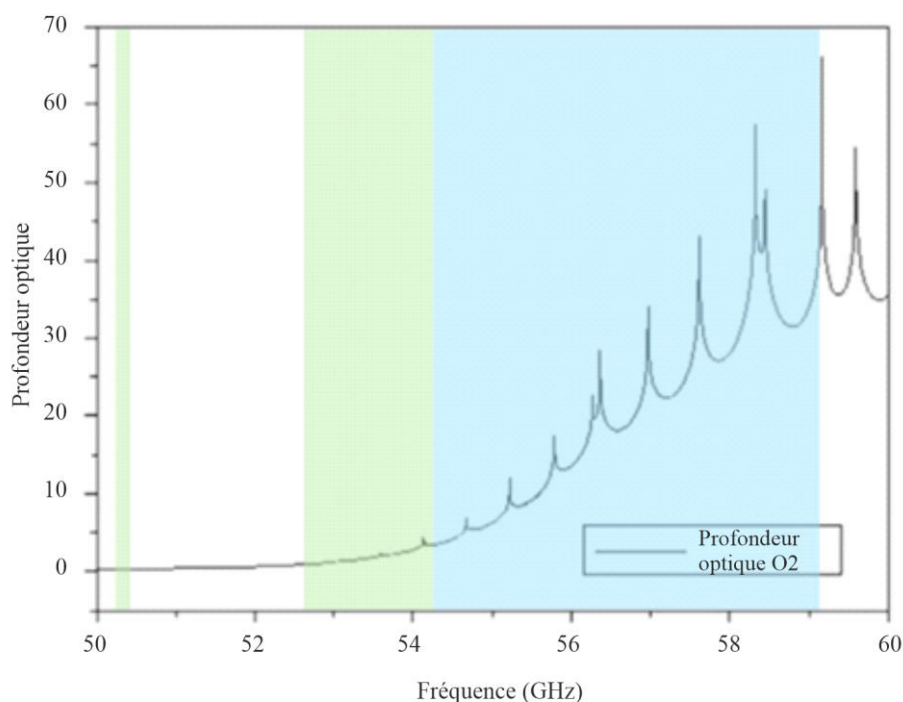
On effectue également des mesures radiométriques, dans les bandes d'absorption précises, d'autres gaz atmosphériques importants sur le plan radioactif et chimique, dont la concentration est variable et inconnue (H_2O , O_3 , CH_4 , ClO , etc.). Mais, dans ce cas, il faut impérativement connaître les profils de la température atmosphérique pour obtenir les profils verticaux de la concentration de ces gaz.

5.2.7.1 Sondeurs atmosphériques verticaux passifs à hyperfréquences

Le sondage atmosphérique permet de mesurer la distribution verticale des propriétés physiques d'une colonne de l'atmosphère comme la pression, la température, la vitesse du vent, la direction du vent, la teneur en eau liquide, la teneur en ozone, la pollution et d'autres propriétés. Les sondeurs atmosphériques verticaux (instruments de sondage atmosphérique, etc.) sont des capteurs orientés sur le nadir qui servent surtout à obtenir les profils verticaux de la température et de l'humidité atmosphériques. Ils utilisent des canaux de fréquences soigneusement choisis dans les spectres d'absorption de l'oxygène et de l'eau atmosphériques. Les spectres d'absorption détaillés, au voisinage de leurs principales fréquences de résonance sous 200 GHz, apparaissent aux Fig. 5-7 à 5-9. Soulignons la très grande variabilité du spectre d'absorption de la vapeur d'eau aux alentours de 183 GHz, en fonction de la zone climatique et des conditions météorologiques locales.

FIGURE 5-7

Profondeur optique de l'oxygène entre 50 et 60 GHz (raies d'absorption multiples)

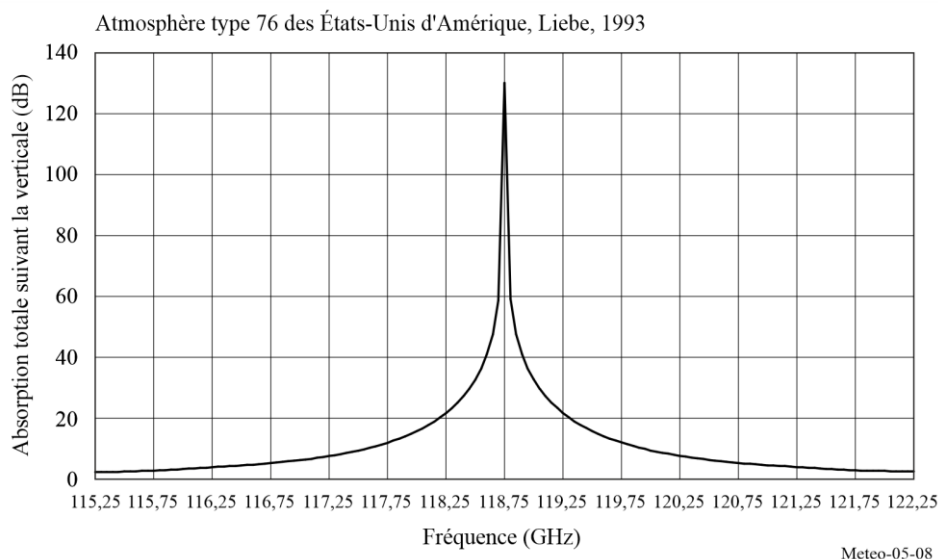


Meteo-05-07

NOTE – La Figure 5-7 illustre également la position et les fréquences attribuées au SETS, ainsi que leur état entre 50 et 60 GHz (50,2-50,4 GHz (exclusivité), 52,6-54,25 GHz (exclusivité) et 54,25-59,3 GHz (partage)).

FIGURE 5-8

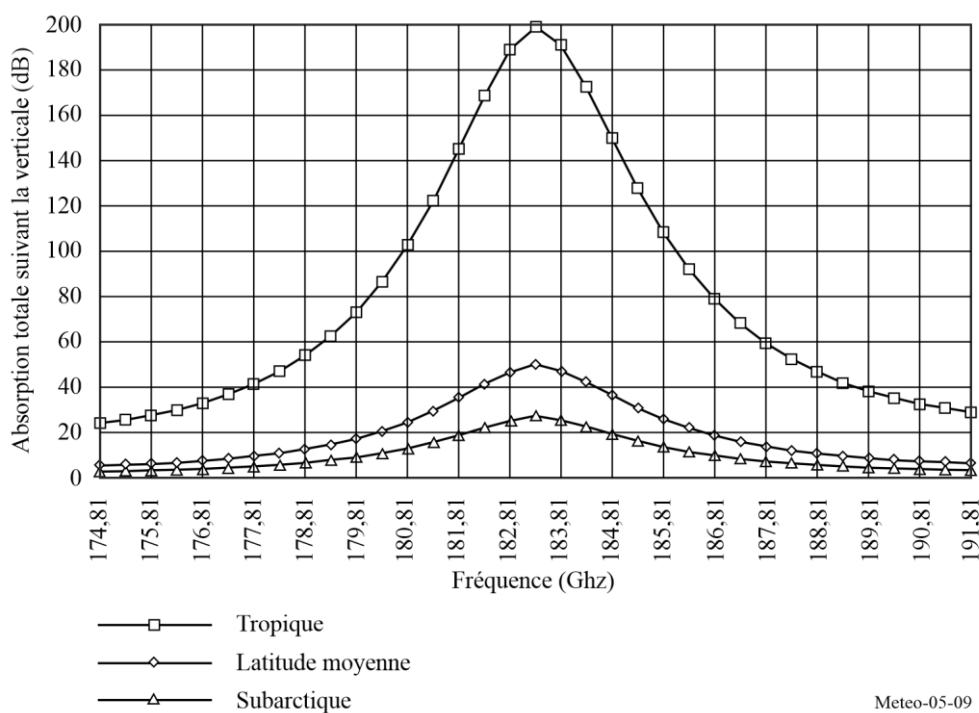
Spectre d'absorption de l'oxygène suivant la verticale au voisinage de 118,75 GHz (raie d'absorption unique)



NOTE – Le SETS (passive) bénéficie d'attributions dans les bandes 114,25-116 GHz (attribution exclusive) et 116-122,25 GHz (attribution en partage).

FIGURE 5-9

Spectre d'absorption de la vapeur d'eau suivant la verticale au voisinage de 183,31 GHz



NOTE – Le SETS (passive) bénéficie d'attributions dans les bandes 174,8-182 GHz (attribution en partage), 182-185 GHz (attribution exclusive), 185-190 GHz (attribution en partage) et 190-191,8 GHz (attribution exclusive).

5.2.7.2 Mécanisme des sondages atmosphériques verticaux

Dans les sondages atmosphériques verticaux à partir de l'espace, le radiomètre mesure à diverses fréquences (infrarouge ou hyperfréquence) la contribution totale de l'atmosphère, à partir de la surface jusqu'au sommet.

Chaque couche (caractérisée par son altitude) émet un niveau d'énergie proportionnel à sa température locale et à son coefficient d'absorption. L'énergie ascendante se dirigeant de la surface et des couches inférieures vers le radiomètre est en partie absorbée par les couches supérieures.

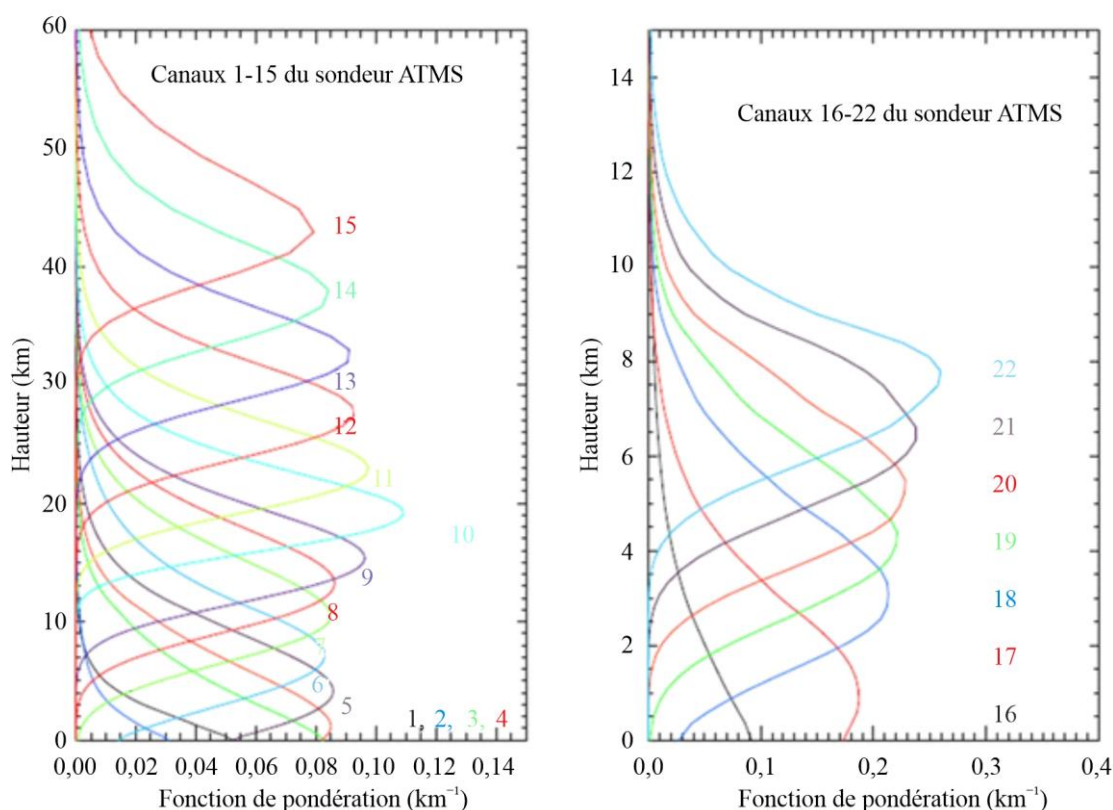
L'intégration de l'équation du transfert radiatif le long du trajet surface de la Terre-satellite reflète ce mécanisme et produit une fonction de pondération qui décrit l'apport relatif de chaque couche selon son altitude et qui présente aussi la résolution longitudinale (verticale) du capteur.

La crête de la fonction de pondération peut survenir à n'importe quelle altitude et dépend du coefficient d'absorption à la fréquence considérée. Quand l'absorption est faible, elle se situe près de la surface de la Terre. Quand l'absorption est forte, elle apparaît près de la couche supérieure de l'atmosphère. Un sondeur utilise plusieurs canaux de fréquences (voir Fig. 5-10 par exemple). Ceux-ci sont très soigneusement choisis à l'intérieur de la bande d'absorption, de manière à couvrir une vaste gamme de niveaux d'absorption et à obtenir les meilleurs échantillons atmosphériques, de la surface jusqu'à la stratosphère.

La Fig. 5-10 donne les fonctions de pondération types pour un sondeur de température à hyperfréquences qui fonctionne dans la bande de 60 GHz.

FIGURE 5-10

Fonctions de pondération types pour un sondeur de température à hyperfréquences fonctionnant au voisinage de 60 GHz



Soulignons l'importance particulière des canaux 1 (23,8 GHz), 2 (31,5 GHz) et 15 (90 GHz) (non illustrés dans la Fig. 5-10 ci-dessus). Il s'agit de canaux auxiliaires qui jouent un rôle prépondérant dans la récupération des mesures effectuées dans le spectre d'absorption de l'oxygène. Ils doivent présenter des performances géométriques et radiométriques similaires et être protégés de la même manière contre le brouillage.

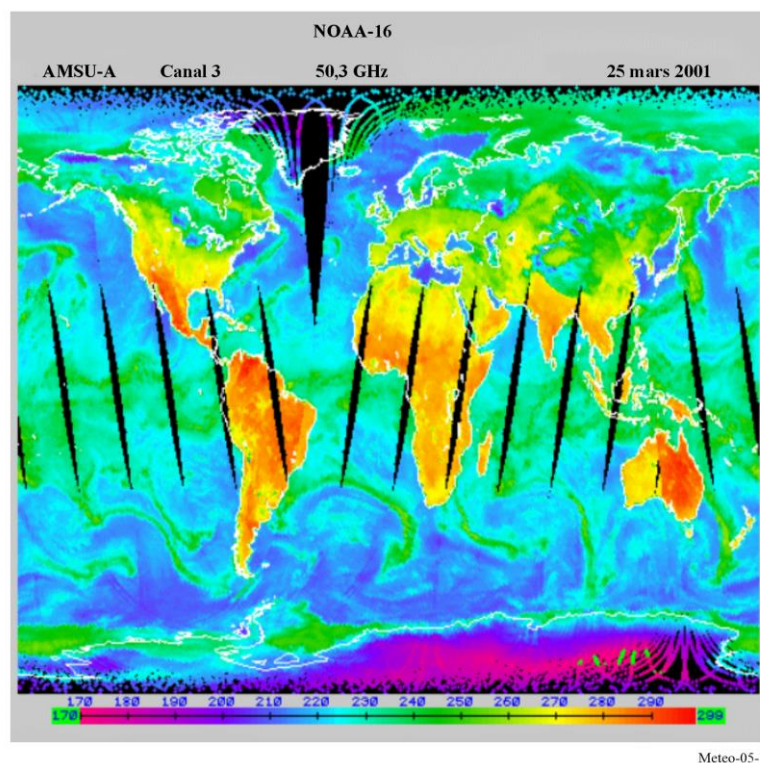
- Le canal 1 se trouve près d'une crête d'absorption de l'eau. Il sert à extraire la teneur totale en vapeur d'eau le long de la ligne de visée et à déterminer les corrections nécessaires dans les autres canaux.
- Le canal 2 est celui qui est le moins touché par les effets cumulés de l'oxygène et de la vapeur d'eau. C'est le canal fenêtre optimal pour observer la surface de la Terre et la référence pour les autres canaux.
- Le canal 15, capable de détecter l'eau liquide atmosphérique, sert à éliminer les effets des précipitations qui contaminent les mesures effectuées dans les autres canaux.

5.2.7.3 Applications des sondages atmosphériques verticaux

Les profils verticaux de la température et de l'humidité servent avant tout à alimenter les modèles PNT, lesquels doivent être initialisés au moins toutes les six heures. Il existe des modèles PNT mondiaux partout dans le monde qui permettent d'établir des prévisions météorologiques à échéance de 5 à 10 jours, avec une résolution géographique d'environ 10 km. Par ailleurs, on note une augmentation du nombre de modèles régionaux/locaux destinés à des prévisions plus précises (quelques km), à échéance plus rapprochée (6 à 48 h). La Fig. 5-11 montre l'image composite mondiale des mesures de la température (K) provenant du capteur passif à hyperfréquences AMSU-A, produites à l'intérieur d'une fenêtre temporelle d'une douzaine d'heures. Ces observations comprennent des émissions et des réflexions issues de la surface, ainsi que des émissions d'oxygène, surtout dans les cinq premiers km au-dessus de la surface (voir la Fig. 5-10).

FIGURE 5-11

Image composite mondiale des mesures de la température (K) provenant du capteur AMSU-A



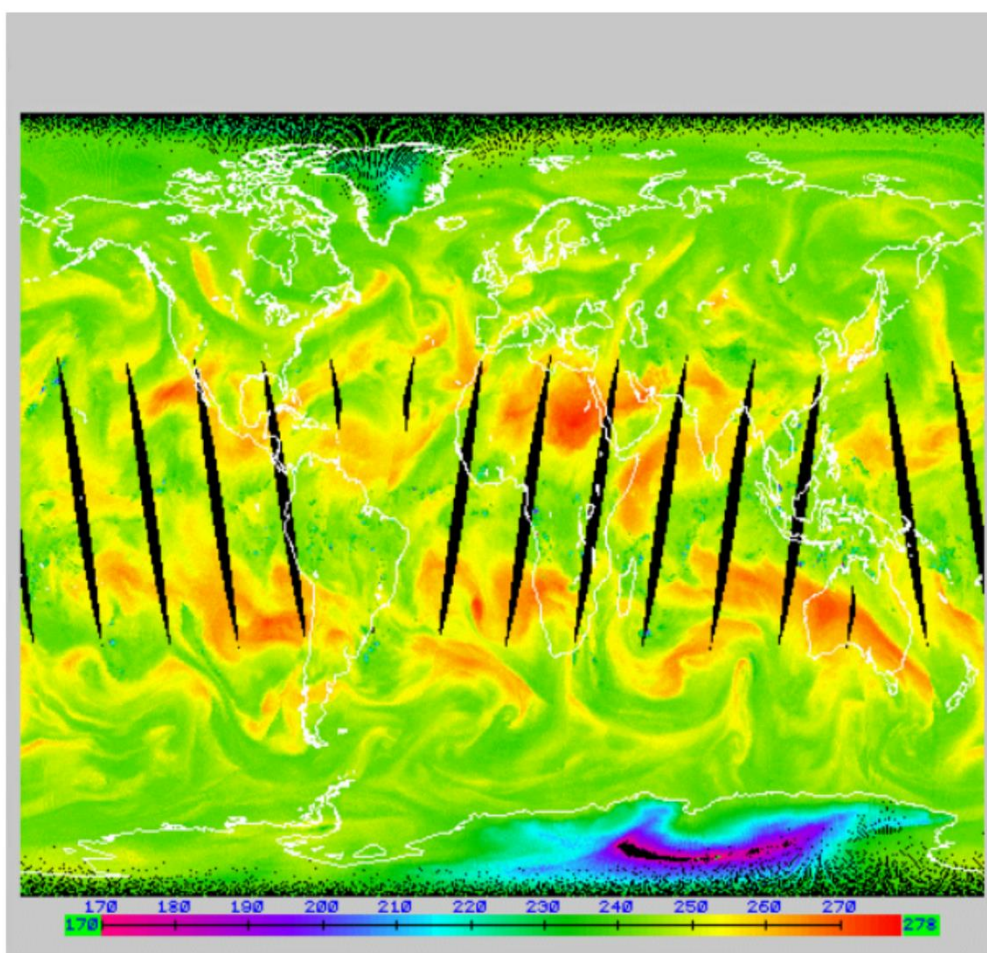
On voit, à la Fig. 5-12, l'image composite mondiale des mesures de la température de luminosité (K) provenant du capteur AMSU-B, produites à l'intérieur d'une fenêtre temporelle d'une douzaine d'heures. AMSU-B est un radiomètre qui fonctionne en association avec AMSU-A afin d'améliorer la détection de la vapeur d'eau

troposphérique. À 183 GHz, le radiomètre observe de hautes températures (orange/rouge) dans les tropiques et les latitudes moyennes lorsque les parties supérieures de la troposphère sont sèches et que le capteur scrute plus près de la surface, et de basses températures de luminance (vert) lorsque l'humidité est élevée et que le rayonnement provient de couches plus hautes.

Les modèles PNT utilisent les équations de Navier-Stokes différentielles partielles. Comme ils simulent des mécanismes atmosphériques très instables, ils sont extrêmement sensibles à la qualité des trois premiers profilages dimensionnels. Ce problème, décrit par Lorentz, est aujourd'hui clairement expliqué par la «théorie du chaos». On a besoin des superordinateurs les plus puissants pour exécuter ces modèles.

FIGURE 5-12

Image composite mondiale des mesures de la température (K) provenant du capteur AMSU-B



Meteo-05-12

Pour accroître l'efficacité de la prévision numérique du temps, il est nécessaire d'initialiser les modèles au moins toutes les six heures à l'échelle planétaire, avec une résolution de 50 km pour la PNT mondiale et de 10 km pour la PNT régionale/locale. Il faudra, à l'avenir, obtenir les informations nécessaires pour pouvoir initialiser les modèles PNT toutes les trois heures environ.

Les observations des sondeurs à hyperfréquences jouent également un rôle déterminant dans la surveillance des changements climatiques à long terme. Le sondeur à hyperfréquences (MSU, *Microwave Sounding Unit*), le sondeur à hyperfréquences évolué (AMSU-A, *Advanced Microwave Sounding Unit*) et le sondeur à hyperfréquences de haute technologie (ATMS, *Advanced Technology Microwave Sounder*) fournissent continuellement des observations de la température atmosphérique avec des fréquences de canaux semblables de 1978 à aujourd'hui. Les scientifiques ont regroupé les observations effectuées avec les trois générations de sondeurs à hyperfréquences pour établir des relevés de données climatiques de long terme présentant les températures de la couche atmosphérique fondées sur les canaux, allant de la basse troposphère à la haute stratosphère. Ces relevés, qui ont pour caractéristique unique d'assurer une couverture mondiale, sont généralement utilisés pour évaluer les changements climatiques à l'ère des satellites. Ils fournissent des estimations quantitatives du rythme du réchauffement climatique dans la troposphère et du refroidissement global dans la stratosphère. À mesure que les observations des sondeurs à hyperfréquences se poursuivent, les relevés de données climatiques deviennent un ensemble de données indispensable pour étudier les changements climatiques dans le monde et valider les simulations des modèles climatiques. Il s'agit d'une étape importante pour assurer la fiabilité des simulations des modèles climatiques et pouvoir les utiliser pour prévoir les futurs changements climatiques.

5.2.7.4 Caractéristiques des capteurs passifs orientés sur le nadir au voisinage de 60 GHz

La plupart des capteurs passifs à hyperfréquences qui mesurent les paramètres troposphériques et stratosphériques sont des instruments orientés sur le nadir. Ils emploient une configuration de balayage mécanique transversal (actuelle) ou à barrette de détecteurs (future) dans un plan normal pour la vitesse du satellite renfermant la direction du nadir. Cela procure des données dont la qualité moyenne est optimale et assure un champ optimal. Les caractéristiques types de sondeurs de température fonctionnant au voisinage de 60 GHz, installés sur des satellites en orbite basse, sont données au Tableau 5-2.

TABLEAU 5-2

Caractéristiques types de sondeurs verticaux hyperfréquences dans la gamme de 60 GHz

Caractéristiques	Balayage mécanique (actuel)	Balayage barrette de détecteurs (futur)
Largeur de bande du canal (MHz)	400	15
Temps d'intégration (s)	0,2	2,45
Diamètre de l'antenne (cm)	15	45
IFOV points 3 dB (degrés)	3,3	1,1
FOV transversal (degrés)	±50	±50
Gain d'antenne (dBi)	36	45
Gain de lobes (dBi)	−10	−10
Rendement du faisceau (%)	> 95	> 95
Résolution radiométrique (K)	0,3	0,1
Largeur de couloir (km)	2 300	2 300
Taille du pixel au nadir (km)	49	16
Nombre de pixels/ligne	30	90

5.2.7.5 Limbosondeurs passifs hyperfréquences

Les limbosondeurs hyperfréquences (MLS, *microwave limb sounders*), qui observent l'atmosphère tangentiellement à ses couches, servent à étudier les régions basses à supérieures de l'atmosphère, là où des activités photochimiques intenses peuvent avoir un fort impact sur le climat terrestre. Les mesures tangentielles des limbo-émissions présentent les particularités ci-après:

- on utilise le trajet le plus long, car il optimise les signaux provenant de constituants mineurs en faible concentration et rend possible les sondages à haute altitude;

- la résolution verticale est déterminée par le transfert radiatif à travers l'atmosphère et par le champ vertical de l'antenne. On peut en voir un exemple type à la Fig. 5-13;
- la résolution horizontale normale par rapport à la ligne de visée est principalement déterminée par le champ horizontal de l'antenne et par les taches imputables au mouvement du satellite;
- la résolution horizontale le long de la ligne de visée est principalement déterminée par les transferts radiatifs à travers l'atmosphère;
- le bruit spatial est optimal pour l'étalonnage des mesures des émissions;
- les limbomessures sont extrêmement sensibles au brouillage causé par les liaisons inter-satellite.

Les limbosondeurs hyperfréquences, lancés en 1991, présentent les caractéristiques suivantes:

- balayage de l'atmosphère suivant la verticale entre 15 et 120 km d'altitude, dans deux directions orthogonales latérales;
- résolution verticale type pour les mesures de profil (largeur des fonctions de pondération à demi-valeur) d'environ 3 à 6 km (voir la Fig. 5-13);
- résolution horizontale type de 30 km en travers et de 300 km le long de la direction d'observation;
- profils complets obtenus en moins de 50 s;
- observation des limbo-émissions thermiques dans cinq régions spectrales hyperfréquences (voir le Tableau 5-3).

FIGURE 5-13

Fonctions de pondération verticales des MLS (antenne de 1,6 m, 600 km d'altitude)

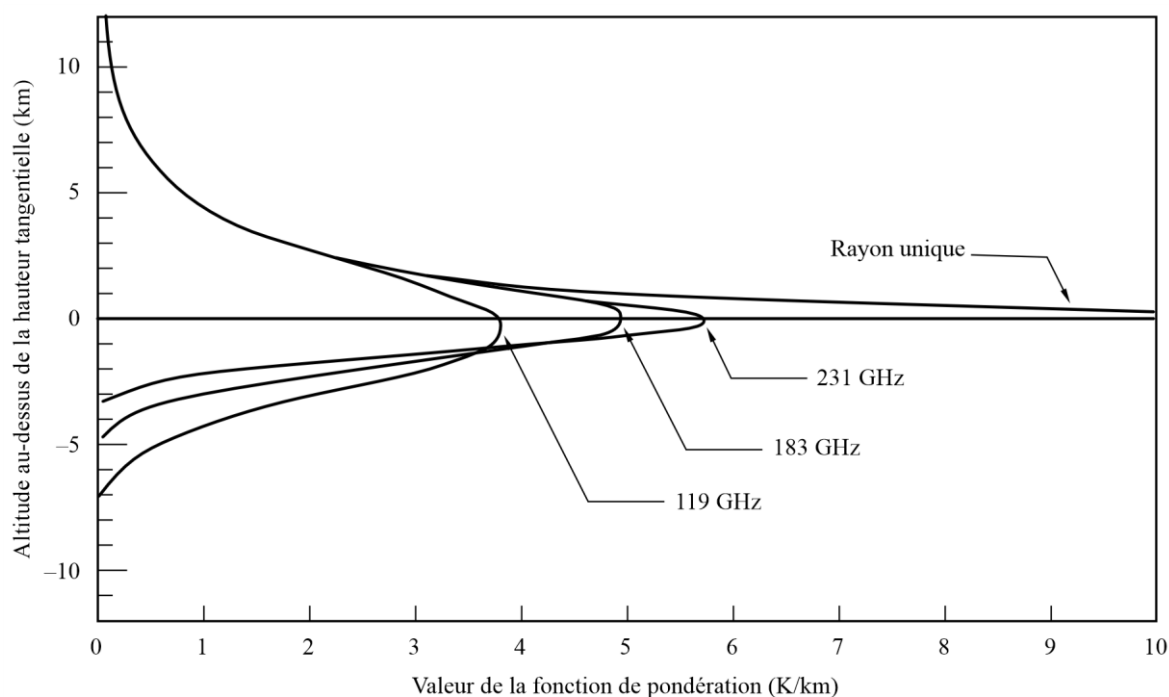


TABLEAU 5-3

Objectifs de mesure des MLS et régions spectrales types

Paramètre géophysique	Région spectrale (GHz)	Altitude (km)	Bruit quadratique moyen (intervalle)
Pression atmosphérique	50-60	3 070	1% (2 s)
Vitesse du vent	119	70 110	2-10 m/s (10 s)
Température		20 100	0,53 K (2 s)
O ₂		80 120	3×10^{-3} v/v (2 s)
Champ magnétique		80 110	0,3-1 m Gauss (10 s)
H ₂ O	183	1 590	1×10^{-7} v/v (2 s)
ClO	205	2 040	2×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃		1 590	1×10^{-8} v/v (2 s)
H ₂ O ₂		2 050	9×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃		1 590	1×10^{-8} v/v (2 s)
CO	231	15 100	1×10^{-7} v/v (10 s)

Les MLS les plus récents (EOS-B) mesurent la température et les concentrations de H₂O, O₃, ClO, BrO, HCl, OH, HO₂, HNO₃, HCN et N₂O dans la basse stratosphère afin d'évaluer leurs effets sur l'appauvrissement de la couche d'ozone, sur les transformations des gaz à effet de serre et sur le forçage radiatif des changements climatiques, et de diagnostiquer ces phénomènes. Ils mesurent aussi les gaz H₂O, O₃, CO et HCN dans la haute troposphère dans le but d'estimer leurs impacts sur le forçage radiatif et de diagnostiquer les échanges entre la troposphère et la stratosphère.

Les MLS observent en détail la chimie de l'ozone en mesurant de nombreux radicaux, réservoirs et gaz source dans les cycles chimiques destructeurs. Cette série de mesures mettra à l'épreuve de manière rigoureuse les connaissances acquises sur la chimie de la stratosphère mondiale, contribuera à expliquer les tendances observées de l'ozone et pourra signaler rapidement tout changement dans la chimie de cette région.

Les premiers limbosondeurs hyperfréquences ont déjà démontré la capacité des MLS de mesurer les profils de la vapeur d'eau dans la haute troposphère, éléments essentiels pour comprendre la variabilité du climat et le réchauffement mondial, mais qu'il était auparavant très difficile d'observer de manière fiable à l'échelle mondiale.

Les futurs limbosondeurs hyperfréquences pourront observer davantage de composants chimiques et espèces atmosphériques à d'autres fréquences.

5.2.7.6 Sensibilité des sondeurs passifs hyperfréquences au brouillage

Les capteurs passifs reçoivent tous les signaux, qu'ils soient naturels (désirés) ou anthropiques (non désirés). Ils ne peuvent, en général, pas distinguer ces deux types d'émissions car l'atmosphère est un milieu très instable dont les caractéristiques changent rapidement dans le plan spatio-temporel. L'un des problèmes rencontrés par ces capteurs passifs est la présence d'un grand nombre d'émetteurs de faible intensité dans leur zone de mesure. Parmi ces émetteurs de faible intensité figurent les systèmes à bande ultralarge (UWB), les applications destinées à une utilisation industrielle, scientifique et médicale (ISM) et les dispositifs de courte portée (SRD). La situation tend à devenir de plus en plus critique du fait de la densité croissante de ces systèmes actifs de Terre; des cas de brouillage préjudiciable ont d'ailleurs déjà été signalés.

Les mesures des capteurs passifs sont donc extrêmement sensibles au brouillage, même de très faible intensité, qui peut avoir de très graves conséquences:

- il a été démontré que 0,1% d'échantillons de données satellite contaminées suffisait parfois pour introduire des erreurs inacceptables dans les prévisions numériques du temps, détruisant ainsi la confiance dans ces mesures passives tous temps;

- la suppression systématique des données, quand il y a un risque de brouillage (et qu'il est détectable), peut faire omettre des indications cruciales sur des tempêtes potentiellement violentes qui se développent rapidement et rendre impossible la reconnaissance de systèmes météorologiques en formation;
- si le brouillage a une intensité suffisamment faible pour passer inaperçu, ce qui est généralement le cas, il y a risque de corruption des données recueillies lesquelles fausseront gravement les analyses et conclusions;
- dans les études climatologiques et, notamment, la surveillance des changements mondiaux, le brouillage est susceptible d'entraîner une mauvaise interprétation des signaux climatiques.

La Recommandation UIT-R-RS.2017 définit la qualité de fonctionnement radiométrique requise et le niveau de brouillage admissible correspondant.

5.2.8 Étalonnage du ciel froid

Afin d'étalonner leurs mesures, les instruments du SETS (passive) ont besoin de cibles chaudes et froides connues. La charge chaude fait généralement partie intégrante de l'instrument lui-même. Pour ce qui est de la charge froide, l'instrument effectue des mesures dans l'espace extra-atmosphérique, c'est-à-dire en pointant vers des parties du ciel où n'apparaît pas la Terre (ou d'autres corps célestes proches comme le Soleil ou la Lune).

La façon dont les mesures de l'espace extra-atmosphérique sont effectuées dépend du type de capteur du SETS (passive):

- les capteurs à barrette de détecteurs tournent de manière à ce que le satellite dans son intégralité pointe vers l'espace extra-atmosphérique;
- une partie du balayage effectuée par les capteurs à balayage transversal à la trajectoire est consacrée aux vues du ciel froid, généralement à un angle de 90 degrés par rapport au nadir;
- les capteurs à balayage conique effectuent des mesures d'étalonnage à froid, soit en faisant pivoter le satellite dans son intégralité de sorte qu'une partie du balayage ne soit pas orientée vers la Terre, soit en utilisant un réflecteur différent pendant une partie du balayage conique;
- les capteurs pointant vers le nadir ont parfois un cornet d'alimentation différent pointant vers l'espace extra-atmosphérique pour les mesures d'étalonnage du ciel froid; dans d'autres cas, le satellite tout entier est tourné de façon à pointer en direction de l'espace extra-atmosphérique.

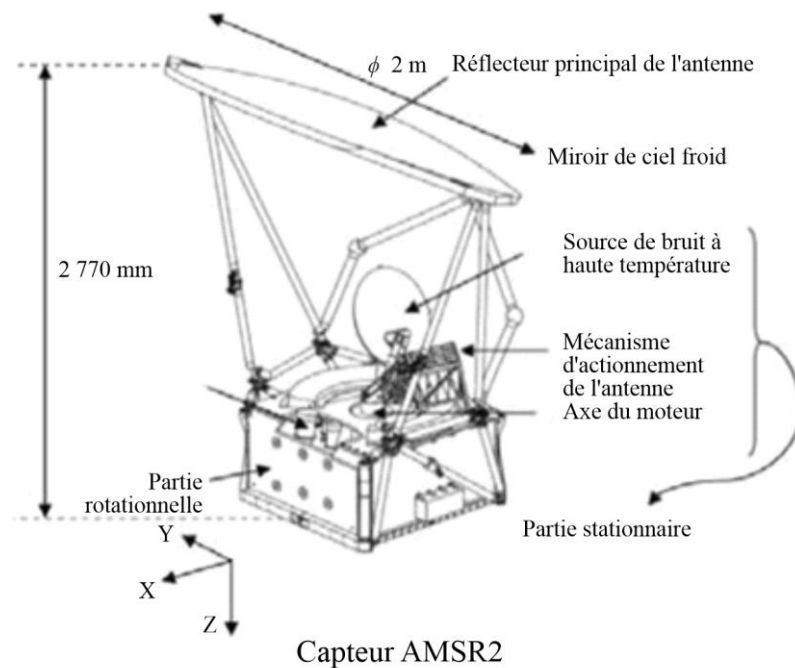
À titre d'exemple, le texte ci-dessous décrit en détail l'étalonnage du ciel froid et l'étalonnage à haute température pour l'instrument AMSR2 à bord du satellite GCOM-W.

Le capteur AMSR2 se compose d'un capteur (voir la Fig. 5-14) – généralement un scanner rotatif – et d'une unité de commande fixe, ainsi que d'un système de volant à inertie porté par le châssis de la mission du satellite. Au cours d'une rotation, le capteur recueille des données d'observation de surface sur une plage de ± 75 degrés (la plage de garantie de performance est de ± 61 degrés) axées sur la direction du vol et les données du dispositif d'étalonnage (à partir d'une source de bruit à haute température et d'un miroir de ciel froid) à tous les autres angles.

L'AMSR2 recueille des données d'étalonnage à basse et haute température à chaque cycle de balayage de 1,5 seconde qui servent à corriger les fluctuations de gain du récepteur.

La source de bruit à haute température est un absorbeur hyperfréquence dont la température est régulée à environ 300 K, tandis que le miroir de ciel froid est un réflecteur orienté vers l'espace lointain (environ 2,7 K). Les données obtenues à partir de ces deux mesures sont utilisées pour l'étalonnage en deux points. La vitesse de rotation du balayage doit être maintenue constante pour recueillir en séquence les données d'étalonnage à basse température, les données d'observation de surface et les données d'étalonnage à haute température aux bons angles de rotation.

FIGURE 5-14

Représentation schématique extérieure de l'AMSR2

Meteo-05-14

Toutefois, la température de brillance mesurée pendant les vues du ciel froid s'élève au-dessus de la température nominale de 2,7 K en raison de l'effet du rayonnement reçu autre que le rayonnement du fond dans l'espace lointain. De nombreux facteurs d'erreur influent sur la température de brillance d'étalonnage à basse température: rayonnement terrestre, rayonnement lunaire, brouillages radioélectriques produits par des satellites stationnaires, pollution solaire, rayonnement provenant de la structure même du satellite et rayonnement terrestre projeté sur le réflecteur principal. Les plus grands d'entre eux sont le rayonnement terrestre, le rayonnement lunaire, les brouillages radioélectriques et les effets solaires.

De plus, la température de brillance d'étalonnage à haute température peut contenir des erreurs, en raison d'un manque d'uniformité concernant la source de bruit à haute température ou d'incohérences avec la température de mesure du capteur de platine.

Ces erreurs sont corrigées dans la séquence de traitement pour le calcul des données radiométriques.

1) Identification et calcul de la moyenne des points de gain/décalage égaux

Identifier la plage dans laquelle les données de correction à basse et haute température ont été obtenues au même niveau de commande automatique du gain (CAG) (gain et décalage) et calculer la moyenne des données d'étalonnage obtenues à des niveaux de gain égaux. La moyenne des données obtenues à différents gains et décalages n'est pas calculée.

2) Corriger la source de bruit à haute température/le miroir de ciel froid

Les corrections suivantes sont apportées à la température de la source de bruit à haute température et à la valeur de comptage du miroir de ciel froid.

- a) Corriger la température de la source de bruit à haute température (à l'aide d'un algorithme de correction).
- b) Corriger la température du miroir de ciel froid (éliminer les effets de la Lune, des émissions terrestres, des brouillages radioélectriques et de la lumière du Soleil).
- 3) Calculer les coefficients de conversion de température d'antenne à toutes les fréquences.

Les coefficients de l'équation d'étalonnage du premier ordre (A , B) sont calculés afin de convertir la valeur du nombre d'observations (C_{obs}) en une température d'antenne (T_A).

$$T_A = A \times C_{obs} + B \quad (5-4)$$

Il convient de noter que, si ce processus permet de corriger les sources d'erreur connues (la position et l'intensité du Soleil sont bien connues, par exemple), il ne peut pas corriger les incidences des brouillages, qui sont dynamiques et généralement inconnus.

5.3 Les capteurs actifs

5.3.1 Introduction

Nous verrons dans cette partie quel spectre radioélectrique est nécessaire aux capteurs spatiaux actifs, notamment aux capteurs qui surveillent les phénomènes météorologiques. On y présentera les différentes catégories d'appareils avec leurs caractéristiques, qui déterminent les besoins individuels de fréquences, les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage à respecter pour la compatibilité avec d'autres services utilisant les bandes concernées, ainsi que l'état des études de compatibilité actuelles sur les capteurs spatiaux actifs et d'autres services, avec toutes les questions et préoccupations que cela suscite.

Six grands types de capteurs spatiaux actifs seront étudiés:

Type 1: les radars à ouverture synthétique (SAR, synthetic aperture radars) – capteurs à visée latérale par rapport à la direction du nadir et recueillant des données sur l'évolution phasique et temporelle de l'écho radar cohérent à partir duquel il est possible de produire une image radar de la surface de la Terre.

Type 2: les altimètres – capteurs orientés sur le nadir mesurant précisément le temps écoulé entre une émission et une réception afin d'obtenir l'altitude exacte de la surface des océans, ainsi que des eaux côtières et des eaux intérieures.

Type 3: les diffusiomètres – capteurs observant divers éléments sur les côtes par rapport à la direction du nadir et utilisant la mesure des variations de puissance des échos de retour en fonction de l'angle de relèvement constant, dans le but d'établir la direction et la vitesse des vents sur la surface des océans, ainsi que des eaux côtières et des eaux intérieures. On utilise également la rétrodiffusion pour observer toutes les surfaces terrestres et déterminer des paramètres à la surface de la Terre, tels que l'humidité du sol et les pluies sur la terre ferme.

Type 4: les radars de précipitations – capteurs à balayage perpendiculaire par rapport à la direction du nadir mesurant les échos radar produits par la pluie pour déterminer l'intensité des précipitations au-dessus de la surface terrestre et la structure tridimensionnelle de celles-ci.

Type 5: les radars de profil des nuages – capteurs orientés sur le nadir mesurant les retours d'écho des nuages afin d'obtenir le profil de la réflectivité des nuages au-dessus de la surface terrestre.

Type 6: les radars sondeurs – capteurs orientés sur le nadir utilisant des fréquences centrales inférieures pour les applications de radar à pénétration du sol (GPR), qui mesurent les échos radar depuis la surface et le sous-sol de la Terre, pour recenser et déterminer les caractéristiques souterraines telles que les aquifères et les inlandis.

Le Tableau 5-4 donne les caractéristiques de ces six grands types de capteurs spatiaux actifs.

TABLEAU 5-4

Caractéristiques des capteurs spatiaux actifs

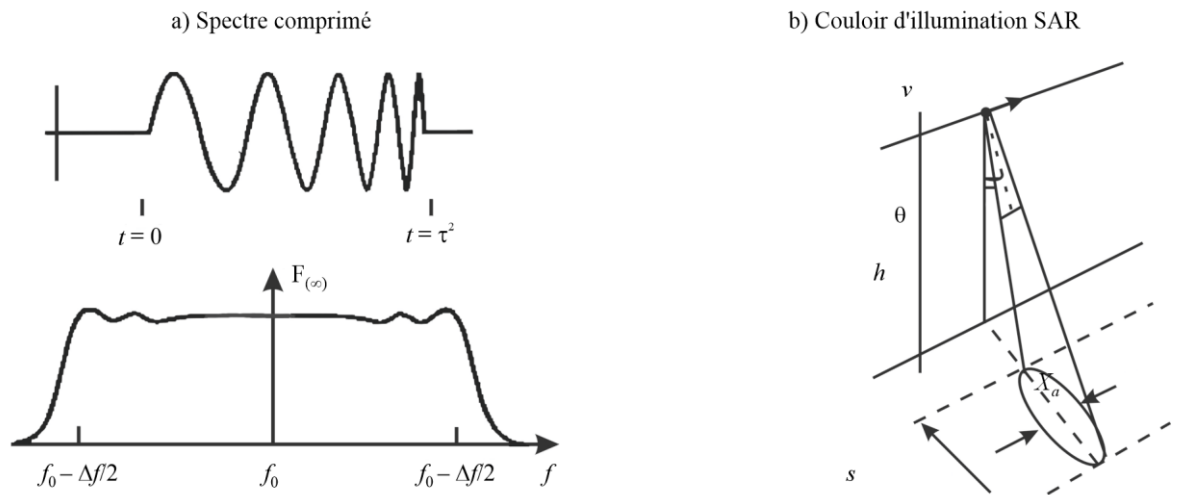
Types de capteurs						
Caractéristiques	SAR	Altimètre	Diffusiomètre	Radars de précipitations	Radars de profil des nuages	Radars sondeurs
Géométrie de visée	Visée latérale à 10°-55° par rapport à la direction du nadir	Orientation sur le nadir Orientation multi-incidence	– Trois/six faisceaux éventail à l'azimut – Un ou deux faisceaux à balayage conique	Balayage perpendiculairement à la direction du nadir	Orientat ion sur le nadir	Orientat ion sur le nadir
Empreinte/dynamique	– Fixe sur un côté – ScanSAR – Ponctuelle	Fixe au nadir Orientation multi-incidence	– Fixe à l'azimut – Plusieurs faisceaux à balayage conique	Balayage perpendiculairement à la direction du nadir	Fixe au nadir	Fixe au nadir
Faisceau d'antenne	Faisceau-éventail	Faisceau-crayon	– Faisceaux-éventail – Faisceaux-crayon	Faisceau-crayon	Faisceau-crayon	Faisceau large
Crête de puissance rayonnée (W)	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500	100
Forme d'onde	Impulsions linéaires FM	Impulsions linéaires FM	Impulsions courtes ou entretenues interrompues (océans) ou impulsions MF linéaires (terres)	Impulsions courtes	Impulsions courtes	Impulsions linéaires FM
Largeur de bande	20-1 200 MHz	320/500 MHz	5-80 kHz (océans) ou 1-4 MHz (terres)	14 MHz	300 kHz	10 MHz
Facteur d'utilisation (%)	1-30	46	31 (océans) ou 10 (terres)	0,9	1-14	10,2
Zone de service	Terres/côtes/océans	Océans/glaciers/côtes/eaux intérieures	Océans/glaciers/terres/côtes	Terres/océans	Terres/océans	Inlandsis/déserts
Bandes de fréquences types	1,3 GHz, 5 GHz, 9 GHz et 36 GHz	5 GHz, 13 GHz et 36 GHz	1,3 GHz, 5 GHz et 13 GHz	36 GHz et 78 GHz	94 GHz, 138 GHz et 238 GHz	45 MHz

5.3.2 Radars à ouverture synthétique

Les radars à ouverture synthétique (SAR, *synthetic aperture radars*) fournissent des images de la surface de la Terre. Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface de la Terre. La largeur de bande des fréquences influe sur la résolution de l'image. La Fig. 5-15a) montre l'impulsion comprimée avec, dessous, la largeur de bande correspondante. La résolution en portée est égale à $c/2 (BW \sin \theta)$, où c est la vitesse de la lumière, BW la largeur de bande et θ l'angle d'incidence. Par exemple, pour obtenir une résolution en portée de 1 m à un angle d'incidence de 30°, la largeur de bande doit être de 300 MHz. De nombreux radars à ouverture synthétique illuminent le couloir vers un côté du vecteur vitesse, comme on le voit à la Fig. 5-15b). Toute source de brouillage située dans la partie du couloir illuminée sera renvoyée au récepteur SAR et dégradera la qualité des pixels. La dégradation admissible de la qualité des pixels détermine le niveau de brouillage tolérable. La Fig. 5-16 montre une image SAR de Svalbard (Norvège).

FIGURE 5-15

Spectre comprimé et couloir d'illumination SAR



Meteo-05-15

FIGURE 5-16

Image SAR de Svalbard (Norvège)



Meteo-05-16

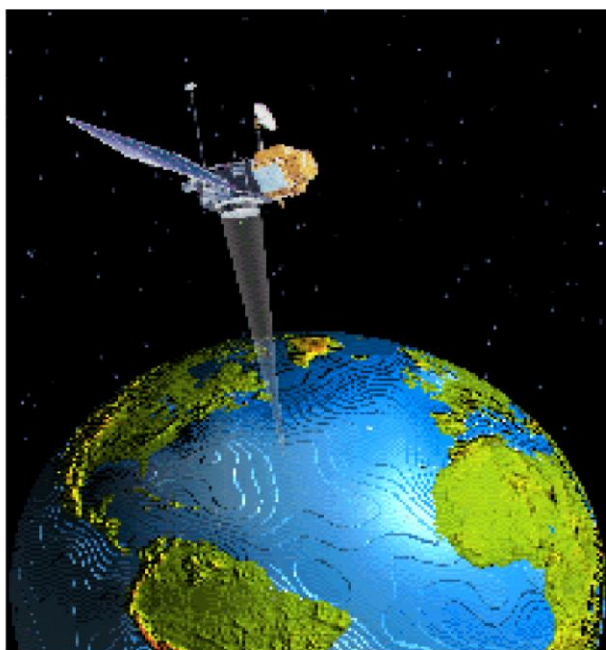
5.3.3 Altimètres

Les altimètres mesurent l'altitude de la surface de la Terre et sont généralement utilisés au-dessus des océans. Les Fig. 5-17 et 5-18 illustrent un altimètre embarqué à bord d'un satellite et la précision de ses mesures. Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface de l'océan. Le fonctionnement en fréquence double permet de compenser le retard ionosphérique. L'utilisation des fréquences au voisinage de 13,6 GHz et 5,3 GHz illustre la possibilité d'un fonctionnement en fréquence double. La grande largeur de bande influe sur la précision des mesures de la hauteur. L'exactitude de la différence de temps Δt est inversement proportionnelle à BW, qui est la largeur de bande. La dégradation admissible de la précision de la hauteur détermine le niveau de brouillage tolérable. Certains altimètres embarqués à bord d'un satellite sont parvenus à mesurer la topographie de l'océan avec une précision d'une qualité supérieure à 2 cm. La dégradation admissible de la qualité prescrite dans la Recommandation UIT-R RS.1166 est de 4%.

Les altimètres sont souvent accompagnés d'un radiomètre d'appui pointant dans la même direction, afin d'obtenir des mesures simultanées de la vapeur d'eau atmosphérique, qui allonge la durée nécessaire pour que le signal de l'altimètre atteigne la surface et retourne vers le satellite.

FIGURE 5-17

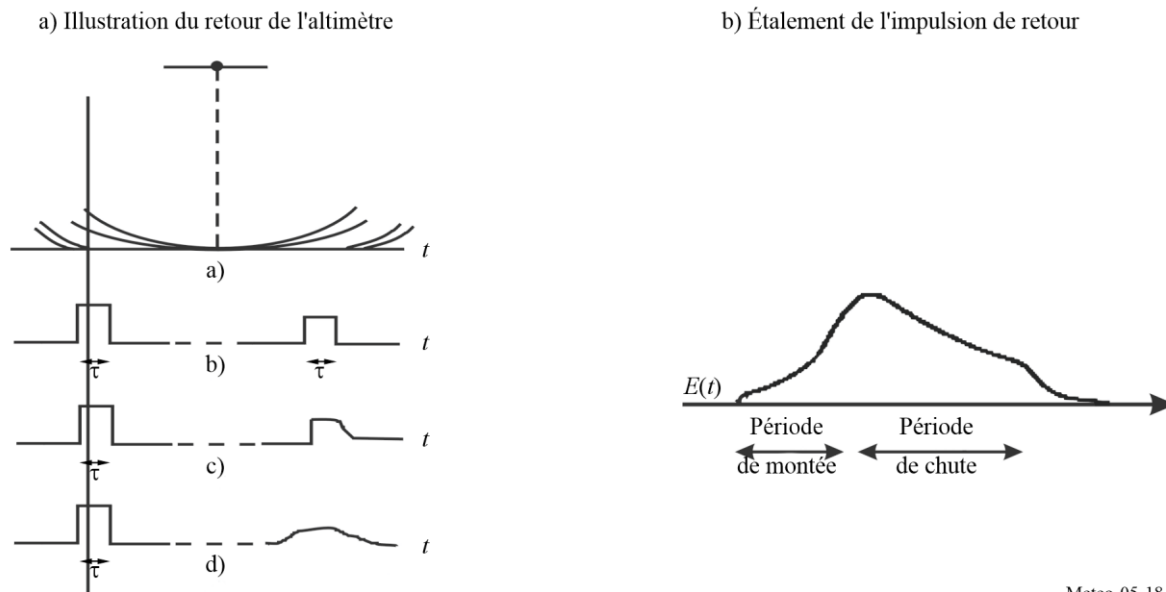
Altimètre à hyperfréquences embarqué à bord d'un satellite



Meteo-05-17

FIGURE 5-18

Illustration du retour de l'altimètre et étalement de l'impulsion de retour

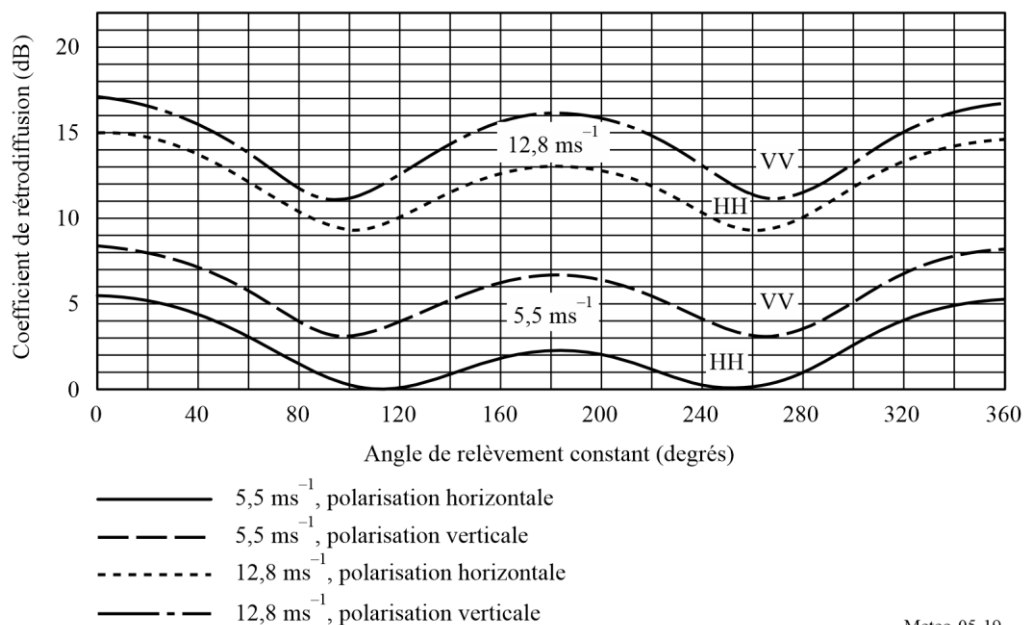


5.3.4 Diffusiomètres

Ils servent principalement à mesurer la direction et la vitesse des vents au-dessus de la surface des océans ainsi que l'étendue et les caractéristiques de la banquise. Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface de l'océan et de leurs variations par rapport à l'angle de relèvement constant. La Fig. 5-19 montre la fluctuation de la rétrodiffusion par rapport à la direction du vecteur vitesse du vent.

FIGURE 5-19

Fluctuation de la rétrodiffusion en fonction de l'angle de relèvement constant



Comme on le voit à la Fig. 5-20, un diffusiomètre classique illumine la surface de la Terre à différents angles fixes de relèvement constant. À la Fig. 5-21, le faisceau-crayon du diffusiomètre balaie selon deux angles différents par rapport au nadir et balaie 360 degrés près du nadir en azimuth. La largeur de bande étroite du signal fournit la résolution voulue pour les cellules de mesure.

FIGURE 5-20

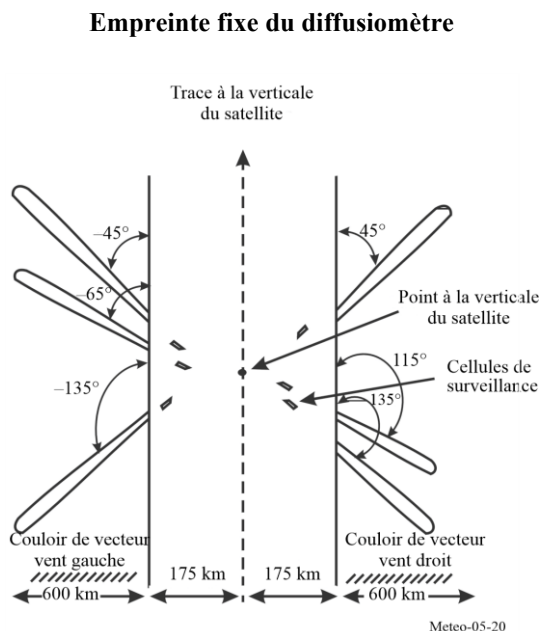
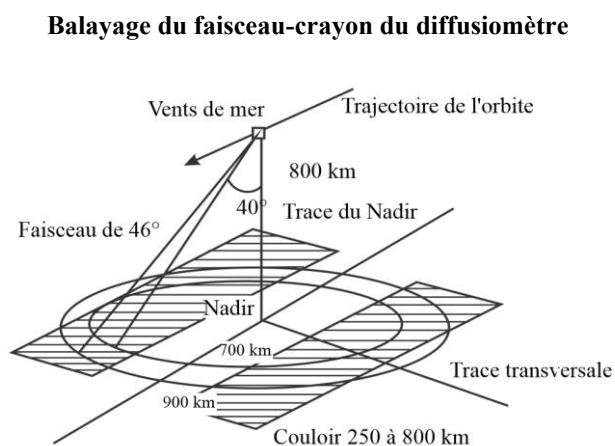


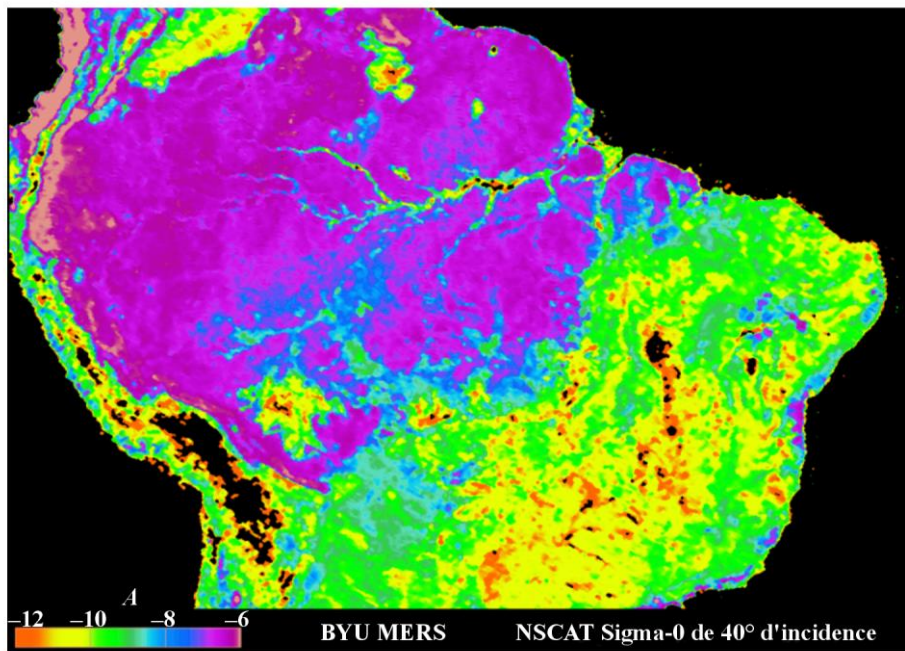
FIGURE 5-21



La fonction principale du diffusiomètre est d'étudier les vents sur les océans, mais les scientifiques ont mis au point une méthode permettant d'étudier les variations de la rétrodiffusion radar de l'instrument afin d'observer également toutes les surfaces terrestres et de déterminer des paramètres à la surface de la Terre, tels que l'humidité du sol et les pluies sur la terre ferme. La Fig. 5-22 montre une image radar de la forêt ombrophile amazonienne en Amérique du Sud prise par le NSCAT, qui donne notamment des informations sur le type et la densité de la végétation.

FIGURE 5-22

Image radar NSCAT de la forêt ombrophile amazonienne en Amérique du Sud



Meteo-05-22

5.3.5 Radars de précipitations

Les radars de précipitations mesurent l'intensité des précipitations au-dessus de la surface de la Terre, en particulier dans les régions tropicales.

Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions entre les précipitations et le champ électromagnétique. La section de rétrodiffusion d'un hydrométéore sphérique est:

$$\sigma_b = \pi^5 |K_W|^2 D^6 / \lambda^4 = \pi^5 |K_W|^2 Z / \lambda^4 \quad (5-5)$$

où:

$|K_W|^2$: lié à l'indice de réfraction de l'eau de la goutte

D : diamètre de la goutte (m)

λ : longueur d'onde du radar (m)

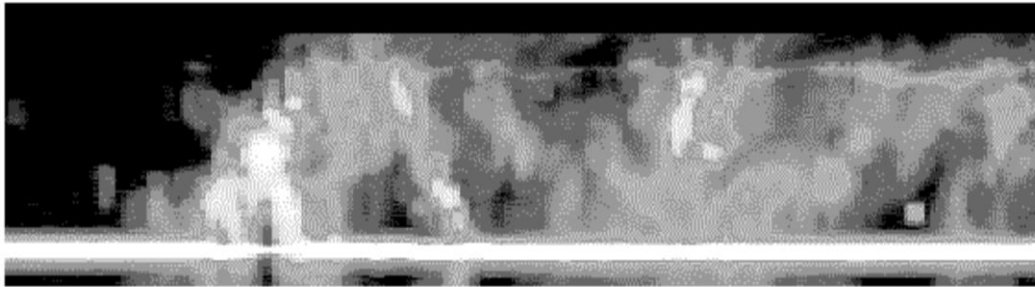
Z : facteur de réflectivité du radar.

La rétrodiffusion augmente en fonction de la puissance quatre de la fréquence radioélectrique.

La Fig. 5-23 fournit un exemple de section verticale du facteur de réflectivité du radar. La courte durée d'impulsion du signal assure la résolution voulue en portée. Le radar de précipitation de l'exemple fonctionne avec une durée d'impulsion de 1,6 μ s, mais cette valeur peut varier selon les systèmes. La dégradation admissible de la réflectivité minimale des précipitations détermine le niveau de brouillage tolérable.

FIGURE 5-23

Réflexivité synthétisée selon les mesures de réflexivité des précipitations



Meteo-05-23

5.3.6 Radars de profil des nuages

Les radars de profil des nuages fournissent un profil tridimensionnel de la réflexivité des nuages au-dessus de la surface de la Terre. La Fig. 5-24 montre un exemple type de réflexivité de rétrodiffusion en fonction de l'altitude.

Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface de l'océan et de leurs variations par rapport à l'angle de relèvement constant.

L'équation (5-6) montre comment calculer la puissance de retour des nuages.

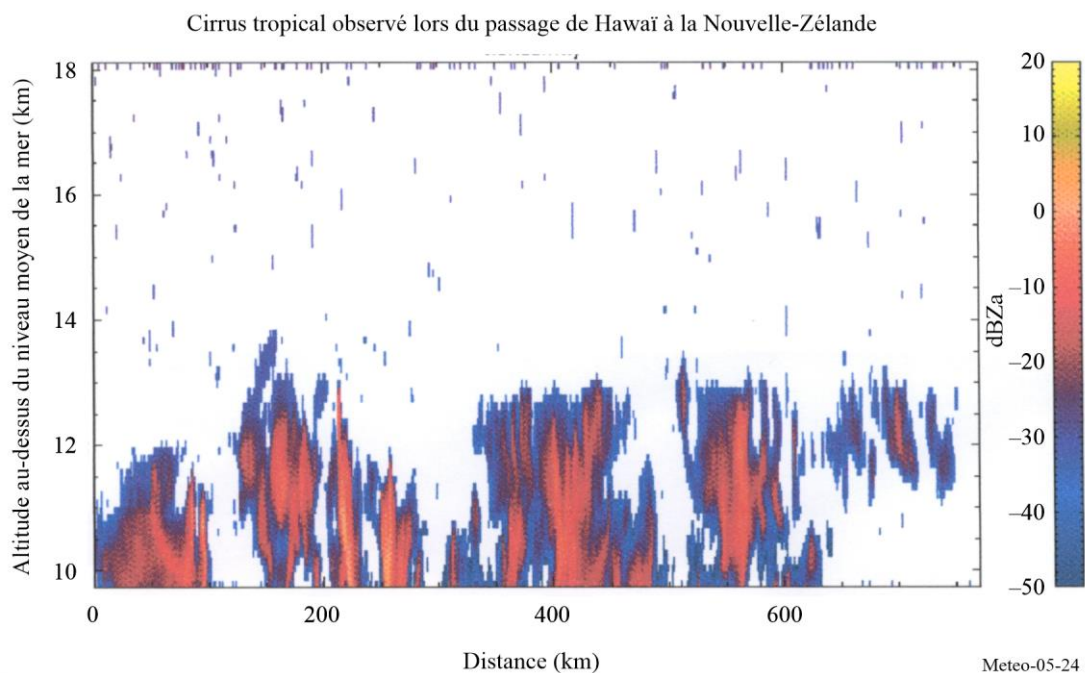
$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6,75 \times 2^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l^2 l_r} \quad \text{mW} \quad (5-6)$$

où:

- $\tilde{P}$: puissance de retour des nuages (mW)
- P_r : puissance d'émission radar (W)
- G : gain d'antenne (numérique)
- t : durée de l'impulsion (μs)
- θ_r : largeur de faisceau d'antenne 3 dB (degrés)
- K_W : facteur diélectrique de la teneur en eau des nuages
- Z_r : facteur de réflexivité des nuages (mm^6/m^3)
- r_0 : portée (km)
- λ : longueur d'onde radar (cm)
- l : affaiblissement de signal dû à l'absorption atmosphérique
- l_r : affaiblissement du système radar.

Comme l'illustre cette équation, la puissance de retour diminue en fonction du carré de la longueur d'onde. La fréquence étant inversement proportionnelle à la longueur d'onde, la puissance de retour augmente selon le carré de la fréquence. Dans le cas des petites particules (régime de Rayleigh), cette puissance croît avec la fréquence à la puissance quatre, puisque le rapport dépend de la taille des particules par rapport à la longueur d'onde. Les antennes de radar de profil des nuages ont des lobes secondaires très faibles afin que le retour des nuages soit isolé du retour de surface illuminé.

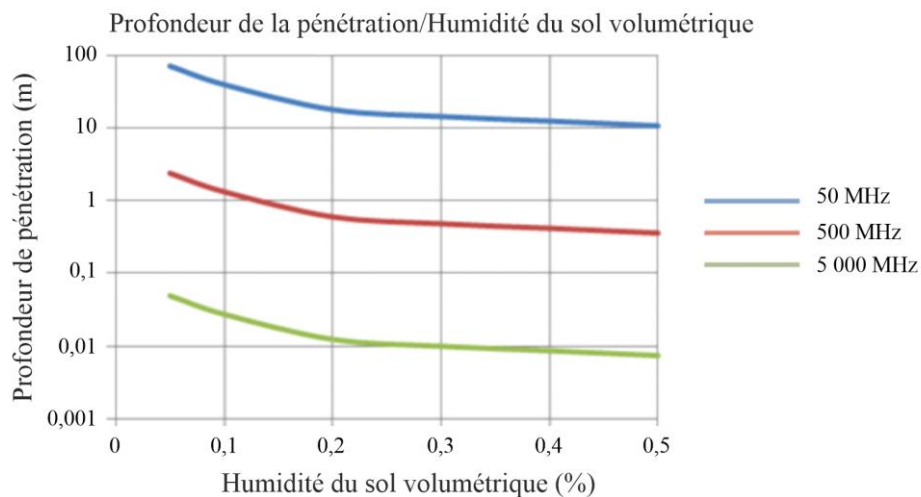
FIGURE 5-24

Exemple de réflectivité d'un cirrus**5.3.7 Radars sondeurs**

Les radars sondeurs sont des systèmes de radar à pénétration du sol (GPR, *ground-penetrating radar*) utilisant des fréquences centrales plus basses que d'autres types de capteurs actifs, afin de pénétrer la surface de la Terre. Ils peuvent servir à établir des cartes radar des couches diffusantes de la subsurface afin de localiser et caractériser de l'eau, de la glace et des gisements souterrains.

La profondeur de pénétration atteignable par les radars sondeurs dépend de l'humidité du sol et de la fréquence, comme indiqué dans la Fig. 5-25.

FIGURE 5-25

Profondeur de pénétration dans la surface

Meteo-05-25

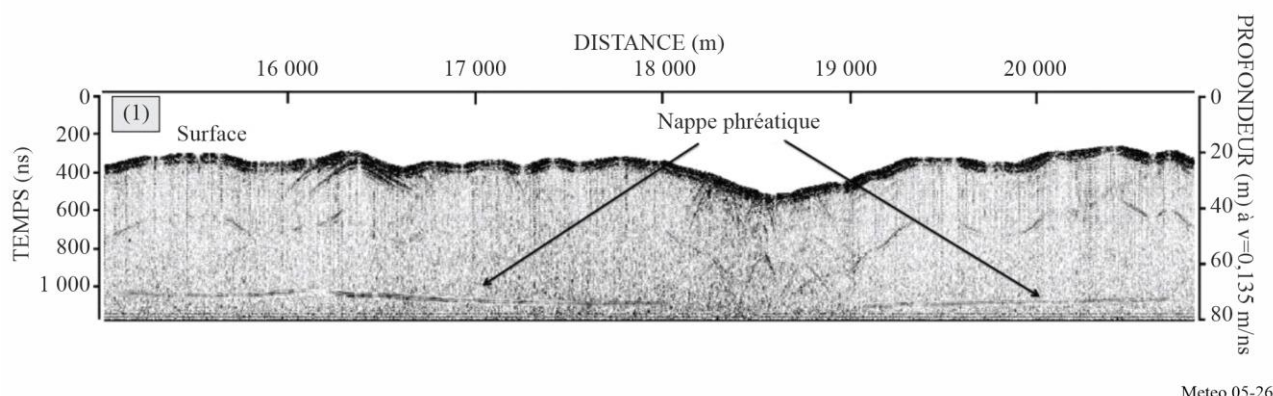
Compte tenu du fait que la profondeur de la pénétration augmente avec la longueur d'onde, les radars sondeurs doivent fonctionner à des fréquences basses. Par ailleurs, étant donné que des environnements secs sont nécessaires, ces radars pourraient fonctionner uniquement dans des inlandsis secs ou dans des zones désertiques.

Plus précisément, la gamme de fréquences 40-50 MHz, destinée à être utilisée par les radars sondeurs, constitue un bon compromis entre la profondeur de pénétration et la résolution; elle peut également être utilisée pour établir une cartographie détaillée de la répartition spatiale des aquifères peu profonds (de l'ordre de 10 à 100 m de profondeur) dans les régions arides, ainsi que pour réaliser la topographie de l'interface basale et déterminer l'épaisseur des inlandsis (de l'ordre de 5 km).

On trouvera dans la Fig. 5-26 un profil bidimensionnel de la distance horizontale par rapport au temps ou à la profondeur, appelé radargramme, recueilli dans le cadre d'une campagne de cartographie par radar en ondes métriques au-dessus d'un aquifère au Koweït en 2011. Cette Figure met en lumière les variations de la profondeur de la nappe phréatique de 49 à 52 m.

FIGURE 5-26

Radargramme recueilli dans le cadre d'une campagne de cartographie par radar aéroporté en ondes métriques au-dessus d'un aquifère au Koweït en 2011



Meteo 05-26

5.3.8 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs

Les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage admissible pour les différentes catégories de capteurs spatiaux actifs sont décrits dans la Recommandation UIT-R RS.1166, laquelle est révisée régulièrement pour tenir compte des modifications réglementaires, par exemple des nouvelles attributions au SETS (active), et des dernières avancées dans la technologie des capteurs susceptibles d'avoir une incidence sur les critères existants de qualité de fonctionnement et de brouillage admissible.

5.3.9 Niveaux de puissance surfacique

Les caractéristiques des divers types de capteurs spatiaux actifs données dans le Tableau 5-4 indiquent que la puissance de crête de l'émetteur et, par conséquent, les niveaux de puissance reçus à la surface de la Terre varieront beaucoup. Le Tableau 5-5 montre les niveaux de puissance surfacique à la surface de la Terre pour certaines configurations types de capteurs actifs.

TABLEAU 5-5

Niveaux de puissance surfacique types à la surface de la Terre

Paramètre	Type de capteur					
	SAR	Altimètre	Diffusiomètre	Radars de précipitations	Radars de profil des nuages	Sondeurs
Puissance rayonnée (W)	1 500	20	100	578	630	100
Gain d'antenne (dB)	36,4	43,3	34	47,7	63,4	10
Portée (km)	695	1 344	1 145	350	400	400
Puissance surfacique (dB(W/m ²))	-59,67	-77,25	-78,17	-46,55	-31,64	-93,03

CHAPITRE 6

Météorologie spatiale

6.1 Définition de la météorologie spatiale et de son service de radiocommunication associé

La CMR-23 a approuvé la définition suivante de la météorologie spatiale:

météorologie spatiale: phénomènes naturels, provenant principalement de l'activité solaire et qui se produisent au-delà de la partie principale de l'atmosphère terrestre, qui ont des incidences sur l'environnement de la Terre et les activités humaines;

L'Article **29B.1** du Règlement des radiocommunications définit le service de radiocommunication lié aux observations de météorologie spatiale comme suit: «Les systèmes de capteurs de météorologie spatiale peuvent fonctionner dans le cadre des attributions au service des auxiliaires de la météorologie (météorologie spatiale).»

6.2 Observations de météorologie spatiale

6.2.1 Phénomènes observés

Divers phénomènes physiques sont associés à la météorologie spatiale, comme le montre la Fig. 6-1. Il s'agit notamment des orages et sous-orages géomagnétiques, de l'énergisation des ceintures de radiations de Van Allen, des aurores, des perturbations ionosphériques, de la scintillation des signaux radioélectriques satellite-sol, des signaux radar longue portée et des courants induits géomagnétiquement à la surface de la Terre. Les éjections de masse coronale et leurs ondes de choc associées, les particules énergétiques solaires, les flux de vent solaire à grande vitesse et les éruptions solaires sont des facteurs importants des phénomènes de météorologie spatiale.

FIGURE 6-1

Phénomènes de météorologie spatiale



Steelé Hill/NASA

Meteo 06-01

6.2.2 La nécessité des observations de météorologie spatiale

Les observations de météorologie spatiale sont nécessaires pour les raisons suivantes:

- surveiller et prévoir l'apparition de perturbations météorologiques dans l'espace et leur probabilité (et notamment surveiller les aspects de l'activité solaire liés aux perturbations susmentionnées induites par la météorologie spatiale);
- déclencher des alertes de danger lorsque des seuils de perturbation sont dépassés;
- orienter la conception des systèmes spatiaux (à savoir les satellites et les procédures de sécurité des astronautes) et des systèmes au sol (à savoir la protection du réseau électrique et la gestion du trafic aérien);
- assurer le fonctionnement sûr et sécurisé des infrastructures énergétiques, des systèmes de transport et des infrastructures de communication, y compris le système mondial de navigation par satellite (GNSS) et les infrastructures essentielles, avec d'éventuels effets sur la sécurité et le bien-être des personnes;
- fournir des données d'entrée permettant d'élaborer et de valider des modèles numériques des conditions météorologiques spatiales;
- mener des travaux de recherche qui permettront de mieux comprendre le Soleil et l'activité solaire dans l'atmosphère terrestre étendue; et
- assurer en permanence la surveillance, la prévision immédiate et les prévisions dont ont besoin les services mobiles, y compris les Télécommunications mobiles internationales (IMT).

6.2.3 Systèmes de capteurs de météorologie spatiale utilisant le spectre des fréquences radioélectriques

Les produits et services opérationnels de météorologie spatiale sont fournis par un ensemble divers d'organisations dans le monde, parfois réunies en réseaux mondiaux. Les produits et services qui répondent aux besoins en matière d'observations de météorologie spatiale peuvent être classés en quatre grandes catégories: les produits et services solaires et interplanétaires (vent solaire); les produits et services liés aux particules énergétiques; les produits et services géomagnétiques; et les produits et services ionosphériques.

Dans ces catégories, les observations sont obtenues grâce à une combinaison d'instruments au sol et d'instruments spatiaux. Les mesures des particules énergétiques et du champ géomagnétique sont généralement réalisées *in situ*: dans l'espace, dans l'atmosphère et au sol. Les méthodes de détection ne prévoyant pas d'utiliser directement les signaux radioélectriques, ces types d'observations ne seront pas examinés plus avant dans le présent chapitre.

Les autres instruments de télédétection qui utilisent les émissions et la propagation des ondes radioélectriques pour effectuer leurs mesures comprennent des systèmes passifs (réception uniquement) et actifs (émission et réception).

De nombreux systèmes de capteurs en mode réception uniquement utilisent des signaux d'opportunité (soit artificiels, comme les signaux GNSS, soit d'origine naturelle, comme les sources radioélectriques cosmiques). Les systèmes de capteurs actifs (émission et réception) sont utilisés pour sonder l'état de l'ionosphère en propageant des signaux radioélectriques.

6.2.3.1 Observations solaires

Les émissions radioélectriques solaires sont observées à l'aide de radiospectrographes placés au sol, d'imageurs et de systèmes d'observation du flux radioélectrique solaire à fréquence unique. Les observations radioélectriques sont assurées par:

- 1) des antennes seules qui observent le Soleil dans sa totalité à des fréquences choisies;
- 2) des spectrographes qui observent le Soleil dans sa totalité sur une gamme de fréquences étendue; et
- 3) des imageurs, ou radiohéliographes, dont le fonctionnement repose sur la technique de synthèse d'ouverture (interférométrie), qui fournissent des cartes bidimensionnelles de l'activité solaire.

Les systèmes d'observation radioélectrique de l'activité solaire sont déployés dans le monde entier et assurent une couverture 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, des émissions radioélectriques solaires.

6.2.3.1.1 Flux solaire

Les émissions hyperfréquences du Soleil sont observées à des fréquences diverses afin d'étudier différents processus solaires énergétiques et leur influence sur la thermosphère de la Terre (rayonnement solaire ultraviolet extrême (EUV), activité solaire dans la partie la moins énergétique du spectre UV: plages solaires, facules et boucles coronales chaudes, par exemple). Ces différentes observations sont nécessaires pour obtenir une évaluation fiable et stable des caractéristiques de la thermosphère, y compris, par exemple, sa densité ou son ionisation.

6.2.3.1.2 Spectrographe solaire

Les spectrographes radioélectriques solaires effectuent généralement des balayages dans une gamme de fréquences allant de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Ils sont particulièrement utiles pour observer les sursauts radioélectriques solaires, qui constituent des indicateurs d'éruptions, d'éjections de masse coronale et d'autres phénomènes solaires, et peuvent être utilisés comme indicateurs de la vitesse des chocs et du plasma émergent dans le vent solaire. Une cadence spécifiée de 0,1 à 60 secondes (bien qu'une cadence allant jusqu'à 60 secondes ne soit pas particulièrement utile pour les sursauts radioélectriques) et un temps de disponibilité compris entre 1 et 30 minutes environ sont nécessaires.

6.2.3.1.3 Héliographe

Les héliographes observant l'activité radioélectrique solaire utilisent des techniques de synthèse d'ouverture pour cartographier rapidement les flux radioélectriques solaires en deux dimensions. La plupart de ces héliographes couvrent également plusieurs fréquences simultanément.

6.2.3.2 Observations héliosphériques

Les observations héliosphériques visent à comprendre l'atmosphère solaire et l'activité solaire, depuis la génération et l'émergence du champ magnétique du Soleil jusqu'à la création du vent solaire et l'accélération des particules énergétiques solaires.

6.2.3.2.1 Scintillations interplanétaires

Les scintillations interplanétaires désignent les variations d'intensité des ondes radioélectriques issues d'une source radioélectrique compacte et distante, que l'on peut observer lorsque les ondes se propagent à travers la densité du plasma perturbée dans le vent solaire, en particulier près du Soleil. L'ampleur de la perturbation dans le vent solaire (ou la densité du vent solaire elle-même) peut être estimée à partir de l'amplitude de la scintillation. On peut calculer la vitesse du vent solaire à l'aide du spectre de scintillation des scintillations interplanétaires obtenu avec une seule station d'observation des scintillations interplanétaires, ou à partir des décalages temporels entre deux configurations de scintillations interplanétaires obtenues avec plusieurs stations distinctes d'observation des scintillations interplanétaires. La plupart des systèmes d'observation exploitant les scintillations interplanétaires fonctionnent à une seule fréquence.

6.2.3.3 Observations ionosphériques

Les observations ionosphériques visent à comprendre la variabilité ionosphérique, qui est associée à l'activité solaire, à la magnétosphère terrestre et à l'atmosphère neutre. Ces observations sont nécessaires pour anticiper les incidences sur les technologies modernes.

6.2.3.3.1 Ionosondes

Une ionosonde émet dans l'ionosphère un balayage de signaux radioélectriques (ondes pulsées ou entretenues). Les échos sont renvoyés là où la fréquence radioélectrique équivaut à la fréquence du plasma local, laquelle est proportionnelle à la racine carrée de la densité électronique. La fréquence de crête renvoyée par chaque couche ionosphérique est donc une mesure directe de la concentration électronique. En revanche, la hauteur de chaque couche est estimée à partir du temps de vol du signal radioélectrique, en supposant qu'il se propage à travers l'espace libre. Étant donné que la fréquence du plasma (densité électronique) varie en fonction de l'altitude, et aussi du temps et des conditions géophysiques, les ionosondes doivent couvrir une gamme de fréquences importante (par exemple de $\sim 0,5$ à 15 MHz). La couverture en altitude est limitée par la fréquence de coupure ionosphérique de crête. Des fréquences supérieures à la fréquence du plasma local peuvent être

utilisées pour un sondage oblique jusqu'à 30 MHz. Les ionosondes de recherche modernes peuvent également servir à mesurer d'autres variables, plus particulièrement la vitesse du plasma et le spectre des ondes de gravité.

6.2.3.3.2 Radars à diffusion incohérente

Le radar à diffusion incohérente est une technique radar permettant de mesurer avec précision la température du plasma ionosphérique. La technique permet d'observer une très faible diffusion des oscillations résonnantes du plasma thermique en mode acoustique-ionique et Langmuir. Les principales mesures concernent la densité électronique, la température électronique, la température ionique et les dérives ionosphériques. Il est possible d'obtenir un large ensemble de produits dérivés dans certaines conditions, notamment les champs électriques, les vents neutres et les compositions ioniques. Les mesures sont résolues spatialement et peuvent être effectuées au-dessus et au-dessous de la crête ionosphérique. Bien que les radars à diffusion incohérente permettent de déterminer l'altitude des couches ionosphériques avec une grande précision, un étalonnage croisé avec des ionosondes ou l'utilisation de caractéristiques spécifiques dans les spectres de ces radars sont nécessaires pour étalonner la concentration électronique, cette dernière étant déduite de la puissance totale renvoyée. On peut estimer la distribution horizontale de l'ionisation en déplaçant la parabole du radar ou en modifiant la phase d'un réseau d'antennes. On peut calculer les vitesses vectorielles en combinant les données provenant de différentes antennes ou de différentes directions de faisceau.

Les radars passent d'un faisceau à l'autre après chaque impulsion émise, et chaque faisceau est visité à de nombreuses reprises pendant une période d'intégration type de 15 à 60 s. Les données provenant de multiples faisceaux fournissent des images volumétriques de la densité électronique ionosphérique, de la température électronique, de la température ionique et de la vitesse en visibilité directe. Les vitesses en visibilité directe de plusieurs faisceaux peuvent être combinées de façon à établir des estimations des vents neutres de la région E du champ électrique vectoriel.

Les radars à diffusion incohérente émettent de puissantes impulsions radioélectriques en ondes métriques ou décimétriques dans l'ionosphère. Les fréquences centrales types des bandes des ondes décamétriques/métriques/décimétriques/de la bande L sont utilisées avec une largeur de bande allant jusqu'à 30 MHz en réception et généralement jusqu'à 1 MHz en émission pour les systèmes existants. Une largeur de bande d'émission allant jusqu'à 10 MHz est prévue pour les futurs systèmes. La plupart des systèmes étant des systèmes d'une capacité de plusieurs mégawatts dotés d'antennes dont les dimensions sont comprises entre 25 et 300 m, une puissance conséquente s'impose, d'autant plus que la surface équivalente radar du plasma thermique ionosphérique est très faible. Les systèmes anciens sont généralement à antenne unique (réflecteur parabolique), alors que les systèmes plus modernes disposent d'antennes radar réseau à commande de phase.

6.2.3.3.3 Radars à diffusion cohérente

Ces systèmes radar mesurent la diffusion cohérente due aux irrégularités ionosphériques s'expliquant par les instabilités, les ondes et les structures du plasma. De cette façon, il est possible de déterminer la puissance renvoyée et la vitesse en visibilité directe. On peut calculer les vitesses vectorielles en combinant les données provenant de deux stations radar ou plus. Les radars à diffusion cohérente ont souvent été déployés en tant que systèmes transportables pouvant être déplacés pour permettre l'étude de différentes régions de l'ionosphère. En général, les systèmes dédiés sont développés à 30, 50 ou 144 MHz avec des largeurs de bande de l'ordre de 1 MHz.

6.2.3.3.4 Autres radars

Le système radar Doppler en ondes décamétriques se compose d'un émetteur radio à ondes entretenues et de plusieurs récepteurs, très stables en fréquence et associés à un dispositif d'enregistrement. Les signaux en ondes entretenues sont généralement transmis à des fréquences comprises entre 3 et 10 MHz. Lorsqu'une onde radioélectrique est réfléchi par l'ionosphère, un déplacement du point de réflexion produira un changement dans le trajet de la phase du signal et, par conséquent, un décalage Doppler proportionnel à la vitesse de variation du trajet. Les mesures Doppler en ondes décamétriques peuvent servir à étudier les perturbations ionosphériques telles que les ondes gravitationnelles atmosphériques, les perturbations ionosphériques itinérantes, les occurrences des couches ionosphériques E sporadique et F étalée, ainsi que les ondes magnétiques pulsées à ultra-basse fréquence, telles que les pulsations Pi2. Il est important de comprendre les perturbations ionosphériques itinérantes et les caractéristiques des ondes gravitationnelles atmosphériques pour la surveillance de la météorologie spatiale, car la propagation des scintillations ionosphériques causées

par ces phénomènes permet de prévoir à court terme les incidences de la météorologie spatiale sur les radiocommunications et les applications s'appuyant sur le GNSS.

Les radars étudiant la dynamique de la mésosphère/basse thermosphère permettent d'obtenir des mesures des régions mésosphériques à l'aide d'observations de réflexion partielle, souvent complétées par la rotation de Faraday. La mésosphère est une couche atmosphérique vitale particulièrement observée par des radars météorologiques et des radars à moyenne fréquence. Ces mesures radar de la mésosphère/basse thermosphère ont été largement utilisées pour détecter les vents et marées moyens et pour mieux comprendre le comportement saisonnier, interannuel et à long terme de la circulation de la mésosphère/basse thermosphère, y compris les tendances à long terme.

6.2.3.3.5 Tomographie ionosphérique

La tomographie ionosphérique est une technique d'analyse de la densité électronique en deux ou trois dimensions. La méthode est fondée sur des mesures au sol de signaux bifréquence de satellites en orbite terrestre basse à 150 MHz et 400 MHz. Les récepteurs radio bifréquence mesurent la différence de phase des signaux émis par les satellites. Plusieurs récepteurs sont nécessaires pour effectuer une analyse tomographique. Selon l'algorithme utilisé, on peut également tirer parti de mesures de la densité électronique effectuées par d'autres instruments (par exemple des récepteurs GNSS).

6.2.3.3.6 Radiotélescopes

Les radiotélescopes peuvent servir à observer le Soleil et le vent solaire, mais aussi l'ionosphère. Les observations sur de grandes largeurs de bande permettent d'identifier la scintillation ionosphérique, et ainsi d'améliorer la surveillance de l'ionosphère à des latitudes moyennes.

6.2.3.3.7 Riomètres

Les mesures au sol de signaux radioélectriques provenant de sources connues au-dessus de l'atmosphère (généralement des sources radioélectriques cosmiques) peuvent servir à cartographier l'absorption dans la basse ionosphère à l'aide d'instruments de mesure de l'opacité ionosphérique relative, appelés riomètres. Les trois types d'absorption des ondes radioélectriques les plus courants sont les suivants:

- 1) l'absorption aurorale causée par la précipitation d'électrons;
- 2) l'absorption dans la calotte polaire associée aux protons > 10 MeV dans l'environnement proche de la Terre; et
- 3) l'absorption induite par les rayons X causant une absorption soudaine du bruit cosmique résultant de sursauts de rayons X solaires qui génèrent un niveau anormal d'électrons dans la région D (généralement à une altitude de 60 à 100 km).

Les riomètres au sol mesurent la puissance du bruit radioélectrique cosmique de fond, qui est absorbé dans la région ionosphérique D. L'absorption dans la région D est fonction du degré d'ionisation (densité électronique) présent. Pour obtenir la quantité d'absorption due à un excès d'ionisation, la tension du signal du riomètre d'un jour quelconque est comparée à la courbe dite des jours calmes, qui est déterminée pendant certains jours durant lesquels les sursauts de rayons X solaires et les perturbations géomagnétiques (jours géomagnétiquement calmes) sont absents et le flux de protons solaires est au niveau du bruit de fond.

Un riomètre est un type de récepteur radioélectrique à ondes entretenues dont la sensibilité à la réception est égale à la température de bruit du ciel de fond et qui est conçu pour mesurer l'absorption des ondes radioélectriques qui traversent l'ionosphère. En général, une antenne dipolaire est orientée vers le zénith, ce qui donne un faisceau de ~ 100 km de diamètre à une altitude atmosphérique de 90 km. La plupart du temps, le niveau RF reçu est dominé par les émissions radioélectriques d'origine galactique et présente une variation régulière du temps sidéral qui peut être caractérisée par une courbe des jours calmes. L'absorption des ondes radioélectriques par l'ionosphère réduit le niveau de tension du riomètre à un niveau inférieur à celui de la courbe des jours calmes.

Plusieurs riomètres peuvent donner des informations contextuelles générales sur l'environnement proche de la Terre et sur l'étendue de la région d'absorption atmosphérique.

Il existe trois catégories de riomètres:

- les riomètres à large faisceau disposent d'une seule antenne et fonctionnent à 20,5, 30, 38,2 et 51,4 MHz;
- les riomètres imageurs ont plusieurs faisceaux étroits et s'appuient généralement sur des antennes-réseau à commande de phase pour obtenir une résolution temporelle et spatiale plus élevée; ils utilisent en principe les mêmes fréquences que les riomètres à large faisceau;
- les riomètres spectraux mesurent le bruit radioélectrique cosmique à plusieurs fréquences, généralement comprises entre 20 et 60 MHz.

Il existe environ 50 sites de riomètres dans le monde, dont la plupart sont situés à des latitudes élevées.

6.2.3.3.8 Système mondial de navigation par satellite (GNSS, *global navigation satellite system*)

Le contenu électronique total (CET) le long d'un trajet de propagation donné peut être mesuré en suivant le temps de propagation et le déphasage des signaux radioélectriques GNSS à l'aide de récepteurs spatioportés ou au sol. Lorsque les satellites de navigation se déplacent par rapport au récepteur, le CET le long des nombreux trajets de propagation disponibles sert à déterminer les distributions régionales et mondiales de la densité électronique ionosphérique. Les récepteurs GNSS correspondants utilisés pour les observations de météorologie spatiale mesurent l'amplitude, la pseudodistance et la phase à deux fréquences radioélectriques ou plus avec une résolution temporelle de 1 ou 30 s.

En tirant parti des grands réseaux mondiaux de stations et de la répartition des stations, il est possible d'établir des cartes ionosphériques dédiées en supposant que tous les électrons sont situés dans une couche mince à une hauteur spécifique de 350 ou 450 km.

En outre, la scintillation ionosphérique est généralement mesurée à l'aide d'observations GNSS, en appliquant toutefois une fréquence d'échantillonnage améliorée (généralement entre 50 et 100 Hz). Des indices de scintillation à bruit ultra-faible peuvent être générés à partir des données GNSS d'amplitude et de phase. Les scintillations sont liées à la présence de structures à petite échelle dans l'ionosphère, qui sont étroitement associées aux phénomènes de météorologie spatiale.

Les données d'occultation radio spatiales obtenues à partir de satellites en orbite terrestre basse dotés de récepteurs GNSS peuvent également être utilisées pour fournir des informations à haute résolution sur la structure ionosphérique verticale, y compris des informations globales sur des perturbations telles que les couches E sporadiques ou les bulles de plasma équatoriales. Ces observations sont particulièrement importantes au-dessus des zones océaniques où il n'est pas possible d'effectuer des observations depuis des réseaux au sol. Les mesures effectuées à partir de récepteurs spatiaux GNSS et d'occultation radio constituent l'un des seuls moyens d'obtenir des profils verticaux globaux de la densité électronique. De plus, les observations de la phase de la porteuse à double fréquence effectuées par l'antenne ou les antennes de toit des satellites dotés d'un récepteur GNSS à des fins de localisation donnent des informations sur le contenu électronique intégré de l'ionosphère et de la plasmasphère au-dessus de l'altitude orbitale du satellite.

6.2.3.3.9 Ondes myriamétriques (VLF, *very low frequency*)

L'une des rares techniques permettant de sonder la région D de l'ionosphère consiste à utiliser les rayonnements électromagnétiques en ondes myriamétriques piégés entre la basse ionosphère (environ 85 km) et la Terre; ces signaux peuvent être reçus à des milliers de kilomètres de la source. La nature des ondes radioélectriques reçues est déterminée par la propagation à l'intérieur du guide d'ondes Terre-ionosphère, la variabilité étant due en grande partie à des changements dans les profils de densité électronique à l'intérieur et au-dessous de la basse ionosphère (région D). Pendant les éruptions solaires, les densités d'électrons de la région D sont entraînées, en grande partie, par les rayons X mous (1-10 keV) de l'éruption elle-même. Par conséquent, ces anomalies observées produisent une observation indirecte de la nature de l'éruption solaire.

6.2.4 Catégorisation des capteurs basés sur les radiofréquences en ce qui concerne la prise en charge des produits actuels de météorologie spatiale

Sur la base d'études menées par l'OMM et l'UIT-R, en particulier du Rapport UIT-R RS.2456 qui fournit des informations sur les caractéristiques de certains types d'instruments, une classification non exhaustive des systèmes de capteurs de météorologie spatiale utilisant le spectre des fréquences radioélectriques, basée sur l'application des produits d'observation actuels de la météorologie spatiale, a été établie comme suit:

- systèmes et fréquences utilisés dans les applications opérationnelles de météorologie spatiale (pour la surveillance en temps réel et l'initialisation en temps quasi réel des modèles de prévision);
- systèmes et fréquences passant de la recherche à l'exploitation;
- systèmes de recherche actuellement non utilisés dans la pratique (exemple: données non disponibles en temps quasi réel, lacunes dans la fourniture de données).

Les Tableaux 6-1 à 6-3 présentent brièvement les instruments de météorologie spatiale utilisant des fréquences radioélectriques et leur classification. Les fréquences citées dans le présent Manuel sont présentées à titre d'information uniquement; elles ne constituent aucunement une disposition réglementaire ni ne laissent entendre qu'une telle disposition devrait être établie.

TABLEAU 6-1

Catégorie 1 – Systèmes en exploitation

Type d'instrument	Fréquence (MHz)	Largeur de bande	Lieu (pays/région)
Observation du flux radioélectrique solaire	245, 410, 610, 8 800, 15 400	Variable	Australie, Italie, États-Unis d'Amérique
	2 695	Variable	Australie, Italie, États-Unis d'Amérique, Belgique
	1 415, 4 995	Variable	Australie, Italie, États-Unis d'Amérique, Canada, Belgique, Chine
	2 200, 2 300, 2 730, 3 350, 4 542, 4 500, 5 000, 8 000, 9 000, 9 081	10 MHz	Chine
	2 800	Variable	Canada, Belgique, Chine, Corée (République de), Pologne
	1 000	Variable	Japon, Belgique, Pologne
Spectrographe	30-3 000	2 970 kHz	Corée (République de)
	20-650	1 000 kHz	Grèce
	70-9 000	8 930 kHz	Japon
	232-258, 389-431, 500-18 000	18 000 kHz	Corée (République de)
	10-80	70 kHz	France
	20-80	60 000 kHz	Belgique
	45-450	400 MHz (résolution de fréquence 98 kHz)	
	275-1 495	1 220 MHz	
	45,0-870,0	0,08, 0,30, 2,40 MHz	Monde
	140-1 000	860 MHz	France
	25-180	Non disponible	Australie, Italie, États-Unis d'Amérique
	35 300-36 300 37 300-38 300	500, 1 000 MHz	Finlande
	15-15 000 15 000-40 000	Variable	Chine
Radiohéliographe	150-450	0,7 MHz	France

TABLEAU 6-1 (*fin*)

Type d'instrument	Fréquence (MHz)	Largeur de bande	Lieu (pays/région)
Scintillation interplanétaire	327	10 MHz	Japon
	10-90; 110-190; 170-230; 210-250	80 MHz	Europe (LOFAR) Finlande (KAIRA)
	139,65	Non disponible	Mexique
Ionosonde	0,5-33,0	42 kHz, 50 kHz, 60 kHz	Monde
Tomographie ionosphérique	150	6,0 MHz	Finlande, Norvège, Suède
	400	8,0 MHz	
Riomètre	20,5, 30, 32,4, 38,2, 51,4	15, 30, 100, 250 kHz	Canada, Islande, Argentine, Australie, États-Unis d'Amérique, République sudafricaine, Europe du Nord, Groenland, Chine, Antarctique, Fédération de Russie, Brésil
	20-60	200, 250 kHz	Finlande
Surveillance ionosphérique assurée par le SRNS	GPS (L1, L2, L5) BeiDou (B1, B2, B3) GLONASS (L1, L2) Galileo (E1, E5, E6)		Monde

TABLEAU 6-2

Catégorie 2 – Systèmes en transition de la recherche à l'exploitation

Type d'instrument	Fréquence (MHz)	Largeur de bande	Lieu (pays/région)
Scintillation interplanétaire	10-85	80 MHz	France
	50-350	300 MHz	Australie
Radar à diffusion incohérente	1-20	Variable	Italie, Argentine
	427-453	25 MHz	Europe du Nord, Amérique du Nord, Japon
Radar à diffusion cohérente	40,8	18,1-404 kHz	République de Corée
	0,3-26	10 kHz	Monde
Radar observant la dynamique mésosphère/basse thermosphère (radar météorique)	33,2	18,1 kHz	République de Corée
	3,17	40 kHz	Allemagne
	2	200 kHz	Chine
	35,24	10 MHz	
	39	1 MHz	
	3,18	40 kHz	Norvège
Autres types d'instruments pour les observations opportunistes:			
Récepteur en ondes myriamétriques (VLF)	0,01-0,5	50 kHz, diverses	Monde

TABLEAU 6-3

Catégorie 3 – Systèmes de recherche

Type d'instrument	Lieu (pays/région)
Radiotélescope solaire	Fédération de Russie
	Finlande (MRO-14 et MRO-1.8)
Radiohéliographe	Finlande, Japon, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Inde
Spectrographe	Inde, Fédération de Russie, Ukraine, République tchèque, Suisse
Spectrographe en ondes décimétriques	France (réseau de décimètres), Japon
Instrument ionosphérique	Norvège (Tromsø), États-Unis d'Amérique (Alaska, Porto Rico), Fédération de Russie (Vasilsurks), Allemagne
Ionosondes	Allemagne
Radar à diffusion cohérente	Norvège (MAARSY)

CHAPITRE 7

Les autres systèmes de radiocommunication utilisés en météorologie et dans les activités environnementales connexes

7.1 Introduction

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, il est nécessaire de recueillir des observations de nombreux sites distants, sur la terre ferme, en mer, dans les airs et dans l'espace pour assurer les services météorologiques, climatiques, hydrologiques et marins et des services environnementaux connexes. Ainsi, l'infrastructure mondiale de l'OMM compte sur beaucoup d'autres services de radiocommunication outre les services MetSat, MetAids, de radiolocalisation et SETS décrits dans les chapitres précédents. Le présent Chapitre vise à décrire certains de ces systèmes additionnels dont l'exploitation repose sur les fréquences radioélectriques.

Les § 7.2 à 7.4 contiennent des informations relatives aux systèmes utilisés pour partager les données des systèmes de mesure *in situ* et la diffusion des données de prévision. Les § 7.5 à 7.8 décrivent les systèmes d'observation qui dépendent de l'accès au spectre radioélectrique pour mesurer des caractéristiques environnementales spécifiques telles que l'emplacement et le déclenchement des impacts de foudre. Certains de ces systèmes utilisent des signaux d'opportunité générés par d'autres applications du spectre radioélectrique pour mesurer les caractéristiques atmosphériques.

L'augmentation de la résolution du modèle PNT a conduit à une hausse de la demande de mesures *in situ* des paramètres environnementaux, dont beaucoup peuvent maintenant être effectuées à l'aide de systèmes automatisés. La technologie des communications hertziennes peut permettre à ces systèmes d'exploiter et de partager des données de sites distants. Dans certains cas, ces liaisons peuvent également permettre d'assurer la commande et la maintenance à distance, et ainsi contribuer à réduire la nécessité d'une intervention humaine et favoriser la maintenance des stations distantes. Avec l'évolution constante de la technologie, ces systèmes utilisent maintenant divers services de radiocommunication pour partager des données entre des sites distants et des centres de traitement de données.

Il est également essentiel de veiller à ce que les informations et les avertissements météorologiques soient diffusés aux utilisateurs finals dans les plus brefs délais, que ce soit dans les zones urbaines densément peuplées ou dans les régions isolées peu peuplées. En outre, des services météorologiques, climatiques, hydrologiques et maritimes et des services environnementaux connexes sont fournis pour appuyer les opérations maritimes et aériennes dans le monde entier, et permettre ainsi des activités sûres dans ces secteurs très sensibles aux conditions météorologiques. Les systèmes de diffusion des produits météorologiques utilisent une large gamme de services de radiocommunication pour répondre aux besoins d'un large éventail d'utilisateurs finals.

7.2 Systèmes de diffusion de données

Comme indiqué au § 7.1, la demande d'un plus grand nombre de mesures *in situ* pour favoriser l'amélioration des prévisions météorologiques a entraîné une augmentation de l'utilisation des systèmes de mesure automatiques, qui nécessitent des liaisons de communication fiables pour partager les données et permettre la commande et le contrôle à distance. Les caractéristiques techniques de ces systèmes, y compris les fréquences de fonctionnement, varient considérablement, et presque toutes les bandes RF du service de météorologie peuvent être utilisées; les opérateurs peuvent également utiliser des liaisons de communication disponibles dans le commerce (comme l'Internet mobile). Les choix sont souvent faits en fonction de la largeur de bande nécessaire, qui à son tour est déterminée par le type et la quantité d'informations à transmettre.

La diffusion des prévisions est aussi importante que la collecte et l'archivage des données météorologiques. Il est indispensable de mettre ces prévisions à la disposition du public afin de pouvoir prendre les mesures nécessaires pour assurer la protection des personnes et des biens et, ainsi, sauver des vies. L'initiative Alertes précoces pour tous des Nations Unies a pour objectif d'assurer une protection universelle contre les phénomènes météorologiques, hydrologiques ou climatiques dangereux grâce à des systèmes d'alerte précoce vitaux. Elle repose sur quatre piliers permettant de mettre au point des systèmes d'alerte précoce multirisques

efficaces et inclusifs. Le troisième pilier, [Diffusion et communication des alertes](#), placé sous la direction de l'UIT, vise à mettre en place la connectivité sur le dernier kilomètre afin de faire en sorte que les alertes atteignent les populations concernées à temps pour prendre les mesures nécessaires.

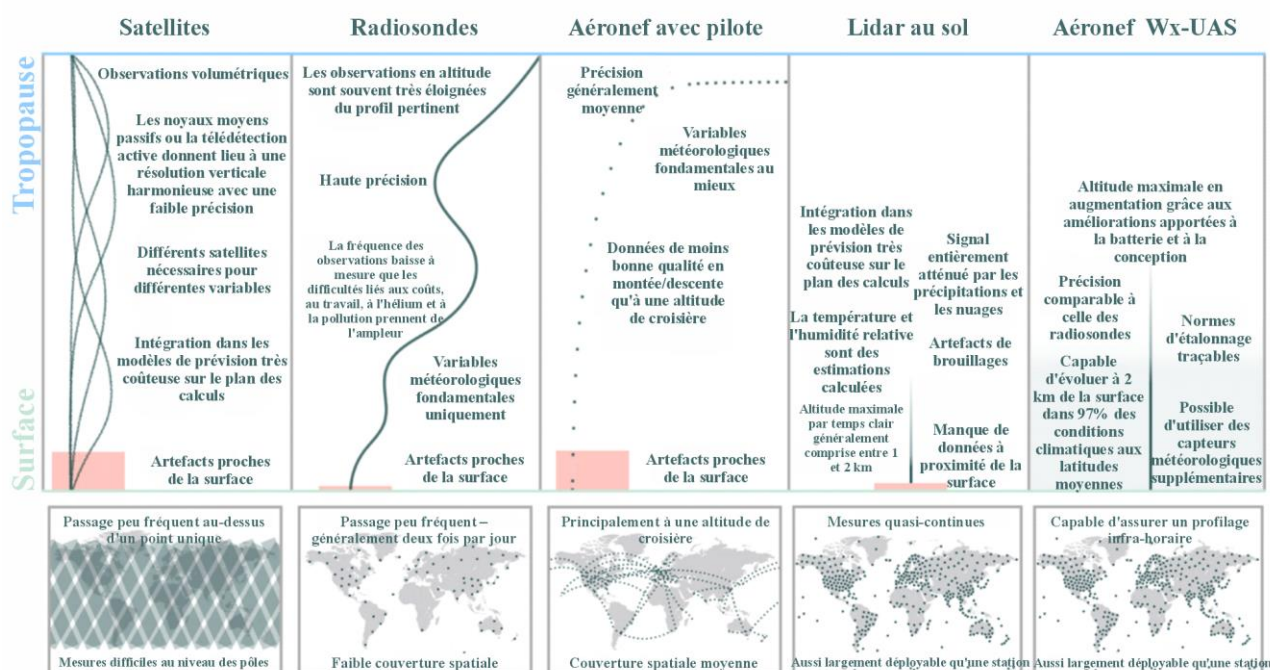
Un certain nombre de systèmes de radiocommunication spécialisés ont été mis au point au fil des ans pour diffuser les prévisions et d'autres données météorologiques. La radiodiffusion vocale est l'une des technologies les plus simples employées; ces systèmes, qui utilisent les ondes métriques, requièrent un équipement minimal à la portée du grand public. Ils servent à annoncer les tempêtes, les crues, les températures extrêmes et d'autres dangers naturels et d'origine anthropique. Ils peuvent être améliorés pour transmettre de brefs messages aux personnes sourdes dotées d'un matériel adéquat. Ces appareils peuvent être également conçus pour assurer la diffusion continue des données ou pour demeurer silencieux jusqu'à l'émission d'un signal d'alerte avertissant d'un événement spécial comme le gros temps ou d'autres menaces imminentes. Ils sont intégrés aux services fixes et mobiles, y compris au service mobile maritime. D'autres systèmes de diffusion utilisent les techniques de radio-télévision (terrestres et satellites) et les liaisons descendantes MetSat (on trouvera des précisions au Chapitre 2).

7.3 Systèmes d'aéronef sans pilote pour la détection météorologique

Les systèmes d'aéronef sans pilote pour la détection météorologique (Wx-UAS) deviennent de plus en plus importants pour les activités météorologiques et d'observation de la Terre. Dans de nombreux réseaux d'observation existants, la couche limite et la basse atmosphère ne sont pas échantillonnées aux échelles temporelles et spatiales nécessaires pour améliorer les analyses à méso-échelle. Les systèmes Wx-UAS offrent de nouvelles possibilités de combler partiellement cette lacune concernant les observations (voir la Fig. 7-1).

FIGURE 7-1

Diagramme comparant la couverture horizontale et la couverture verticale de cinq systèmes de mesure et mentionnant les lacunes dans les mesures à proximité de la surface de la Terre



Les systèmes Wx-UAS sont utilisés pour des applications telles que les profils verticaux périodiques de la couche limite, le largage de parasondes au-dessus de zones océaniques où des données de radiosondes ont toujours manqué, les vols au travers de cyclones tropicaux pour la collecte *in situ* de données et la reconnaissance aérienne dans les zones touchées par des conditions météorologiques extrêmes ou la sécheresse. L'utilisation de systèmes Wx-UAS aux fins d'analyses météorologiques peut améliorer la prévision numérique du temps ainsi que les prévisions du tracé des ouragans, donner plus de temps aux populations pour se préparer et permettre de mieux comprendre le climat.

Dans le cadre des opérations effectuées au moyen de systèmes Wx-UAS à des fins d'études météorologiques, on utilise souvent les bandes sans licence pour les systèmes de commande et de contrôle de l'aéronef, même si certains systèmes utilisent des bandes avec licence. Le spectre de fréquences utilisé par les systèmes de commande et de contrôle des systèmes Wx-UAS est également exploité pour la transmission des données de la charge utile.

7.4 Les systèmes hydrologiques

Les crues sont un phénomène naturel se produisant sur la plus grande partie de la planète; les systèmes contribuant à la prévision de leur occurrence, emplacement et ampleur ont permis de sauver de nombreuses vies et une quantité importante de biens. Les informations ainsi obtenues permettent de mettre en œuvre des mesures d'atténuation adéquates, comme l'évacuation des populations vulnérables, la construction de digues et des barrages et la relocalisation des biens menacés si possible.

Pour compléter les réseaux de radars météorologiques (voir le Chapitre 4) et d'autres observations *in situ* qui sont essentiels pour observer les processus hydrologiques, on se sert aussi de systèmes hydrologiques spécifiques pour mesurer les précipitations, le niveau des cours d'eau et la hauteur et l'étendue du stock neigeux, des paramètres tous utiles pour prédire et signaler rapidement les crues, ainsi que pour évaluer la disponibilité des ressources en eau.

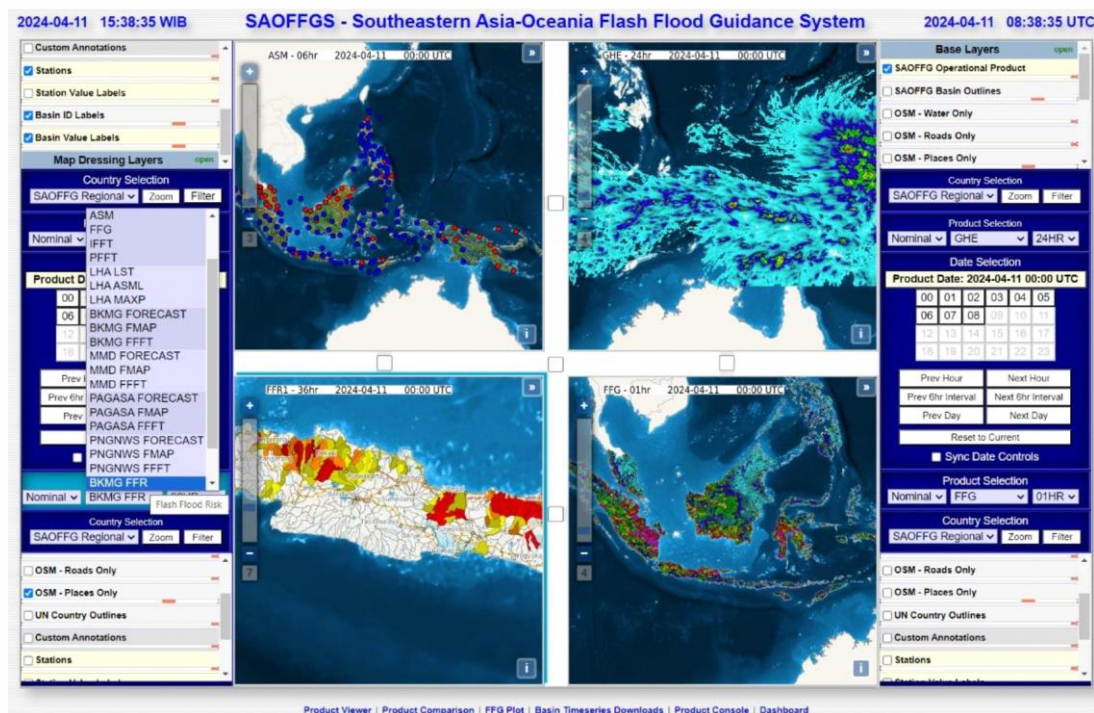
Les collectivités qui font face à des problèmes de crue persistants ou qui sont sujettes à des pertes importantes sont continuellement à la recherche de moyens de réduire les pertes liées aux crues; dans le même temps, elles assurent une utilisation viable de la plaine inondable sur laquelle sont généralement implantées les principales activités agricoles et industrielles et les habitations. Les systèmes d'observations hydrologiques automatisés constituent une solution attrayante en raison de leur faible coût d'exploitation et parce qu'ils peuvent compléter et favoriser le recours à d'autres méthodes de gestion, comme les réservoirs à vannes, l'assurance contre les crues ou le zonage des plaines inondables.

Un système d'observation hydrologique automatisé se compose de capteurs météorologiques et hydrologiques automatisés, axés sur la signalisation d'événements et mesurant les paramètres pertinents, d'un équipement de radiocommunication et de logiciels et matériels informatiques. Il fonctionne selon le principe suivant: les signaux codés sont transmis à une station de base via l'équipement de radiocommunication, qui fonctionne généralement dans les bandes des ondes métriques ou décimétriques et est intégré aux services fixes ou mobiles, en passant généralement par des répéteurs. La station de base recueille ces signaux et les transforme en informations hydrométéorologiques utiles pouvant être affichées ou reliées à un système d'alarme qui prévient les responsables des mesures d'urgence lorsque certaines conditions préétablies sont satisfaites.

Le Système d'indications relatives aux crues éclair assurant une couverture mondiale (FFGS/WGC) constitue un exemple. En intégrant des données de précipitations obtenues par télédétection (telles que des estimations radar et satellitaires des précipitations) et des informations sur la saturation des sols, des modèles hydrologiques et des modèles PNT, il fournit aux prévisionnistes et aux organismes de gestion des catastrophes opérationnels nationaux des produits d'orientation en temps réel. Ces ressources sont essentielles pour mettre en place des alertes de crues éclair dans plus de 70 pays du monde (voir la Fig. 7-2).

FIGURE 7-2

Exemple d'interface MapServer d'un Système d'indications relatives aux crues éclair



Meteo 07-02

7.5 Utilisation à des fins météorologiques des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)

Les signaux de tous les systèmes mondiaux GNSS sont exploités pour les applications météorologiques décrites dans le présent paragraphe. Ces mesures sont de nature opportuniste, car les services météorologiques et hydrologiques nationaux s'appuient sur des signaux provenant de systèmes conçus pour la radionavigation plutôt que pour la surveillance de l'environnement; il s'agit de plusieurs systèmes exploités par divers organismes satellitaires:

- système mondial de localisation (GPS) des États-Unis: signaux transmis à 1 575,42 MHz (L1), 1 227,6 MHz (L2) et 1 176,45 MHz (L5);
- système européen Galileo: fréquences 1 575,42 MHz (E1), 1 176,45, 1 191,795 et 1 207,14 MHz (E5) et 1 278,75 MHz (E6);
- système chinois de navigation par satellite BeiDou (BDS): fréquences 1 575,42 MHz (B1), 1 176,45 MHz (B2) et 1 268,53 MHz (B3);
- système russe GLONASS: fréquences centrées autour de 1 601,72 MHz (L1) et 1 245,78 MHz (L2);
- certains systèmes GNSS régionaux, comme le QZSS japonais, émettent des signaux aux fréquences GPS.

7.5.1 Localisation et synchronisation précises des plates-formes d'observation météorologique

Localisation des plates-formes mobiles d'observation météorologique, par exemple les radiosondes emportées par des ballons météorologiques, les parasondes suspendues à des parachutes (voir le Chapitre 3), les aéronefs sans pilote transportant des capteurs météorologiques (voir le § 7) ou les systèmes de météorologie maritime comme les bouées océaniques.

Synchronisation temporelle précise et exacte entre stations d'observation éloignées, comme l'exigent, notamment, les systèmes de détection des éclairs (voir le § 7.6).

7.5.2 Mesures atmosphériques et de surface

La mesure de la vapeur d'eau totale dans l'atmosphère peut être obtenue à partir du délai de phase dans les signaux GNSS reçus par les récepteurs au sol («observations au sol GNSS») (M. Bevis et al., 1992, Bonafoni et al., 2019). Le calcul de la vapeur d'eau totale nécessite une connaissance précise des positions des différents satellites GNSS et des récepteurs, ainsi que des estimations des erreurs horaires des émetteurs et des récepteurs. Les délais de phase introduits dans la transmission des signaux qui traversent l'ionosphère sont identifiés par les écarts dans les délais de phase entre deux fréquences GNSS et sont corrigés en conséquence. Si l'on connaît également la température et la pression de surface, il est possible de séparer encore le délai de phase causé par la propagation du signal à travers l'atmosphère en une partie sèche et une partie humide, et en fin de compte établir une estimation de la vapeur d'eau totale sur le trajet du satellite. Le capteur GNSS à la surface reçoit des signaux provenant de nombreuses directions en un court laps de temps, mais il peut être cartographié par rapport à la vapeur d'eau totale dans le plan vertical

La mesure des profils de température et d'humidité peut être obtenue à partir des mesures spatiales ou aéroportées par occultation des signaux GNSS, appelées occultation radio. Un récepteur d'occultation radio à bord d'un satellite, d'un aéronef ou d'un ballon indépendant reçoit des signaux de la constellation GNSS traversant l'atmosphère dans une géométrie de sondage au limbe. L'ampleur de la courbure dont font l'objet les signaux GNSS en raison de la réfraction des signaux GPS par l'atmosphère neutre et l'ionosphère («angle de courbure») est mesurée à une série de hauteurs au-dessus de la surface de la Terre. Cela permet de calculer la réfractivité de l'air en fonction de la hauteur. Deux fréquences GNSS sont exploitées pour dissiper l'influence de l'ionosphère sur les signaux reçus; par conséquent, une correction ionosphérique est effectuée avant les extractions de l'atmosphère neutre. Aux niveaux supérieurs de l'atmosphère neutre, l'humidité peut être omise, et on peut supposer que la réfractivité de l'air dépend directement de la température. Plus près de la surface, la température et l'humidité influent sur la réfractivité et doivent être séparées à l'aide d'extracteurs à variation par exemple. Dans les applications PNT, les observations de l'angle de courbure ou de la réfractivité peuvent être utilisées directement sans extraction de la température et de l'humidité. La mesure des variables météorologiques obtenues à l'aide de cette technique donne une résolution verticale élevée, de l'ordre de quelques centaines de mètres, avec une résolution horizontale d'environ 200 à 300 km le long de la ligne de visée et un diamètre de 1,5 à 2 km. Comme dans le cas des mesures de la vapeur d'eau totale, cette technique nécessite une connaissance précise des positions des deux satellites et des erreurs horaires (Anthes (2011), Yue et al., (2014), Bonafoni et al., (2019), et Ho et al., (2020)).

Mesure de la présence d'hydrométéores: avec l'évolution de l'occultation radio ordinaire (occultation radio polarimétrique, ou GNSS-PRO), l'observation séparée des composantes de polarisation horizontale et verticale des signaux GNSS permet non seulement d'effectuer les mesures classiques de l'occultation radio, mais aussi de détecter des hydrométéores. Ces mesures ont mis en lumière la sensibilité aux grosses gouttelettes d'eau liées aux fortes précipitations et aux particules de glace dans les nuages (F. Turk et al., (2024)).

Mesure de l'ionosphère et de la densité électronique: l'utilisation des signaux GNSS pour les mesures ionosphériques et la surveillance de la météorologie spatiale est décrite en détail au Chapitre 6 (§ 6.2.3.3.8).

Mesure de la vitesse des vents à la surface de l'océan, de l'humidité du sol, des caractéristiques de la glace de mer et de l'épaisseur de la neige: 1) les signaux GNSS réfléchis par la surface de la Terre (réflectométrie GNSS, ou GNSS-R) et observés depuis l'espace fournissent des informations sur la vitesse des vents à la surface de l'océan (mais pas sur la direction), l'humidité du sol, les caractéristiques de la glace de mer et l'épaisseur de la neige, lorsqu'ils sont observés dans une géométrie orientée sur le nadir, et sont fondés sur des mesures de l'amplitude ou du rapport signal/bruit, généralement prises à une seule fréquence; 2) les observations rasantes du GNSS-R à des angles d'élévation très faibles et dans des conditions calmes à la surface permettent en outre des extractions altimétriques des propriétés de la surface de la mer et de la glace de mer grâce à des mesures de la phase de la porteuse; 3) mesures à bord d'aéronefs; et 4) les récepteurs GNSS au sol peuvent observer les caractéristiques de l'humidité du sol, de la neige et de la glace en utilisant les signaux réfléchis par la surface en appliquant la technique GNSS-R (Rodriguez-Alvarez (2023)).

7.6 Les systèmes de détection de la foudre

La télédétection de la foudre constitue un outil important utilisé par les météorologistes d'exploitation, étant donné que des informations précises et fournies dans les meilleurs délais concernant la foudre ont un lien clair avec les considérations en matière de sécurité publique sur la terre ferme, en mer et dans les airs. Les exigences des utilisateurs évoluent en conjonction des avancées dans l'utilisation des produits de radars et satellites météorologiques.

La fiabilité de ces systèmes est directement liée aux notions de sécurité publique, l'efficacité du service de prévision ayant une influence sur les activités commerciales et militaires. La sécurité des ingénieurs travaillant sur les lignes haute tension et du personnel qui manipule des explosifs est un exemple d'activité pouvant tirer profit de bonnes prévisions de la foudre.

La détection des éclairs est une opération passive nécessitant l'emploi de radiorécepteurs pour détecter les émissions électromagnétiques produites par les coups de foudre (sphériques). Les données obtenues aux stations de détection peuvent être transmises par un ensemble de technologies de communication, y compris les liaisons fixes, les réseaux mobiles, Internet, etc. (comme indiqué au § 7.2).

Dans les systèmes opérationnels actuels, la position de l'éclair est déterminée en mesurant la direction d'arrivée de la sphère associée (triangulation), le temps d'arrivée de la sphère, ou une combinaison des deux.

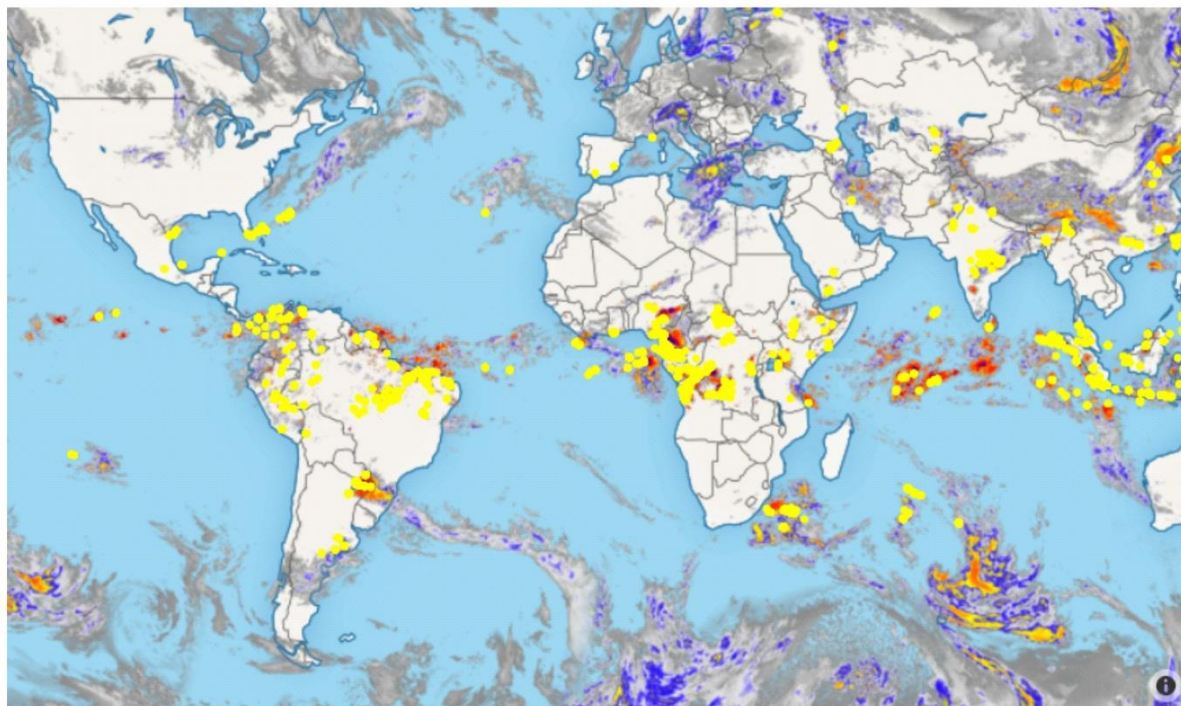
En cas d'utilisation de la triangulation, il faut prendre des mesures à au moins trois stations de détection bien espacées. Toutefois, pour les systèmes fondés sur le temps d'arrivée, il convient d'utiliser au moins quatre stations. Dans la pratique, le nombre de stations utilisées est généralement supérieur au minimum requis, afin d'améliorer la fiabilité des localisations signalées. Les systèmes à temps d'arrivée donnent la plupart du temps des résultats plus précis que les systèmes à direction d'arrivée lorsque les observations s'effectuent à des distances supérieures à plusieurs centaines de kilomètres. Cela est dû à la direction de réception des ondes d'espace captées à la station, qui diffère généralement un peu de la direction réelle de la décharge et qui varie selon l'état des couches de surface près de la station. Les systèmes à temps d'arrivée se fient généralement beaucoup aux signaux GNSS (comme indiqué au § 7.5.1) pour obtenir la synchronisation temporelle nécessaire aux différents lieux de détection. Tous les systèmes ont besoin de communications fiables et efficaces du point de vue des coûts entre les stations éloignées et l'ordinateur central.

La fréquence radioélectrique utilisée pour localiser la foudre dépend de la zone couverte et de l'utilité spécifique du système.

Pour les très longues distances, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres, on se sert de fréquences en ondes myriamétriques centrées autour de 10 kHz (8-11,3 kHz), comme c'est le cas pour le *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN), l'ensemble de données *Global Lightning Dataset* (GLD360) (voir la Fig. 7-3), le *Global Lightning Detection Network* (LINETglobal) ou le *Lightning Electromagnetic Emission Location using Arrival time differencing* (LEELA). En ce qui concerne ces systèmes, les parasites atmosphériques sont reçus à des stations espacées de plusieurs milliers de kilomètres. Ceux-ci sont enregistrés sur les sites de détection et les échantillons sont immédiatement transmis à une station de contrôle centrale, où l'on détermine la localisation des éclairs en calculant les écarts dans les temps d'arrivée. De faibles niveaux de brouillage peuvent parfois être contrés par l'utilisation d'un filtre coupe-bande réglable sur les sites des capteurs affectés; mais le brouillage plus généralisé et de niveaux supérieurs peut grandement perturber le fonctionnement du système.

FIGURE 7-3

Données mondiales de détection de la foudre résultant de mesures effectuées pendant deux minutes par le GLD360 pour le réseau de détection de la foudre à longue distance, superposées à des données satellitaires montrant les nuages et les précipitations



Meteo 07-03

Par exemple, dans le système LEELA (exploité par le service météorologique *Met Office* du Royaume-Uni), 11 récepteurs situés dans toute l'Europe et pouvant être espacés de 2 000 km transmettent en continu des données en ondes myriamétriques horodatées à un processeur central. Celui-ci extrait ensuite les formes d'onde de la foudre des flux de données entrants, les regroupe en fonction de la corrélation des formes d'onde, puis utilise la différence de temps d'arrivée entre les formes d'onde pour calculer l'emplacement d'un coup de foudre par multilatération. Les algorithmes d'extraction de forme d'onde LEELA permettent de décomposer la forme d'onde de la foudre et le bruit de fond, et ainsi d'atténuer automatiquement les brouillages.

Compte tenu de l'importance de ce type de réseau de détection de la foudre longue distance et de la nécessité de le reconnaître à l'échelle mondiale, la CMR-12 a fait une attribution spécifique au service des auxiliaires de la météorologie, limitée aux capteurs passifs, dans la bande 8,3-11,3 kHz. Étant donné que la détection de la foudre utilise des capteurs passifs (réception seulement), les systèmes de détection de la foudre peuvent également fonctionner dans différentes bandes de fréquences sans protection.

Les systèmes opérationnels les plus couramment employés couvrent en détail une superficie plus limitée. Dans ce cas, les parasites atmosphériques sont observés à des fréquences plus élevées centrées sur 200 kHz (les récepteurs à large bande utilisés sont plus sensibles au milieu de la bande 1-350 kHz) et les installations de détection sont généralement espacées de 100 km à 400 km, selon que l'on met l'accent sur les éclairs nuage-sol ou nuage-nuage. À ces fréquences, il est possible d'identifier une décharge nuage-sol par une augmentation prononcée de l'amplitude correspondant au front avant des parasites. On peut établir précisément le temps d'arrivée de ce front. Les temps enregistrés sur les sites du réseau sont transmis à un ordinateur central qui calcule les positions des décharges. Souvent, les réseaux à différence de temps d'arrivée sont exploités en conjonction avec des systèmes de détection des directions magnétiques installés auparavant. On trouvera un aperçu de la technologie et des systèmes dans le Guide N° 8 des instruments et des méthodes d'observation de l'OMM, Volume III – Systèmes d'observation, Chapitre 6.

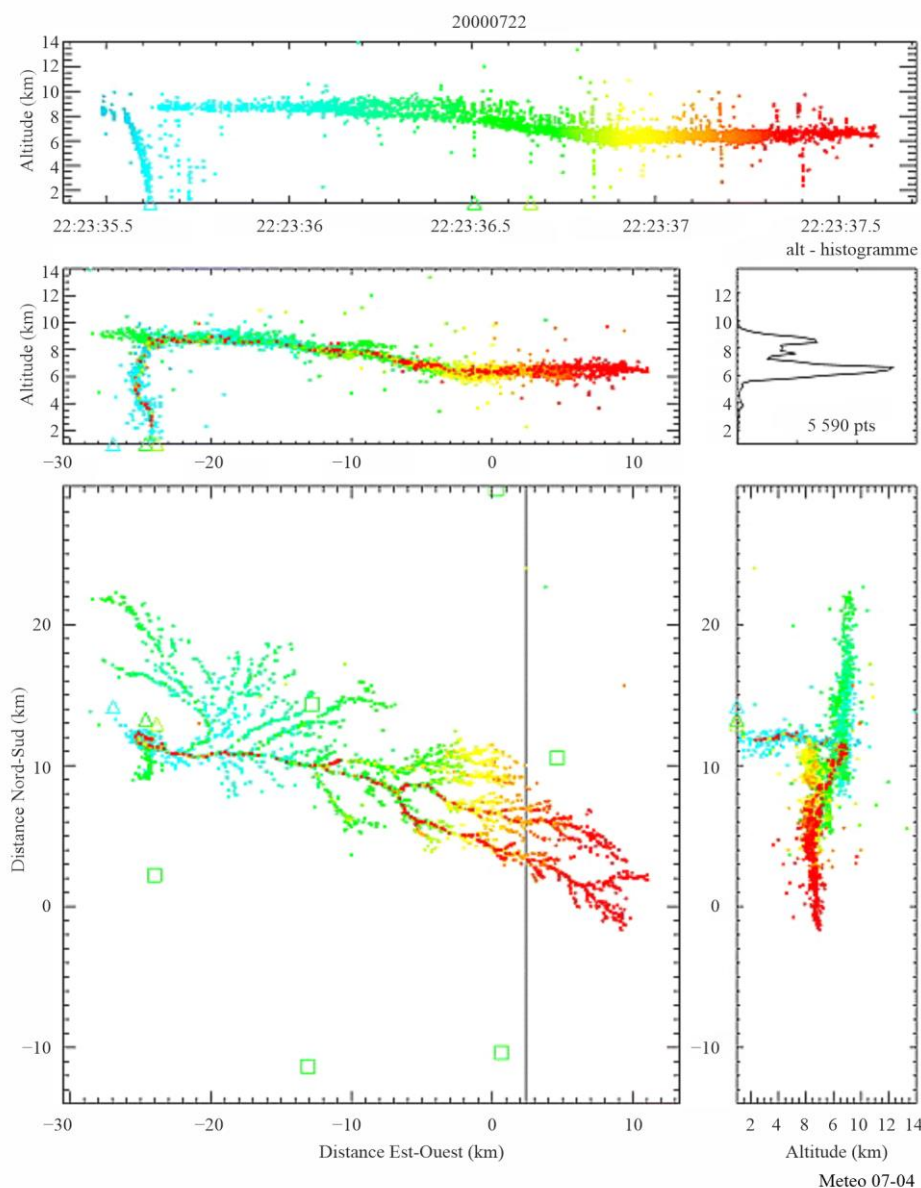
De plus, pour cartographier les canaux de foudre complets, il existe des systèmes de réseau de cartographie de la foudre (*lightning mapping array*, LMA) qui effectuent des observations à des fréquences beaucoup plus élevées (bande d'ondes métriques 60-66 MHz), par exemple le New Mexico Tech LMA (Thomas et al., 2004). On trouvera dans la Fig. 7-4 un exemple de décharge de foudre observée par le réseau LMA de New Mexico Tech qui illustre la résolution spatiale que le système est capable d'obtenir. L'éclair était une décharge nuage-sol de polarité négative qui s'est produite au-dessus de la partie nord du réseau et a été localisée avec précision par les mesures. La décharge s'est propagée sur une grande distance horizontale (40 km) à travers la tempête qui l'a précédée; dans le processus, les canaux de rupture ont développé une fine structure dendritique qui a été bien résolue par le système de cartographie. Plus de 5 000 sources ont été localisées pendant les 2 s du flash.

Pour une détection aussi détaillée, il faut que les orages demeurent dans la ligne de visée si l'on veut observer l'ensemble du phénomène. Les capteurs au sol doivent donc être disposés selon une courte configuration de base – c'est-à-dire à 30 km de distance et à environ 50 m du sol afin de satisfaire les critères d'horizon radar. Concrètement toutefois, certains systèmes opérationnels d'observation des éclairs nuage-nuage comprennent des capteurs au sol davantage espacés et se fient à des systèmes nuage-sol fonctionnant à des fréquences plus basses afin de remplir des détails des décharges aux niveaux plus bas.

Les différents diagrammes de la Fig. 7-4 montrent l'évolution de l'éclair dans les projections verticales suivantes: altitude-temps (en haut); vue du plan (en bas à gauche); Est-Ouest (au milieu à gauche); et Nord-Sud (en bas à droite). Le diagramme au milieu à droite est un histogramme des hauteurs de la source. Les triangles indiquent l'heure et l'emplacement d'impacts au sol négatifs en s'appuyant sur les données du réseau national de détection de la foudre (*National Lightning Detection Network*, NLDN). Les carrés figurant dans la vue du plan indiquent l'emplacement des stations de mesure et la ligne verticale désigne la frontière entre les États du Colorado et du Kansas.

FIGURE 7-4

Sources de rayonnement pour une décharge nuage-sol en polarité négative observée par le réseau LMA de New Mexico Tech qui illustre la résolution spatiale que le système LMA peut obtenir



7.7 Radiomètres à hyperfréquences au sol

Les sondages atmosphériques verticaux par télédétection passive par satellite sont décrits en détail au Chapitre 5 (§ 5.1). Les météorologistes qui établissent des prévisions locales détaillées ou les scientifiques qui étudient la couche limite planétaire ont besoin de sondages atmosphériques présentant une plus grande résolution verticale près du sol pouvant être assurée par des systèmes à satellites.

Une méthode consiste à avoir recours à la télédétection passive ascendante avec un radiomètre installé à la surface de la Terre. Ces radiomètres utilisent un choix de canaux pour mesurer la structure des températures dans les deux bandes de l'oxygène suivantes: 22 GHz – 32 GHz et 50 GHz – 58 GHz. Elles sont décrites dans le Rapport UIT-R RS.2489 et reflétées dans le Tableau 7-1 ci-dessous. D'autres observations au voisinage des 90 GHz et dans les limites inférieures de la bande d'absorption de la vapeur d'eau à 183 GHz contribuent également aux mesures de la vapeur d'eau et des nuages. L'ozone passif (en particulier à 142 GHz) bénéficie également d'un nombre important de radiomètres au sol.

Même si les canaux servant à la télédétection au sol de la température et de l'humidité se trouvent dans une région semblable à celle des bandes de fréquences de la télédétection passive par satellite, ils utilisent en général des bandes plus larges, en particulier des bandes en partage avec d'autres services. Dans certaines bandes de fréquences, notamment celles visées au numéro **5.340** du RR ou celles attribuées au service de radioastronomie, les radiomètres au sol bénéficient de la même protection que les systèmes de télédétection par satellite; toutefois, dans d'autres bandes, ils ne bénéficient pas d'une protection à l'échelle internationale.

TABLEAU 7-1

Bandes de fréquences utilisées par les radiomètres passifs au sol

Fréquence centrale du canal (GHz)	Fréquence centrale du canal (GHz)
22,24	
23,04	
23,84	Le numéro 5.340 du RR s'applique (23,6-24 GHz)
25,44	
26,24	
27,84	
31,4	Le numéro 5.340 du RR s'applique (31,3-31,5 GHz)
51,26	
52,28	
53,86	Le numéro 5.340 du RR s'applique (52,6-54,25 GHz)
54,94	Attribution à titre primaire au SETS (passive) (54,25-59,3 GHz)
56,66	
57,3	
58,0	

Les radiomètres au sol en service dans le monde sont encore relativement peu nombreux (quelques centaines), mais leur nombre devrait augmenter dans un avenir proche. On pourrait mettre au point une méthode pragmatique de partage lorsque l'on dispose des radiomètres de manière à éviter le brouillage provenant d'autres services.

7.8 Systèmes d'affaiblissement radioélectrique hyperfréquences

Diverses techniques sont actuellement à l'étude pour estimer les précipitations en utilisant l'affaiblissement des signaux provenant des liaisons hyperfréquences commerciales (CML) telles que les liaisons de raccordement des réseaux mobiles ou les transmissions de données par satellite. Bien que des approches légèrement différentes soient nécessaires dans le cas de réseaux mobiles au sol ou de liaisons par satellite, les deux techniques reposent sur des transmissions entre 5 GHz et 40 GHz. Contrairement aux mesures GNSS (décrites au § 7.5), les mesures CML reposent sur l'accès à des données de tiers avec une résolution temporelle et une rapidité suffisantes – ce qui peut s'avérer difficile lorsque les propriétaires des données ne s'intéressent pas nécessairement aux mesures environnementales.

Ces techniques mesurent les variations de l'intensité du signal causées par les précipitations sur le trajet de transmission. L'affaiblissement des signaux dans cette gamme est sensible à l'affaiblissement (k en dB/km) lié à l'intensité de pluie (R en mm/h) selon l'équation suivante:

$$k = aR^b$$

où a et b dépendent de la fréquence et de la polarisation de la transmission. La valeur de a augmente avec la fréquence. En d'autres termes, les fréquences élevées subissent un affaiblissement plus fort pour la même quantité de pluie. La valeur de b est proche de 1, en particulier au voisinage de 30 GHz, ce qui rend la relation linéaire, ou presque linéaire.

Les mesures reposent sur l'élimination d'autres sources de variation du signal telles que les réglages de transmission, le mouillage de l'antenne, la scintillation et l'aveuglement solaire – qui peuvent être d'une ampleur comparable à l'évanouissement dû à la pluie – afin de déterminer une base de référence précise à partir de laquelle quantifier l'évanouissement dû à la pluie le long du trajet de transmission. Les signaux peuvent également être affaiblis au point de disparaître complètement pendant les périodes de fortes précipitations – sans doute lorsque les mesures des précipitations sont les plus importantes.

La présence de nombreuses liaisons CML pourraient faire des données CML une autre source utile de mesures des précipitations au-dessus des zones terrestres. Ces données pourraient contribuer à combler le manque de données issues des pluviomètres et des réseaux de radars météorologiques, ce qui peut s'avérer particulièrement utile dans les pays dépourvus de réseaux de mesure des précipitations. Bien que les recherches se poursuivent, de nombreux services météorologiques nationaux n'ont pas encore adopté les mesures des liaisons CML dans la pratique.

Références

TEXTES DE L'OMM

- OMM-N° 8 – Guide des instruments et des méthodes d'observation Volume III – Systèmes d'observation: Guide des instruments et des méthodes d'observation <https://library.wmo.int/records/item/68661-guide-to-instruments-and-methods-of-observation?offset=3>.
- OMM-N° 1318 – Global Demonstration Campaign for Evaluating the Use of Uncrewed Aircraft Systems in Operational Meteorology: White Paper [2023], <https://library.wmo.int/records/item/66308-global-demonstration-campaign-for-evaluating-the-use-of-uncrewed-aircraft-systems-in-operational-meteorology-white-paper>.

TEXTES DE L'UIT-R

- Recommandation UIT-R M.1874-1 – *Caractéristiques techniques et opérationnelles des radars océanographiques fonctionnant dans des sous-bandes de la gamme des fréquences comprises entre 3 et 50 MHz*.
- Rapport UIT-R M.2321 – *Lignes directrices applicables à l'utilisation du spectre par les radars océanographiques dans la gamme des fréquences comprises entre 3 et 50 MHz*.
- Rapport UIT-R RS.2489 – *Caractéristiques techniques et opérationnelles des capteurs passifs au sol fonctionnant dans la gamme de fréquences 51-58 GHz*.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN, R. H, BURESS, D. W. et DONALDSON, R. J. [1981] *Attenuation Problems Associated with a 5 cm Radar*, Bulletin of the American Meteorological Society, 62, N° 6, juin 1981.
- ANTHES, R.A. [2011], *Exploring Earth's atmosphere with radio occultation data: contributions to weather, climate and space weather*, Atmos. Meas. Tech., 4(1077-1103), doi: <https://doi.org/10.5194/amt-4-1077-2011>.
- BÄRFUSS, K. B., SCHMITHÜSEN, H., et LAMPERT, A.: *Drone-based meteorological observations up to the tropopause – a concept study*, Atmos. Meas. Tech., 16, 3739–3765, <https://doi.org/10.5194/amt-16-3739-2023>, 2023.
- BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, National Bureau of Standards Monograph 92, US Government Printing Office, Washington DC, États-Unis d'Amérique.
- BEVIS, M., S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, R. A. ANTHES, et R. H. WARE [1992], *GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system*, J. Geophys. Res., 97(D14), 15787–15801, doi: <https://doi.org/10.1029/92JD01517>.

- BONAFONI, S., BIONDIB, R., BRENOTC, H., ANTHES, R. [2019], *Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review*, Atmospheric Research, 230(104624) doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104624>.
- BURROWS, C. R. et ATWOOD, S. S. [1949] *Radio Wave Propagation, Consolidated Summary Technical Report of the Committee on Propagation of the National Defense Research Committee*, Academic Press, New York, États-Unis d'Amérique.
- CHWALA C, KUNSTMANN H. [2019], *Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges*. WIREs Water. 6:e1337. <https://doi.org/10.1002/wat2.1337>.
- DOVIAK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, États-Unis d'Amérique.
- DOVIAK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations, 2nd Ed.* Academic Press, Inc., San Diego, États-Unis d'Amérique.
- DOVIAK, R. J., ZRNIC, D. et SIRMANS, D. [novembre 1979] *Doppler Weather Radar*. Proc. IEEE, Vol. 67, 11.
- DOVIAK, R. J., SIRMANS, D., ZRNIC, D., et WALKER, G. B. [1978] *Considerations for Pulse-Doppler Radar Observations of Severe Thunderstorms*, Journal of Applied Meteorology, 17 N° 2, février 1978, American Meteorological Society.
- FABRY, F. [2015] *Radar Meteorology – Principles and Practice*, Cambridge University Press, University Printing House, Cambridge, Royaume-Uni.
- GIANNETTI, F, et RUGGERO R. [2021]. *Opportunistic Rain Rate Estimation from Measurements of Satellite Downlink Attenuation: A Survey*, Sensors 21, N° 17: 5872. <https://doi.org/10.3390/s21175872>.
- GOSSARD, E. E. et STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, New York, États-Unis d'Amérique, 280 pages.
- HITSCHFELD, W. et BORDAN, J. [1954] *Errors Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths*, Journal of Meteorology, 11, février 1954, American Meteorological Society.
- HO, S.-P., ANTHES, R.A., AO, C.O., HEALY, S., HORANYI, A., HUNT, D., MANNUCCI, A.J., PEDATELLA, N., RANDEL, W.J., SIMMONS, A., STEINER, A., XIE, F., YUE, X., ZENG Z. [2019]. *The COSMIC-FORMOSAT-3 radio occultation mission after 12 years: accomplishments, remaining challenges, and potential impacts of COSMIC-2*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 100, p. 2019, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0290.1>
- JAKOWSKI, N., & HOQUE, M. M. [2019]. *Estimation of spatial gradients and temporal variations of the total electron content using ground-based GNSS measurements*, Space Weather, 17, 339–356. <https://doi.org/10.1029/2018SW002119>.
- LEE, A. C. L. [1986] *An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique*. Quarterly J. R. Meteorological Society.
- LEE, A.C.L. [1986b] *An operational system for the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 3(4), 630–642.
- LENNON, C. et MAIER, L. [1991] *Lightning mapping system*. Proc. of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, FL., United States of America. NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1, 89-10.
- MCLAUGHLIN, D. J., CHANDRASEKAR, V., DROEGEMEIER, K., FRASIER, S., KUROSE, J., JUNYENT, F., PHILIPS, B., CRUZ-POL, S. et COLOM, J. [January 2005] *Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS)*, American Meteor. Society.
- RHEINSTEIN, J. [1968] *Backscatter from Spheres: A Short Pulse View*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP16, N° 1, janvier 1968.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; MUNOZ-MARTIN, J.F.; MORRIS, M., [2023] *Latest Advances in the Global Navigation Satellite System—Reflectometry (GNSS-R) Field*, Remote Sens., 15, 2157. <https://doi.org/10.3390/rs15082157https://doi.org/10.3390/rs15082157>.
- SEEMALA, GOPI KRISHNA, [2023], Chapter 4 - *Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations*, Editor(s): Abhay Kumar Singh, Shani Tiwari, In Earth Observation, Atmospheric Remote Sensing, Elsevier, Pages 63-84, ISBN 9780323992626.

- RYZHKOV, A. et ZRNIC, D. [2005], *Radar Polarimetry at S, C, and X Bands Comparative Analysis and Operational Implications*, 32nd Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society.
- SIRMANS, D, *WSR-88D Antenna Polarization Change*, Titan Corporation, report to the WSR-88D Operational Support Facility, 15 janvier 1993, disponible auprès du WSR-88D Radar Operations Center.
- THOMAS, R. J., P. R. KREHBIEL, W. RISON, S. J. HUNYADY, W. P. WINN, T. HAMLIN, et J. HARLIN [2004], *Accuracy of the Lightning Mapping Array*, J. Geophys. Res., 109, D14207, doi: <https://doi.org/10.1029/2004JD004549>.
- TURK, F. J., et co-auteurs, [2024], *Advances in the Use of Global Navigation Satellite System Polarimetric Radio Occultation Measurements for NWP and Weather Applications*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 105, E905–E914, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0050.1>.
- YU.V. YASYUKEVICH, A.A. MYLNIKOVA, A.S. POLYAKOVA, [2015], *Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data*, Results in Physics, 5 (32-33), ISSN 2211-3797, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>.
- YUE, X., W. S. SCHREINER, N. PEDATELLA, R. A. ANTHES, A. J. MANNUCCI, P. R. STRAUS, et J.-Y. LIU (2014), *Space Weather Observations by GNSS Radio Occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2*, Space Weather, 12, 616–621, doi: <https://doi.org/10.1002/2014SW001133>.
- ZRNIC, D. S., KENNAN, T., CAREY, L. D et MAY, P. [2000] *Sensitivity Analysis of Polarimetric Variables at a 5-cm Wavelength in Rain*, Journal of Applied Meteorology, **39**, septembre 2000.

Annexe

Acronymes et abréviations

A.1 Acronymes et abréviations courants en météorologie

A		APT	Transmission automatique des images
A/D	Analogique-numérique		
AAAS	American Association for the Advancement of Science	ARGOS	Système de localisation et de collecte de données des satellites NOAA
AARS	Système de transmission automatique des observations d'aéronefs	ASC	Agence spatiale canadienne
AA VMM	Activités d'appui à la VMM	ASCII	Code normalisé américain pour l'échange d'information
ABSN	Réseau synoptique de base de l'Antarctique	ASE	Agence spatiale européenne
ACARS	Système embarqué de communication, d'adressage et de compte rendu	ASIC	Circuit intégré à application spécifique
ACMAD	Centre africain pour les applications de la météorologie au développement	ATMS	Sondeur hyperfréquence de haute technologie (NPOESS/NASA)
ADC	Convertisseur analogique-numérique	ATOVs	Sondeur vertical opérationnel perfectionné de TIROS
ADEOS	Satellite de pointe d'observation de la Terre (Japon)	ATSR	Radiomètre à balayage longitudinal
AFC	Contrôle de fréquence automatique	AVCS	Système de caméra Vidicon perfectionné
AGRHYMET	Centre régional de formation, de recherche et d'application en agrométéorologie et en hydrologie opérationnelle	AVHRR	Radiomètre perfectionné à très haute résolution
		AWIPS	Système avancé de traitement météorologique interactif
		B	
AIMSA	Association internationale de la météorologie et des sciences de l'atmosphère	BPS	bits par seconde
		BR	Bureau des radiocommunications de l'UIT
AIRS	Sondeur infrarouge avancé à haute résolution (NASA)	C	
AISH	Association internationale des sciences hydrologiques	C/N0	Rapport porteuse-densité de bruit
AM	Modulation d'amplitude	CAG	Commande automatique de gain
AMDAR	Retransmission des données météorologiques d'aéronefs	CCI	Commission de climatologie
AMI	American Meteorological Society	CCADC	Comité consultatif pour les applications et les données climatologiques
AMSR	Radiomètre perfectionné hyperfréquence à balayage	CCD	Dispositif à charge couplée
ANSI	American National Standards Institute	CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications, voir UIT-R
AOPC	Groupe d'experts des observations atmosphériques pour l'étude du climat	CCRS	Centre de télédétection canadien

C (suite)		COI	Commission océanographique intergouvernementale
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems	CONUS	Zone continentale des États-Unis d'Amérique
CDAS	Station de télécommande et d'acquisition des données	COP	Conférence des Parties
CEM	Compatibilité électromagnétique	COPUOS	Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique
CEPMET	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme	CORSSAC	Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee
CERES	Système d'étude du bilan radiatif de la Terre et des nuages	COSPAS	Système russe de recherche et sauvetage par satellite. Voir SARSAT
CGMS	Groupe de coordination pour les satellites météorologiques	CPCSA	Coordination du Programme climatologique et activités d'appui
CHy	Commission d'hydrologie (OMM)	CPR	Radiomètre pour la physique des nuages
CIEM	Conseil international pour l'exploration de la mer	CRC	Code de redondance cyclique
CIESIN	Consortium for International Earth Science Information Networks	CrMIS	Sondeur-imageur hyperfréquence à balayage transversal (NPOESS)
CIMO	Commission des instruments et des méthodes d'observation	CrIS	Sondeur infrarouge à balayage transversal (NPOESS)
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies	CRT	Tube cathodique
CIUS	Conseil international des unions scientifiques	CS&C	Commutation et commande des communications (partie TAD du système GMACS)
CLICOM	Application de l'informatique à la climatologie	CSA	Commission des sciences de l'atmosphère
CLINO	Normales climatologiques	CSB	Commission des systèmes de base
CLIPS	Services d'information et de prévision climatologiques	CSIS	Système centralisé d'information sur les tempêtes
CLIVAR	Etude de la variabilité et de la prévisibilité du climat	CSIRO	Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth
CMA	Administration météorologique de la Chine	CSM	Comité scientifique mixte
CMAé	Commission de météorologie aéronautique	CSMA/CD	Accès multiple par détection de porteuse et détection de collision
CMAg	Commission de météorologie agricole	CSOT	Comité sur les satellites d'observation de la Terre
CMD	Centre mondial de données	CST	Comité scientifique et technique
CMIS	Sondeur-imageur hyperfréquences à balayage conique (NPOESS)	CSTM	Comité scientifique et technique mixte
CMM	Centre météorologique mondial	CSTR	Council for Scientific and Technical Research
CMM	Commission de météorologie maritime	CTCS	Système TAD de télémétrie et de télécommande (partie TAD du système GIMTACS)
CMN	Centre météorologique national	CW	Onde entretenue
CMR	Conférence mondiale des radiocommunications	CZCS	Balayeuse couleur de zone côtière
CNES	Centre national d'études spatiales		
CNIE	Comision Nacional de Investigaciones Espaciales		
COADS	Ensemble de données détaillées océan-atmosphère		

D		EC/AGE	Groupe consultatif de l'échange de données et produits météorologiques et connexes relevant du Conseil exécutif
D/A	Numérique-analogique		
DAAC	Centre réparti d'archives actives		
DADS	Système de distribution et d'archivage des données	EDC	Centre de données EROS
DAPS	Système de traitement automatique de DCS	EDIMS	Système de gestion des données et de l'information sur l'environnement
dB	Décibel	EIRPSD	Densité spectrale de puissance isotrope rayonnée équivalente
DB	Diffusion directe	ELT	Emetteur de localisation d'urgence
DCB	Décimal codé binaire	ELV	Lanceur non récupérable
DCPLS	Système de collecte de données et de localisation de plates-formes	EMI	Brouillage électromagnétique
DCPI	Interrogation de plate-forme de collecte de données	ENSO	<i>El Niño</i> /Oscillation australe
DCPR	Réception de plate-forme de collecte de données	ENVISAT	Satellite d'observation de l'environnement
DCR	Radiomètre différentiel de corrélation	EOS	Satellite d'observation de la Terre
DCS	Système de collecte de données	EPOCS	Etudes climatologiques dans l'océan Pacifique équatorial
DEMUX	Démultiplexeur	EPS	Capteur de particules énergétiques
DIFACS	Fac-similé numérique	ERB	Bilan radiatif de la Terre
DIR	Infrarouge diurne	ERBE	Expérience sur le bilan radiatif de la Terre
DLI	Interface de liaison descendante (DM/PM)	ERL	Laboratoire de recherche énergétique
DLM	Contrôleur de liaison descendante	EROS	Satellite d'exploration des ressources terrestres
DLR	Agence spatiale allemande (Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt)	ERS	Satellite européen de télédétection
DMSP	Programme de satellites météorologiques de défense	E/S	Entrée/sortie
DOMSAT	Satellite de communications intérieures	ESD	Décharge électrostatique
DPT	Terminal à images numériques	ESMR	Radiomètre en hyperfréquences à balayage électrique
DR	Réception directe	ETA	Heure d'arrivée prévue
DRGS	Station terrienne de réception directe	ETM	Instrument amélioré de cartographie thématique
DSARS	Système d'archivage et de restitution des satellites DAMUS	ETM	Modèle d'essais techniques
DSB	Radiobalise de sondage direct	ETS	Satellite d'essais techniques
DSB	Diffusion directe des données de sondage	EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
DSN	Réseau de communications avec l'espace lointain		
DUS	Système d'utilisation des données	EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
E		EUV	Ultraviolet extrême
E&M	Exploitation et maintenance	F	
EBR	Enregistreur à faisceau d'électrons	FAX	Fac-similé
		FC	Fausse couleur
		FCC	Composition fausse couleur
		FCC	Federal Communications Commission

F (suite)

FFT	Transformation de Fourier rapide
FI	Fréquence intermédiaire
FIFO	Premier entré-premier sorti
FM	Modulation de fréquence
FOV	Champ
fps	Images par seconde
FRI	Fréquence de répétition des impulsions
FSK	Modulation par déplacement de fréquence
FSS	Logiciel d'établissement des plans de vol
FTM	Fonction de transfert de modulation

G

GAME	Expérience GEWEX sur la mousson d'Asie
GARP	Programme de recherches sur l'atmosphère globale
GARS	Système d'archivage et de restitution des satellites GOES
GCIP	Projet international d'échelle continentale (GEWEX)
GDTA	Groupe pour le développement de la télédétection aérospatiale
GEO	Orbite géostationnaire terrestre
GEWEX	Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau
GHz	Gigahertz
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIMGSP	Projet de système au sol GOES I-M
GIMTACS	Système de télémessure et de télécommande GOES I/M
GMACS	Système de surveillance et de contrôle GOES (remplacé par GIMTACS)
GMS	Satellite météorologique géostationnaire
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Systèmes mondiaux de navigation par satellite
GOES	Satellite géostationnaire d'exploitation pour l'étude de l'environnement
GOMS	Satellite météorologique d'exploitation géostationnaire
GOOS	Système mondial d'observation de l'océan

GOSSP

Groupe d'experts de la composante spatiale des systèmes mondiaux d'observation

GPCP

Projet mondial de climatologie des précipitations

GPS

Système mondial de radiopéage, Système de positionnement global

GPSOS

Capteur d'occultation GPS

GRC

Glenn Research Center, ancien Lewis Research Center (LeRC)

GRT

GOES temps réel (base de données)

GSFC

Centre des vols spatiaux Goddard

GSN

Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC

GSTDN

Ground Spaceflight Tracking and Data Network

G/T

Rapport gain d'antenne/température de bruit du système (dB/K)

GTOS

Système mondial d'observation de l'environnement terrestre

GUAN

Réseau de stations d'observation en altitude du SMOC

GVAR

Données GOES

H**HEPAD**

Détecteur de particules alpha et de protons à haute énergie

HiRID

Données d'imageur à haute résolution

HIRS

Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution (TIROS)

HR

Humidité relative

HRIS

Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution ou interféromètre de sondage à haute résolution

HRPT

Transmission des images à haute résolution

Hz

Hertz (remplace cycles par seconde)

I**IASI**

Interféromètre de sondage atmosphérique dans l'infrarouge

ICSAR

International Committee for Search and Rescue

IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFOV

Champ de vision instantanée

IFRB

Comité international d'enregistrement des fréquences (voir BR)

IGBP

Programme international géosphère-biosphère

I (suite)

IGF	Générateur d'images
IGFOV	Champ de vision géométrique instantanée
INDOEX	Expérience dans l'océan Indien
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciales
INSAT	Satellite de l'Inde
IODE	Échange international des données et de l'information océanographiques
IPD	Détecteur de présence FI (TAD)
IR	Infrarouge
IRIG	Inter-Range Instrumentation Group
IRIS	Spectromètre-interféromètre infrarouge
IRS	Satellite de télédétection de l'Inde
IRU	Système de référence inertielle
ISETAP	Intergovernmental Science Engineer-ing & Technology Advisory Panel
ISO	Organisation internationale de normalisation
ITOS	Satellite d'exploitation TIROS amélioré
ITPR	Radiomètre à infrarouge pour la mesure du profil de température

J

JDIMP	Groupe d'experts de la gestion des données et de l'information SMOC/GOOS/GTOS
JERS	Satellite japonais d'exploration des ressources terrestres
JMA	Service météorologique japonais
JPL	Laboratoire de recherche sur la propulsion

K

K	Kelvin
kbit	Kilobit
ko	Kilooctet
kbit/s	Kilobits par seconde
keV	Kiloélectronvolt
kHz	Kilohertz
KSC	Centre spatial Kennedy

L

LANDSAT	Satellite américain de télédétection de la Terre
---------	--

LANDSAT-TM	Instrument de cartographie thématique Landsat
LaRC	Langley Research Center
LEO	Orbite basse terrestre
LEOP	Phase de lancement et de début de fonctionnement en orbite
LeRC	Voir GRC
LGSOWG	LANDSAT Ground Station Operations Working Group
LHCP	Polarisation circulaire gauche
LIDAR	Détection et localisation par la lumière
LMT	Temps moyen local
LOS	Affaiblissement du signal
LPA	Amplificateur à faible puissance
lpi	lignes par pouce
lpm	lignes par minute
LRIT	Transmission des informations à faible débit
LRPT	Transmission des images à faible débit
LUT	Table de recherche
LWIR	Infrarouge de grande longueur d'onde
M	
mb	Millibar
Mbit/s	Mégabits par seconde
Mo/s	Mégaoctets par seconde
MCC	Centre de contrôle des missions
MCDW	Données climatiques mondiales pour le monde
MCG	Modèle de la circulation générale
MDHS	Système de gestion des données météorologiques
MDPB	Modulation par déplacement de phase bivalente
MDT	Multiplexage par division dans le temps
MDUS	Station moyenne d'utilisation des données
MEO	Orbite moyenne terrestre
MEPED	Détecteur de protons et d'électrons à énergie moyenne
MetAids	Auxiliaires de la météorologie
METEOSAT	Satellite météorologique géostationnaire européen
METOP	Satellite météorologique à orbite polaire européen

M (suite)		NESDIS	Service national d'information, de données et de satellites pour l'étude de l'environnement
MetSat	Satellite météorologique		
MeV	Mégaélectronvolt	NF	Facteur de bruit
MeV/n	Mégaélectronvolts par nucléon	NHC	National Hurricane Center
MHS	Sondeur hyperfréquence de l'humidité	NIR	Infrarouge nocture ou proche infrarouge
MHz	Mégahertz	NNODS	Système de données océaniques NOAA/NOSS
MIA	Modulation d'impulsion en amplitude	NOAA	Administration américaine pour les océans et l'atmosphère
MIC	Modulation par impulsions codées	NOS	Etude nationale des océans
MLS	Limboondeur hyperfréquences	NPOESS	Système national de satellites sur orbite polaire pour l'étude de l'environnement
MODEM	Modulateur/démodulateur		
MODIS	Spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (NASA)	NRCT	Conseil national de recherches thaïlandais
MOPITT	Mesure de la pollution dans la troposphère (NASA)	NROSS	Navy Remote Ocean Sensing System
MOS	Satellite d'observation de la mer (Japon)	NRSA	National Remote Sensing Agency
mrاد	Milliradian	NRZ	Sans retour au zéro
MRF	Multiplexage par répartition en fréquence	NRZ-L	Sans retour au niveau zéro
MSFC	Centre des vols spaciaux Marshall	NSI	Navigation et superposition d'images
MSI	Imagerie multispectrale	NSSFC	National Severe Storms Forecast Center
MSS	Radiomètre multispectral	NSSL	National Severe Storms Laboratory
MSU	Sondeur à hyperfréquences	nT	Nanotesla
MTBF	Temps moyen entre deux pannes	O	
MUX	Multiplexeur	OAD	Détermination d'attitude et d'orbite
MW	Volant d'inertie, onde moyenne ou mégawatt	OAR	Bureau de la recherche océanique et atmosphérique
N		OCTS	Scanner de la couleur et de la température de l'océan
N-S	Nord-sud	OMI	Ozonomètre
NASA	Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace	OMM	Organisation météorologique mondiale
NASCOM	Réseau de télécommunications de la NASA	OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS)
NASDA	Agence nationale de développement spatial	OOPC	Groupe sur les observations océaniques pour l'étude du climat
NCDC	Centre national de données climatologiques	OQPSK	Modulation par déplacement de phase à quatre états non équilibrée
ND	Nœud descendant	P	
NE-delta-N	Différence de luminance énergétique équivalente au bruit	p.-p.	Crête à crête
NE-delta-T	Différence de température équivalente au bruit	PA	Amplificateur de puissance
NERC	Conseil national de la recherche sur l'environnement	PCD	Plate-forme de collecte de données
		PCM	Programme climatologique mondial

P (suite)

PCV	Programme de coopération volontaire
PDL	Charge de données au processeur
PDR	Retransmission des données traitées (liaison radioélectrique GVAR)
PE	Equation primitive
PEP	Puissance de crête
PEP	Protection contre les erreurs polynomiales (NASA)
PFD	Puissance surfacique
PHI	Programme hydrologique international
PHO	Programme d'hydrologie opérationnelle
p.i.r.e.	Puissance isotrope rayonnée équivalente
Pixel	Élément d'image
PKM	Moteur de périgée
PLL	Boucle à verrouillage de phase
PM	Modulation de phase
PMASC	Programme mondial des applications et des services climatologiques
PMDC	Programme mondial des données climatologiques
PMDSC	Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat
PMRC	Programme mondial de recherche sur le climat
PMRPT	Programme mondial de recherche sur la prévision du temps
PN	Pseudo-bruit
PNT	Prévision numérique du temps
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
POES	Satellite à défilement pour l'étude de l'environnement
ppm	Parties par million
PROFS	Program for Regional Observing and Forecasting Service
PROMET	Groupe de travail de la fourniture des informations météorologiques requises par l'aviation civile
PSK	Modulation par déplacement de phase
PTT	Poursuite, télémessure et télécommande
PWM	Modulation d'impulsions en durée

Q

QC	Contrôle de la qualité
QPSK	Modulation par déplacement de phase à quatre états
R	
R	Rayleigh
RA	Altimètre radar
R/Y	Roulis-lacet
R&D	Recherche et développement
RSBR	Réseau synoptique de base régional
RCS	Système de commande par réaction
RF	Fréquence radioélectrique
RFI	Brouillage radioélectrique
RHCP	Polarisation circulaire droite
RLS	Radiobalise de localisation des sinistres
RMS	Moyenne quadratique
ROS	Rapport d'onde stationnaire
RP	Radar de précipitations
RRTDM	Réseau régional de transmission de données météorologiques
RS	Réseau spatial
RSS	Résultante quadratique
RSU	Groupe de la télédétection
RVB	Rouge/vert/bleu
RVL	Radar aéroporté à visée latérale
RW	Volant de réaction
RWA	Bloc volant de réaction
S	
s	Seconde
S/C	Véhicule spatial
S/DA	Sondeur/données auxiliaires
S/N0	Rapport signal-densité de bruit
S/N	Rapport signal-bruit
S-VAS	Sondeur atmosphérique/radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue
S-VISSR	Radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue
SAD	Système d'accès direct
SAD	Système d'acquisition des données
SABD	Système d'administration de base de données

S (suite)		SIT	Equipe de mise en œuvre stratégique du CSOT
SAGE	Expérience sur les aérosols et les composants gazeux mineurs de l'atmosphère	SIUPM	Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer
SAR	Radar à ouverture synthétique ou recherche et sauvetage	SMDSM	Système mondial de détresse et de sécurité en mer
SARSAT	Satellite de recherche et de sauvetage-poursuite assistée; voir COSPAS	SMISO	Système mondial intégré de services océaniques
SATCOM	Télécommunications par satellite	SMN	Service météorologique ou hydrométéorologique national
SBUV	Rayonnement ultraviolet solaire rétrodiffusé	SMN	Service météorologique national
SC/OMS	Sous-comité chargé des satellites météorologiques d'exploitation	SMO	Système mondial d'observation
SC/OES	Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement	SMOC	Système mondial d'observation du climat
SC/N0	Rapport sous-porteuse-densité de bruit	SMS	Service mobile par satellite
SCHOTI	Conférence permanente des directeurs des établissements de formation professionnelle relevant des Services météorologiques nationaux	SMT	Système mondial de télécommunications
SCIAMACHY	Spectromètre d'absorption d'imagerie à balayage pour cartographie atmosphérique	SNR	Rapport signal-bruit
SCO	Oscillateur de sous-porteuse	SOCC	Spacecraft Operations Control Center
SCSMEX	Expérience sur la mousson de la mer de Chine méridionale	SOES	Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement
SDUS	Station secondaire d'utilisation des données	SOLAS	Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer
SeaWiFS	Capteur à large champ d'observation de la mer	SPM	Capteur de protons solaires
SEM	Appareil d'étude du milieu spatial	SPOT	Satellite probatoire d'observation de la Terre
SET	Satellite d'exploration de la Terre	SQPSK	Modulation par déplacement de phase à quatre états alternée
SETS	Service d'exploration de la Terre par satellite	SPREP	Programme régional pour l'environnement du Pacifique Sud
SEU	Perturbation isolée	sr	Stéradian
SFS	Service fixe par satellite	SR	Radiomètre à balayage
SGBD	Système de gestion de base de données	SR-IR	Radiomètre à balayage-canal dans l'infrarouge
SGLS	Système de liaison espace-sol	SR-VIS	Radiomètre à balayage-canal dans le visible
SHN	Service hydrologique national	SRS	Station de réception au sol
SHOFM	Système hydrologique opérationnel à fins multiples	SSM/I	Sondeur-imageur en hyperfréquence spécialisé
SI	Sondeur-imageur	SSC	Surveillance du système climatique
SIG	Système d'information géographique	SST	Température de surface de la mer
SIR	Radar imageur de la navette	SSU	Sondeur stratosphérique
SIRS	Spectromètre satellitaire infrarouge	STA	Science and Technology Agency
		SST	Système spatial de transport
		SWH	Hauteur significative des vagues
		SWIR	Infrarouge à courte longueur d'onde

S (suite)

SXI	Imageur de rayons X solaires
SXT	Télescope de rayons X solaires (mission Solar-A)
T	
T/P	Topex/Poseidon
T/V	Vide thermique
T&C	Télémétrie et télécommande
TAD	Télécommande et acquisition des données
TAD	Traitement automatique des données
TADW	Station de télécommande et d'acquisition des données (îles Wallops)
TBUS	Code de 4 lettres pour message de données d'éphémérides
TDRS	Satellite de poursuite et d'acquisition de données
TDRSS	Système à satellites de poursuite et d'acquisition de données
TEB	Taux d'erreur sur les bits
TED	Détecteur d'énergie totale
TEMS	Système de surveillance des écosystèmes terrestres
TEMSI	Temps significatif
TES	Spectromètre d'étude des émissions de la troposphère
TIR	Infrarouge thermique
TIP	Processeur d'information de TIROS
TIROS	Satellite d'observation télévisuelle à infrarouge
TM	Instrument de cartographie thématique
TMG	Temps moyen de Greenwich
TMI	Imageur en hyperfréquence TRMM
TMR	Radiomètre hyperfréquence Topex
TO	Orbite de transfert
TOGA	Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe
TOPC	Groupe d'experts des observations terrestres pour l'étude du climat

TOMS	Spectromètre imageur d'ozone total
TOS	Système opérationnel de TIROS
TOVS	Sondeur vertical opérationnel de TIROS
tr/min	Tours par minute
TRMM	Mission pour la mesure des pluies tropicales
TRUCE	Expérience sur le climat urbain dans les régions tropicales
TV	Vide thermique ou télévision
TVM	Mode VAS transparent
U	
UCT	Unité centrale de traitement
UHF	Ondes décimétriques
UIT	Union internationale des télécommunications
UIT-R	Secteur des radiocommunications de l'UIT (remplace le CCIR)
μrad	Microradian
μs	Microseconde
UTC	Temps universel coordonné
UV	Ultraviolet
V	
VAG	Veille de l'atmosphère globale
VAS	Sondeur atmosphérique du VISSR
VDB	Base de données du VISSR
VDUC	Centre d'utilisation des données VAS
VHF	Ondes métriques
VIIRS	Radiomètre-imageur dans le visible et l'infrarouge (NPOESS)
VIP	Processeur d'images VAS
VIRGS	Système de carroyage et de superposition d'images du VISSR
VISSR	Radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge
VMM	Veille météorologique mondiale
VOS	Navire d'observation bénévole
VREC	Enregistreur de données de radiomètre à très haute résolution
VTPR	Radiomètre du profil vertical de température

W

WAFC	Centre mondial de prévisions de zone
WEFAX	Transmission de données météorologiques en fac-similé
WHYCOS	Système mondial d'observation du cycle hydrologique
WSFO	Weather Service Forecast Office
WSFO-Tap	Liaison de communications au sol du WSFO pour la retransmission des données GOES

X

XBT	Bathythermographe non récupérable
XRI	Imageur de rayons X
XRS	Capteur de rayons X (solaires)

Z

Z	Notation courante du temps universel ou du temps moyen de Greenwich
---	---

A.2 Autres acronymes et abréviations utilisés dans le présent Manuel

CML	liaisons hyperfréquences commerciales (<i>commercial microwave links</i>)
DFS	sélection dynamique des fréquences (<i>dynamic frequency selection</i>)
ERT	tomographie de résistivité électrique (<i>electrical resistivity tomography</i>)
ET-RFC	Équipe d'experts pour la coordination des fréquences radioélectriques (<i>expert team on radio frequency coordination</i>)
GCOS	Système mondial d'observation du climat (<i>global climate observing system</i>)
GRB	GOES ReBroadcast
HRIT	transmission d'informations à haut débit (<i>high-rate information transmission</i>)
IPS	scintillations interplanétaires (<i>interplanetary scintillations</i>)
JPSS	système commun à satellites en orbite polaire (<i>joint polar satellite system</i>)
LDS	système de détection des éclairs (<i>lightning detection systems</i>)
LMA	réseau de cartographie de la foudre (<i>lightning mapping array</i>)
non-OSG	orbite non géostationnaire
OSG	orbite géostationnaire
RASS	système de sondage acoustique radioélectrique (<i>radio acoustic sounding system</i>)
RLAN	réseau hertzien local (<i>radio local area network</i>)
SIO	Système d'information de l'OMM
SMMR	radiomètre en hyperfréquence à balayage multibande (<i>scanning multichannel microwave radiometer</i>)
SOHO	Système d'observation hydrologique de l'OMM
TWT	tubes à ondes progressives (<i>traveling wave tubes</i>)
UAS	systèmes d'aéronefs sans pilote (<i>uncrewed aircraft systems</i>)
UWB	ultra large bande (<i>ultra-wide band</i>)
VLF	ondes myriamétriques (<i>very low frequency</i>)
WIGOS	Système mondial intégré d'observation de l'OMM (<i>WMO Integrated Global Observing System</i>)
WIPPS	Système intégré de traitement et de prévision de l'OMM (<i>WMO Integrated Processing and Prediction System</i>)
WPR	radar profileur de vent (<i>wind profiler radar</i>)
Wx-UAS	systèmes d'aéronef sans pilote pour la détection météorologique (<i>Weather-sensing uncrewed aircraft systems</i>)

Union internationale des
télécommunications
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

ISBN 978-92-61-40682-0



9 789261 406820

Publié en Suisse
Genève, 2026

Crédits photographiques : Adobe Stock