



Manuel
Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie:
surveillance et prévisions concernant le climat,
le temps et l'eau
Edition de 2017





MANUEL

Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: surveillance et prévisions concernant le climat, le temps et l'eau

Edition de 2017

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

978-92-61-24872-7 (version papier)
978-92-61-24882-6 (version électronique)

OMM

OMM-N° 1197
978-92-63-21197-2 (version électronique)

© OMM-UIT 2017

L'UIT et l'OMM se réservent le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT et de l'OMM.

PRÉFACE

«Le changement climatique est une menace directe en soi et un multiplicateur de beaucoup d'autres menaces comme la pauvreté, les déplacements, les conflits.»

António Guterres, Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies

Le Congrès météorologique mondial de l'OMM (Genève, 2015), dans sa Résolution 29 (Cg-17):

considérant

(1) L'importance primordiale que les services de radiocommunication revêtent pour les activités météorologiques et environnementales connexes requises pour la détection et l'alerte rapide ainsi que pour la prévention des catastrophes naturelles ou technologiques (c'est-à-dire causées par l'homme) et l'atténuation de leurs effets, pour la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement, l'étude des changements climatiques et la recherche scientifique;

...

soulignant

que certaines bandes de fréquences radioélectriques constituent une ressource naturelle unique, du fait de leurs particularités et des émissions naturelles, permettant de procéder à une télédétection spatiale passive de l'atmosphère et de la surface terrestre, et qu'elles méritent à ce titre d'être attribuées comme il convient au service d'exploration de la Terre par satellite (passive) et d'être parfaitement protégées des interférences;

...

prie instamment tous les Membres

de n'épargner aucun effort pour assurer la disponibilité et la protection des bandes de fréquences radioélectriques requises;

...

demande instamment à l'Union internationale des télécommunications et à ses Etats 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;

...

La Conférence mondiale des radiocommunications de l'UIT (Genève, 2012), dans sa Résolution 673 (CMR-12):

considérant

...

b) que les données d'observation de la Terre sont également essentielles pour la surveillance et la prévision des changements climatiques, pour la prévision, la surveillance et la réduction du risque de catastrophe naturelle, pour mieux comprendre, modéliser et vérifier tous les aspects du changement climatique et pour guider les efforts législatifs connexes;

...

e) qu'un grand nombre d'observations sont effectuées dans le monde entier et qu'il faut en conséquence examiner les questions relatives au spectre des fréquences à l'échelle mondiale;

...

h) que les observations de la Terre sont effectuées dans l'intérêt de la communauté internationale dans son ensemble et que les données sont généralement mises à disposition gratuitement,

....

décide

1 de continuer de reconnaître que l'utilisation de fréquences pour les applications liées à l'observation de la Terre présente un intérêt social et économique considérable;

2 de prier instamment les administrations de tenir compte des besoins de fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre et, en particulier, de la protection des systèmes d'observation de la Terre fonctionnant dans les bandes de fréquences connexes;

3 d'encourager les administrations à tenir compte de l'importance de l'utilisation et de la disponibilité de fréquences pour les applications liées à l'observation de la Terre, avant de prendre des décisions susceptibles d'avoir des incidences négatives sur le fonctionnement de ces applications.

Entre 1970 et 2015, la Terre a connu plus de 12 000 catastrophes naturelles qui ont coûté la vie à plus de 3,5 millions de personnes et entraîné des pertes économiques estimées à plus de 2,7 trillions de dollars US. Quatre-vingt-dix pour cent de ces catastrophes naturelles, plus de 60% des victimes et 70% des pertes économiques ont été causées par des problèmes liés au temps, au climat et à l'eau, par exemple des sécheresses, des inondations, des tempêtes violentes et des cyclones tropicaux, ainsi que par des épidémies et des invasions d'insectes directement liées à des conditions météorologiques et hydrologiques. Ces phénomènes extrêmes s'intensifient en raison des changements climatiques et vont continuer à s'intensifier si on ne relève pas «le plus grand défi de notre époque» que représentent lesdits changements climatiques. En effet, il est scientifiquement prouvé que les changements climatiques constitueront une menace pour la croissance économique, la prospérité à long terme et le bien-être social dans pratiquement tous les pays, ainsi que pour la survie même des populations les plus vulnérables.

Les technologies et les infrastructures d'observation et de surveillance jouent un rôle essentiel pour comprendre et lutter contre les changements climatiques et leurs conséquences. Les applications radio, comme les instruments de télédétection fonctionnant à bord des satellites et à la surface de la Terre (par exemple les radars météorologiques), constituent à ce jour la principale source d'information sur l'atmosphère et la surface de la Terre. Ces informations servent à la surveillance, aux prévisions et aux alertes concernant le climat, le temps et l'eau. Elles sont utiles pour réduire le risque de catastrophes naturelles, pour encadrer les secours après une catastrophe et pour planifier des mesures préventives en vue de réduire les effets négatifs des changements climatiques ou tout du moins de s'y adapter.

Dans ce contexte, les domaines d'activité envisagés sont les suivants: observations en continu et surveillance à long terme de l'activité solaire, pour améliorer nos connaissances et notre compréhension de l'influence des rayonnements électromagnétiques du soleil sur l'environnement de la Terre, et notamment sur le climat; observations en continu pour détecter les changements dans l'atmosphère, les océans, la surface de la Terre et la cryosphère, et utilisation de ces informations pour modéliser les changements climatiques; et observations en continu des changements qui interviennent dans la couche d'ozone et leurs effets non seulement sur l'environnement, mais aussi sur la santé humaine. Il est admis que l'analyse et la compréhension de la dynamique des changements de la couverture terrestre sont indispensables pour pouvoir gérer de manière durable les ressources naturelles, protéger l'environnement, assurer la sécurité alimentaire et lutter contre les changements climatiques ainsi que dans le cadre des programmes humanitaires. Les systèmes de radiocommunication de Terre et par satellite contribuent à la surveillance des émissions de carbone, des changements de l'action des glaces dans les calottes et glaciers polaires et des variations de température.

Pendant plus de 140 ans, les organismes de télécommunication et les instituts météorologiques internationaux ont instauré une coopération et un partenariat fructueux, dans un premier temps dans le cadre de l'Union télégraphique internationale et de l'Organisation météorologique internationale à la fin des années 1800, instances qui allaient devenir respectivement l'Union internationale des télécommunications (UIT) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) dans les années 1950. Alors que l'OMM s'efforce en priorité de répondre aux besoins en matière d'informations sur l'environnement, et aux besoins correspondants en matière de spectre des fréquences radioélectriques pour des applications météorologiques, hydrologiques et climatologiques normalisées, l'UIT, qui assure la gestion du spectre radioélectrique sur le plan international, attribue les fréquences radioélectriques nécessaires pour permettre le fonctionnement exempt de brouillage des applications radioélectriques et des systèmes de radiocommunication (de Terre et par satellite) utilisés pour la surveillance et les prévisions du climat, les prévisions météorologiques ainsi que pour la détection des catastrophes et l'alerte avancée.

Les conférences mondiales des radiocommunications de l'UIT qui se sont succédé ont pris en considération les besoins de l'OMM, pour assurer la disponibilité et la protection des bandes de fréquences radioélectriques nécessaires pour les outils d'observation atmosphérique et autres outils d'observation de l'environnement tels que les radiosondes, les radars météorologiques, les radars profileurs de vent et les sondeurs infrarouges et hyperfréquences embarqués sur des satellites.

Cette nouvelle version du Manuel sur l'utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie: surveillance et prévisions concernant le climat, le temps et l'eau a été élaborée conjointement par des experts du Groupe de travail 7C de la Commission d'études 7 des radiocommunications (Services scientifiques) de l'UIT-R, sous la présidence de M. M. Dreis (EUMETSAT), et par les membres du Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques (SG-RFC) de la Commission des systèmes de base (CBS) de l'OMM, sous la présidence de M. Eric Allaix (France).

Ce Manuel donne des informations techniques et opérationnelles complètes sur les systèmes et applications actuels d'observation et sur l'utilisation des fréquences radioélectriques par les systèmes météorologiques: satellites météorologiques, radiosondes, radars météorologiques, radars profileurs de vent, instruments de télédétection spatiale, etc. Il s'adresse à tous les membres intéressés des communautés de la météorologie (temps, eau et climat) et des radiocommunications, y compris les institutions publiques et le secteur privé, et au grand public.



M. Petteri Taalas
Secrétaire général

Organisation météorologique mondiale



M. Houlin Zhao
Secrétaire général

Union internationale des télécommunications

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
AVANT-PROPOS.....	ix
INTRODUCTION.....	xi
CHAPITRE 1 – LA STRUCTURE DES SYSTÈMES METEOROLOGIQUES.....	1
CHAPITRE 2 – LE SERVICE DE METEOROLOGIE PAR SATELLITE (MetSat).....	9
CHAPITRE 3 – LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE	21
CHAPITRE 4 – LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES	37
CHAPITRE 5 – LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE PASSIVE ET ACTIVE POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES.....	75
CHAPITRE 6 – LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION UTILISÉS EN MÉTÉOROLOGIE	105
Annexe 1 – Acronymes et abréviations courants en météorologie.....	115

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 plusieurs Groupes de travail des radiocommunications (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. Comme la météorologie dépend également des radiocommunications pour la collecte des données nécessaires aux prévisions et pour le traitement et la diffusion des informations et des avis météorologiques au public, cette activité relève du GT 7B. Quant aux radars météorologiques et aux radars profileurs de vent, ils sont étudiés par le GT 5B, dans le cadre du service de radiolocalisation.

La météorologie tient une place importante dans notre vie de tous les jours et beaucoup de nos tâches et activités quotidiennes y sont liées. Les bulletins météo figurent aujourd'hui parmi les programmes les plus suivis à la télévision et à la radio. Si les prévisions météorologiques influencent nos choix vestimentaires et nos activités au quotidien, leurs implications sont également nombreuses en matière de sécurité publique; elles sont par exemple très importantes pour les transports publics. La précision des prévisions météorologiques est essentielle pour pouvoir fournir des services de haut niveau à la société, notamment pour assurer la protection des personnes et des biens dans un grand nombre de domaines comme les transports, en particulier aéronautiques. Et, en cette période de forts dérèglements climatiques et météorologiques, les prévisions météorologiques sont indispensables pour prévoir et détecter les catastrophes naturelles et en atténuer les conséquences.

La principale activité de la Commission d'études consiste à élaborer des Recommandations 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 fiables pour affiner la prévision du temps et du climat, mais aussi à un public plus large qui souhaite comprendre l'importance d'utiliser certaines fréquences spécifiques pour les besoins de la météorologie et les moyens de les protéger pour pouvoir poursuivre les prévisions météorologiques avec des garanties de fiabilité optimale.

Il a donc été décidé de rédiger et de publier ce Manuel, en collaboration avec le Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques (SG-RFC) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de façon que l'ensemble des utilisateurs des normes correspondantes puissent mieux comprendre les systèmes météorologiques en vue d'améliorer la conception et l'application de ces puissants outils. Le 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 le grand plaisir de présenter aux usagers des normes météorologiques et à l'ensemble des gestionnaires de fréquences ce Manuel qui deviendra, j'en suis certain, un ouvrage de référence important dans leur travail.

Ce projet n'aurait pu être mené à bien sans l'apport de nombreuses administrations qui participent aux travaux de la Commission d'études 7 et du SG-RFC. Les Rapporteurs pour les différentes parties du Manuel ont accompli un travail remarquable. Nous tenons à remercier plus particulièrement M. David Franc (Etats-Unis d'Amérique), M. Gilles Fournier (Canada), M. Eric Allaix (France), M. David Thomas (OMM), M. Philippe Tristant (EUMETNET) et M. Markus Dreis (EUMETSAT), qui ont dirigé le projet.

Toute notre reconnaissance va également à M. Vadim Nozdrin (Bureau des radiocommunications) qui a largement contribué à la parution de cet ouvrage.

John Zuzek
Président de la Commission d'études 7
des radiocommunications

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 le climat, les changements climatiques, le temps, la cryosphère, les précipitations, la pollution ou les catastrophes représente un enjeu prioritaire pour tous au quotidien. Ce sont les activités de surveillance qui fournissent ces informations, utiles pour les prévisions météorologiques quotidiennes, l'étude des changements climatiques, la protection de l'environnement, le développement économique (transports, énergie, agriculture, construction de bâtiments, urbanisme, déploiement d'infrastructures publiques, sécurité, etc.) et la sécurité des personnes et des biens. Les observations de la Terre sont également utilisées pour obtenir des données pertinentes concernant les ressources naturelles, d'une importance cruciale pour les pays en développement. Il faut bien avoir à l'esprit que ces informations découlent de mesures effectuées par des systèmes de radiocommunication ou qu'elles sont recueillies, fournies et distribuées par des systèmes de radiocommunication.

Les systèmes de radiocommunication sont essentiels pour surveiller le climat 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 de radiocommunication qui utilise le spectre radioélectrique pour son fonctionnement utilise une ressource limitée. Disposer de bandes de fréquences radioélectriques exemptes de brouillages préjudiciables est indispensable pour pouvoir mettre en place des systèmes d'observation de la Terre.

Les systèmes utilisés pour obtenir et distribuer ces informations doivent pouvoir accéder systématiquement à des fréquences radioélectriques de quelques kHz à plusieurs centaines de GHz. Ils utilisent quantité de technologies radioélectriques, comme les radiocommunications (par exemple pour les radiosondes ou les satellites), les radars météorologiques (radars de mesure des précipitations, radars profileurs de vent et capteurs actifs utilisés dans l'espace) et la détection spatiale, de surface ou radio (par exemple pour les systèmes de télédétection passive par satellite ou de détection des éclairs).

Il faut comprendre que ces applications des fréquences radioélectriques sont liées entre elles et qu'elles forment un système météorologique mondial. Aussi, il suffit qu'un des composants radio du système fasse défaut, au niveau de l'observation ou de la diffusion des données, pour que tout le système météorologique soit mis en péril.

Il faut aussi noter que les systèmes utilisant ces fréquences jouent un rôle primordial dans la détection, l'alerte et les prévisions pour ce qui est des catastrophes liées au temps, à l'eau et au climat. Comme ces catastrophes comptent pour plus de 90% des catastrophes naturelles, ces systèmes sont des composants essentiels des systèmes d'alerte avancée et d'atténuation des effets des catastrophes et de tous types de risques.

Or, le développement des nouvelles applications radio grand public à forte valeur ajoutée met toujours plus de pression sur les bandes de fréquences utilisées aux fins météorologiques. Le risque existe donc que les applications météorologiques 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 plusieurs variables géophysiques et doivent donc être étudiées ensemble pour pouvoir calculer plusieurs grandeurs différentes. Les fréquences radioélectriques nécessaires pour ce faire sont déterminées par la physique fondamentale et sont inaltérables. Des observations continues dans ces bandes sont également indispensables pour surveiller et analyser les changements climatiques.

Les météorologues utilisateurs du spectre doivent rester vigilants et s'intéresser de très près aux questions relatives au partage du spectre avec d'autres services de radiocommunication. Compte tenu de l'importance primordiale que les services de radiocommunication revêtent pour les activités météorologiques et environnementales connexes requises pour la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement, l'étude des changements climatiques et la recherche scientifique, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a demandé instamment, dans sa Résolution 29 (Cg-17), à l'Union internationale des télécommunications (UIT) et à ses Etats Membres:

- 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;
- 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.

A cet égard, les dernières Conférences mondiales des radiocommunications (CMR) ont pris un certain nombre de décisions importantes concernant la protection des activités météorologiques et environnementales connexes. En particulier, 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. Compte tenu de la demande croissante de spectre pour des services commerciaux, la CMR-19 et la CMR-23 seront très importantes dans l'optique de la protection du spectre utilisé pour la météorologie et du développement futur de systèmes d'observation modernes dans le monde entier.

Compte tenu de ce qui précède, 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 le Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques (SG-RFC) de l'OMM, à l'attention des personnes utilisant à titre professionnel les données des systèmes météorologiques basés sur les radiocommunications, des particuliers et des gouvernements desservis par ces systèmes et de la communauté des radiocommunications, y compris les régulateurs et le secteur des télécommunications sans fil.

Le présent Manuel donne une vue d'ensemble de l'utilisation des systèmes de radiocommunication pour suivre l'évolution des diverses manifestations des changements climatiques et leurs incidences ainsi que du recours aux TIC et aux radiocommunications comme solution pour contribuer à une réduction de la consommation d'énergie à l'échelle du globe.

Il présente les différents systèmes météorologiques et détaille leurs caractéristiques techniques et opérationnelles. On précise, dans chaque cas, les bandes de fréquences radioélectriques utilisées, les facteurs qui laissent craindre un brouillage préjudiciable par d'autres utilisateurs et les conséquences, pour la sécurité publique, de la détérioration ou de la perte de données météorologiques. Dans le souci d'exposer le plus clairement possible ce domaine complexe, le plan adopté est le suivant:

- 1) La structure des systèmes météorologiques.
- 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.
- 6) Les autres systèmes de radiocommunication utilisés en météorologie.

Afin de faciliter la lecture, une liste d'acronymes et d'abréviations ainsi qu'un renvoi vers un ensemble plus complet de définitions des termes de météorologie complètent le Manuel.

CHAPITRE 1

LA STRUCTURE DES SYSTÈMES METEOROLOGIQUES

	<i>Page</i>
1.1 Les systèmes de la Veille météorologique mondiale	2
1.1.1 Le Système mondial d'observation	3
1.1.1.1 Observations en surface	3
1.1.1.2 Observations en altitude.....	3
1.1.1.3 Observations radar	4
1.1.1.4 Observations en mer.....	4
1.1.1.5 Observations en vol.....	4
1.1.1.6 Observations satellitaires	4
1.2 Systèmes d'observation d'autres programmes de l'OMM.....	6
1.2.1 La Veille de l'atmosphère globale	6
1.2.2 Le Système mondial d'observation du climat.....	7
1.2.3 Le Programme d'hydrologie et de mise en valeur des ressources en eau.....	7
1.3 Le système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS)	7

1.1 Les systèmes de la Veille météorologique mondiale

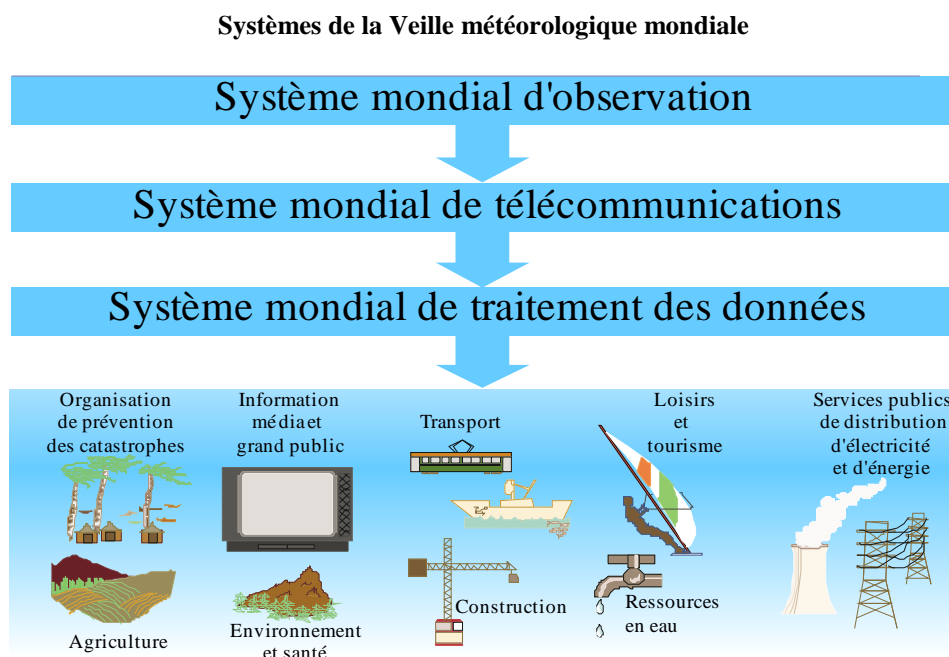
Pour établir des analyses, avis et prévisions sur le temps, la météorologie moderne s'appuie sur l'échange quasi instantané d'informations météorologiques à l'échelle de la planète. La Veille météorologique mondiale (VMM), programme central de l'OMM, allie des systèmes d'observation, des installations de télécommunication et des centres de traitement des données et de prévisions – utilisés par les 191 Etats Membres et territoires – pour mettre à disposition les informations météorologiques et les données géophysiques connexes nécessaires pour fournir des services efficaces dans tous les pays.

La Veille météorologique mondiale est coordonnée et supervisée par l'OMM, qui s'assure que tous les pays obtiennent bien les informations nécessaires pour pouvoir fournir chaque jour des services météorologiques (analyses, avis et prévisions) ainsi que pour leurs activités de recherche et de planification à long terme. Une part de plus en plus importante du Programme VMM vise à appuyer des programmes internationaux relatifs au climat mondial, notamment aux changements climatiques et à d'autres questions environnementales, et au développement durable.

La Veille météorologique mondiale (VMM) comprend trois principaux systèmes (voir la Fig. 1-1):

- Le **Système mondial d'observation (SMO)** fournit des données d'observation normalisées, de grande qualité, sur l'atmosphère et la surface des océans en provenance de l'espace extra-atmosphérique et de toutes les parties du globe. Le SMO est une composante importante du système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS), qui est décrit brièvement plus loin.
- Le **Système mondial de télécommunications (SMT)** assure l'échange en temps réel des données d'observations météorologiques, des produits traités et des informations connexes entre les Services météorologiques et hydrologiques nationaux. Le SMT est une composante importante du système d'information de l'OMM (SIO), qui utilise des réseaux de Terre et des réseaux à satellite dédiés, reposant sur des technologies radio et de diffusion vidéo. Le SIO utilise aussi largement l'Internet.
- Le **Système mondial de traitement des données et de prévisions (SMTDP)** fournit les produits météorologiques traités (analyses, avis et prévisions) issus du réseau constitué par les centres météorologiques mondiaux et les centres météorologiques régionaux spécialisés.

FIGURE 1-1



1.1.1 Le Système mondial d'observation

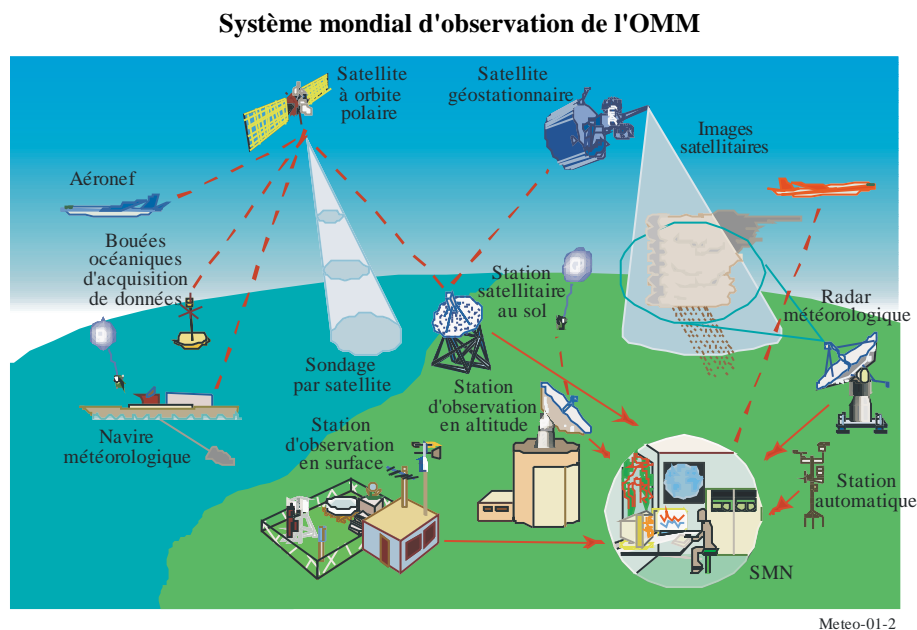
Première source d'informations techniques sur l'atmosphère du globe, le Système mondial d'observation (SMO) est un ensemble composite de méthodes, de techniques et d'installations complexes servant à mesurer les paramètres liés au temps et à l'environnement. Il permet à tous les pays d'obtenir les données nécessaires pour élaborer chaque jour des analyses, des prévisions et des avis météorologiques. Il est formé de stations d'observation situées sur la terre ferme, en mer, à bord d'aéronefs ou de satellites météorologiques (voir la Fig. 1-2).

Ses avantages les plus évidents sont la protection des personnes et des biens par la détection, la prévision et l'avis de phénomènes violents tels que les tempêtes locales, les tornades, les ouragans, les cyclones tropicaux et extratropicaux. Plus particulièrement, il fournit des données d'observation pour la météorologie agricole, la météorologie aéronautique et la climatologie, notamment pour l'étude du climat et des changements mondiaux. Le SMO appuie également divers programmes relatifs à l'environnement dans le monde entier.

Les prévisions météorologiques établies pour les jours, les semaines, voire les saisons à venir, sont très utiles pour un grand nombre de secteurs d'activité, par exemple l'agriculture, les transports, la construction, les services météorologiques destinés au public et le tourisme.

Pour plus d'informations sur le Système mondial d'observation, veuillez consulter: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>.

FIGURE 1-2



1.1.1.1 Observations en surface

Quelque 10 000 stations terrestres forment la charpente de ce système. Toutes les une à trois heures, elles mesurent à la surface ou près de la surface du globe divers paramètres météorologiques, dont la pression atmosphérique, la vitesse et la direction des vents, la température de l'air et l'humidité relative. Les données recueillies sont transmises dans le monde entier en temps réel. Un sous-ensemble des observations, réalisées dans le cadre du réseau d'observation en surface du Système mondial d'observation du climat (SMOC), sert aussi aux fins de la surveillance du climat.

1.1.1.2 Observations en altitude

A partir d'environ 900 stations d'observation en altitude tout autour de la planète, représentant près de 800 000 lancements par an, des radiosondes fixées à des ballons libres mesurent la pression, la vitesse des vents, la température et l'humidité jusqu'à 30 km d'altitude. Dans les zones océaniques, les sondages sont

effectués au moyen d'installations automatiques placées à bord de quelque 20 navires qui sillonnent surtout l'Atlantique Nord. Un sous-ensemble de stations d'observation en altitude, spécialement équipées pour surveiller le climat, composent le réseau d'observation en altitude du SMOC.

1.1.1.3 Observations radar

Les radars météorologiques et les radars profileurs de vent fournissent des données de grande résolution spatiale et temporelle, notamment dans les basses couches de l'atmosphère. Les premiers sont couramment employés dans les réseaux nationaux et, de plus en plus, régionaux afin surtout de prévoir les phénomènes violents à courte échéance. Ils sont très utiles pour estimer le volume des pluies et, lorsqu'ils sont équipés d'un Doppler, pour mesurer les vents. Pour leur part, les radars profileurs de vent sont très utiles pour effectuer des observations entre les sondages par ballon. Ils devraient apporter beaucoup au sein des futurs réseaux intégrés.

1.1.1.4 Observations en mer

Le SMO repose ici sur des navires, des bouées dérivantes ou ancrées et des plates-formes fixes. Environ 7 000 navires d'observation bénévoles recrutés par l'OMM recueillent les mêmes données que les stations terrestres plus, et c'est important, la température de surface de la mer et la hauteur et la période des vagues. Quelque 900 bouées dérivantes produisent chaque jour 12 000 messages d'observation de la température de la mer et de la pression de l'air en surface.

En outre, des Systèmes d'alerte aux tsunamis, détenus et exécutés par les Etats Membres, ont été établis sous l'égide du CIO de l'UNESCO, en coopération avec l'OMM, dans les océans Pacifique et Indien. De nouveaux sont prévus dans d'autres zones maritimes. Ils constituent un réseau de capteurs en temps réel en surface et en eaux profondes pour la détection et la surveillance des tsunamis et l'alerte avancée.

1.1.1.5 Observations en vol

Plus de 4000 aéronefs mesurent la pression, les vents et la température de l'air en vol. Le système de retransmission des données météorologiques d'aéronefs (AMDAR, *aircraft meteorological data relay*) permet d'obtenir des observations de grande qualité sur les vents et la température aux altitudes de croisière, ainsi qu'à certains paliers en montée et en descente. Le nombre de comptes rendus d'aéronefs, en forte augmentation ces dernières années, est estimé à 700 000 par jour, ce qui correspond à environ 90 000 profils de données AMDAR dans 550 aéroports du monde entier. Très utiles pour combler l'insuffisance ou l'absence de sondages dans certaines zones, ils contribuent largement à la composante observation en altitude du SMO.

1.1.1.6 Observations satellitaires

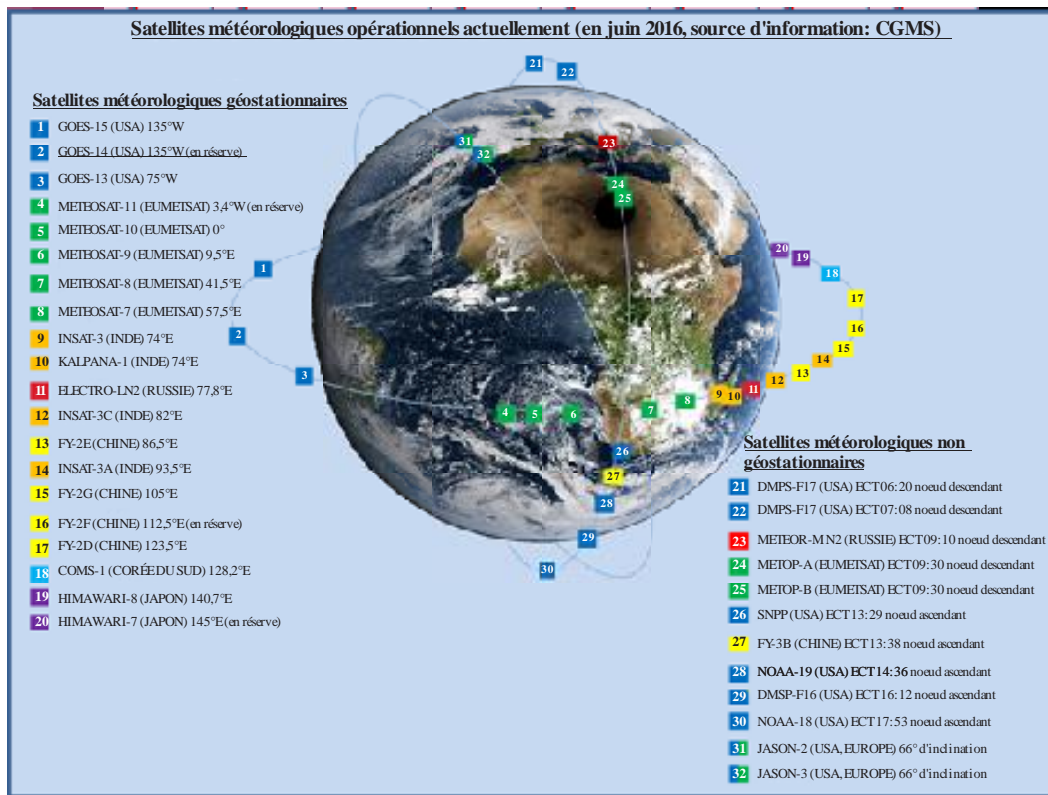
Le Système mondial d'observation des données météorologiques et environnementales à partir de l'espace comprend des constellations de satellites d'observation opérationnels géostationnaires et non géostationnaires (la plupart en orbite polaire et à faible altitude). La Figure 1-3 donne un aperçu des satellites météorologiques opérationnels actuellement (en juin 2016).

Les satellites géostationnaires et en orbite polaire sont en principe dotés d'imageurs dans le visible et l'infrarouge, ainsi que de sondes qui permettent de déduire une multitude de paramètres météorologiques. Plusieurs satellites en orbite polaire ont à leur bord des instruments pour le sondage à hyperfréquences capables de fournir les profils verticaux de la température et de l'humidité partout dans le monde. Les satellites géostationnaires peuvent servir à établir la vitesse des vents dans les tropiques en suivant les nuages et la vapeur d'eau. On perfectionne régulièrement les capteurs, les télécommunications et les techniques d'assimilation des données. La surveillance, les avis et la prévision du temps et du climat ont nettement bénéficié de cette multitude de données.

Grâce aux progrès de la modélisation numérique, notamment, on a pu élaborer des moyens toujours plus fins de déduire des informations sur la température et l'humidité directement des observations de la luminance énergétique par satellite. Les impressionnants progrès réalisés ces dernières années en matière d'analyses et de prévisions météorologiques et climatiques, notamment en terme d'alertes sur les phénomènes météorologiques dangereux (fortes pluies, tempêtes, cyclones) risquant d'affecter les populations et les économies, doivent beaucoup aux observations spatiales et à leur assimilation dans des modèles numériques.

FIGURE 1-3

Constellation des satellites météorologiques opérationnels actuellement du système mondial d'observation de l'OMM (en juin 2016)



Meteo-01-03

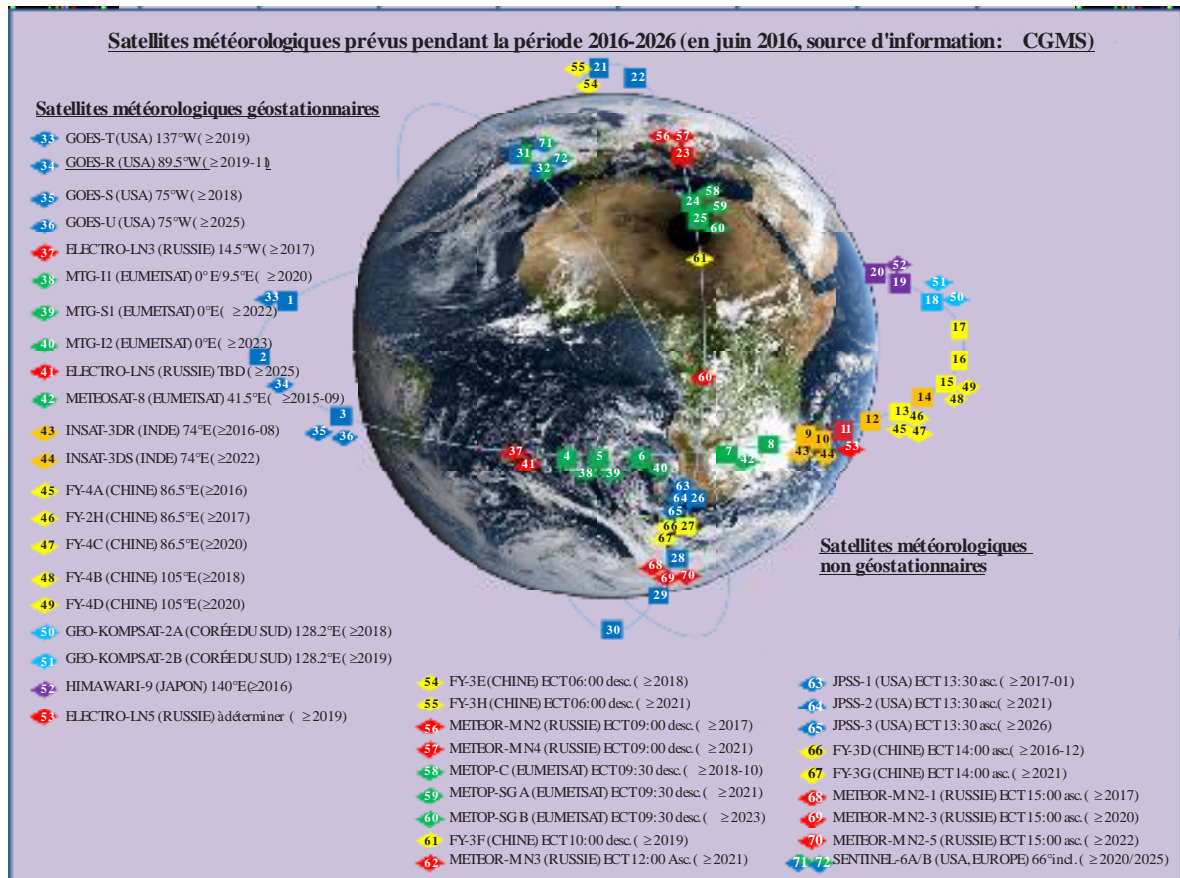
Une liste des satellites météorologiques opérationnels actuellement et de leurs paramètres est disponible sur: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>.

Pour assurer la continuité des observations météorologiques à partir de l'espace, les satellites opérationnels actuellement seront remplacés par de nouveaux satellites météorologiques de la génération actuelle ou par les premiers satellites météorologiques de la prochaine génération, qui, grâce à des capacités d'observation accrues et à une meilleure résolution des instruments, fourniront un volume de données nettement supérieur à tous les utilisateurs de données météorologiques.

La Figure 1-4 donne un aperçu des satellites météorologiques qu'il est prévu de lancer et de mettre en service pendant la période 2016-2026 et qui seront exploités parallèlement aux satellites opérationnels actuellement. Ces derniers seront abandonnés au fur et à mesure qu'ils arriveront en fin de vie.

FIGURE 1-4

Constellation des satellites météorologiques du système mondial d'observation de l'OMM qu'il est prévu de mettre en service pendant la période 2016-2026 (en juin 2016)



Meteo-01-04

En outre, plusieurs satellites de recherche et développement (R&D), comprenant une charge utile météorologique ou climatologique spécifique, contribuent aussi au SMO. Une liste des satellites existants de R&D et de leurs paramètres est disponible sur: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSresearch.html>.

Les satellites de recherche et développement composent la dernière constellation de la composante spatiale du SMO. Les missions R&D fournissent des données d'exploitation précieuses qu'utilisent également de nombreux programmes parrainés par l'OMM. Les instruments des missions R&D fournissent des données que les satellites météorologiques opérationnels ne permettent généralement pas d'obtenir ou qui guident les améliorations des actuels systèmes opérationnels.

1.2 Systèmes d'observation d'autres programmes de l'OMM

1.2.1 La Veille de l'atmosphère globale

La Veille de l'atmosphère globale (VAG) coordonne divers travaux de recherche et de surveillance de l'OMM sur le milieu atmosphérique, dont les activités du Réseau de stations de surveillance de la pollution atmosphérique de fond de l'OMM et du Système mondial d'observation de l'ozone de l'OMM. Plus de 20 observatoires et plus de 300 stations régionales en font partie. L'objectif premier de la VAG est de fournir, sur la composition chimique et les propriétés physiques de l'atmosphère, les informations nécessaires pour en comprendre le comportement et les interactions avec les océans et la biosphère. D'autres systèmes d'observation de la VAG sont spécialisés dans l'observation du rayonnement solaire, la détection des éclairs et les mesures marégraphiques. La VAG est la composante chimie atmosphérique du Système mondial d'observation du climat.

1.2.2 Le Système mondial d'observation du climat

Le Système mondial d'observation du climat (SMOC) fournit les nombreuses observations voulues pour surveiller le système climatique, déceler et imputer les changements, estimer les répercussions de la variabilité et de l'évolution du climat et enfin, appuyer les recherches visant à améliorer la compréhension, la modélisation et la prévision, en particulier des changements climatiques. Le SMOC étudie l'ensemble du système climatique dans ses aspects physiques, chimiques et biologiques ainsi que les processus atmosphériques, océaniques, hydrologiques, cryosphériques et terrestres.

1.2.3 Le Programme d'hydrologie et de mise en valeur des ressources en eau

Il assure la mesure des éléments hydrologiques fondamentaux par des réseaux de stations hydrologiques et météorologiques. Ces stations recueillent, traitent, archivent et utilisent les données, y compris celles concernant le volume et la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Le programme comprend le Système mondial d'observation du cycle hydrologique (WHYCOS) qui transmet des données hydrologiques et météorologiques en temps quasi réel en s'appuyant sur un réseau planétaire de stations de référence.

1.3 Le système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS)

Les Membres de l'OMM, lors de leur Congrès 2007, ont décidé de parfaire l'intégration des systèmes d'observations gérés et parrainés par l'OMM tels que le Système mondial d'observation de l'océan (SMOO), le Système mondial d'observation terrestre (SMOT) et le SMOC. Le concept d'un système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS) vise à rationaliser les efforts des fonctions opérationnelles et de gestion de tous les systèmes d'observation de l'OMM, ainsi qu'à instaurer un seul mécanisme pour l'ensemble des interactions avec les systèmes coparrainés par l'OMM. Une telle intégration se traduira par une meilleure efficacité et des économies. Voici quelques-uns des principaux objectifs de WIGOS:

- Améliorer l'interopérabilité entre les systèmes en portant une attention particulière aux composants spatiaux et in-situ des systèmes.
- Satisfaire les besoins des domaines atmosphériques, hydrologiques, océanographiques, cryosphériques et terrestres dans le périmètre d'exploitation d'un système intégré complet.
- Instaurer des cadres institutionnels plus généraux et améliorer les conditions de gestion et de gouvernance de l'OMM.

CHAPITRE 2

LE SERVICE DE METEOROLOGIE PAR SATELLITE (MetSat)*Page*

2.1	Le service de météorologie par satellite (MetSat) et ses fréquences.....	10
2.1.1	Les principes généraux des systèmes du service MetSat	11
2.2	Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites géostationnaires (OSG)	12
2.2.1	La transmission des données brutes de capteurs d'images par satellite MetSat OSG	12
2.2.2	La distribution des données MetSat OSG	13
2.2.3	Les plates-formes de collecte de données (PCD) MetSat OSG	15
2.3	Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites non OSG.....	16
2.3.1	La transmission des données brutes d'instruments MetSat non OSG	16
2.3.2	La distribution des données MetSat non OSG	17
2.3.3	Les systèmes de collecte de données (DCS) MetSat non OSG.....	18
2.4	Les autres systèmes de distribution de données	19

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)	8 175-8 215 MHz (MetSat, primaire)
1 670-1 710 MHz (MetSat, primaire)	28,5-30,0 GHz (SETS, secondaire) (Note 1)
2 200-2 290 MHz (SETS, primaire) (Note 1) (et sens espace-espace)	40,0-40,5 GHz (SETS, primaire) (Note 1)
7 450-7 550 MHz (MetSat, primaire, satellites géostationnaires uniquement)	

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

TABLEAU 2-1 (*fin*)

Attributions disponibles pour les transmissions de données du service MetSat	
Sens espace vers Terre	Sens Terre vers espace
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 25 500-27 000 MHz) 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'imageurs dans le visible 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.

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 et peuvent être reçues par n'importe quelle station d'utilisateur située en visibilité du satellite. On parle alors de «lecture directe».

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'aéronefs, sur des navires ou sur des bouées en mer, transmettent aux satellites météorologiques géostationnaires les données collectées, qui portent sur des paramètres tels que la température en surface, la vitesse des vents, l'intensité des pluies, la hauteur des courants, les gaz dans l'atmosphère et, pour les bouées en mer, les polluants océaniques. 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

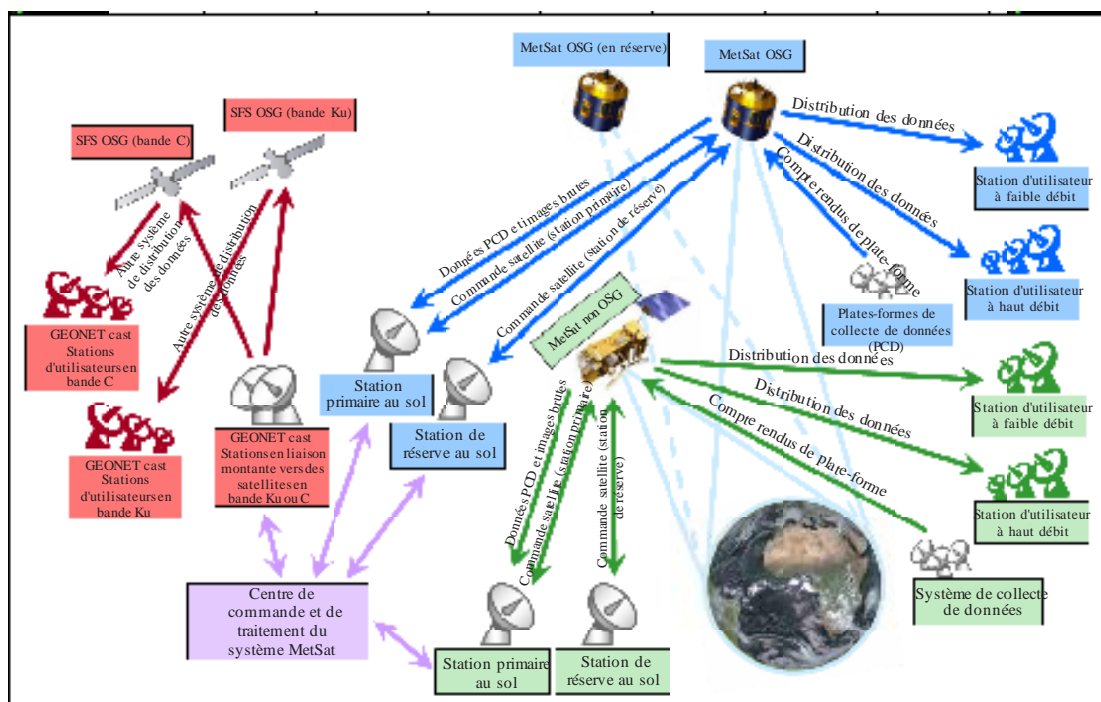
collecte de données (IDCS, *international data collection system*). En outre, certains canaux du système IDCS peuvent également être attribués à un système d'intervention d'urgence/de surveillance des catastrophes.

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)

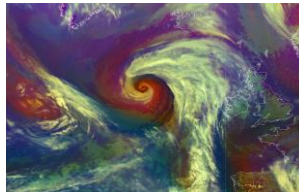
Le Système mondial d'observation (SMO) de la Veille météorologique mondiale (VMM) exploite plusieurs satellites météorologiques pour offrir la couverture complète d'observation de la Terre depuis l'orbite géostationnaire (voir la Fig. 1-3). Le lancement programmé de satellites météorologiques (voir la Fig. 1-4) 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

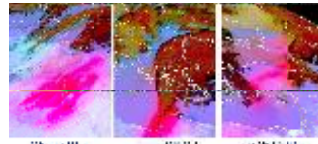
Les données captées par les imageurs dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge et autres instruments placés à bord des satellites météorologiques OSG sont envoyées, dans la bande 1 670-1 690 MHz, aux stations principales d'exploitation (appelées aussi stations de télécommande et d'acquisition des données (TAD)).

La Fig. 2-2 inclut des images types de données traitées provenant de l'imageur embarqué à bord d'un satellite météorologique OSG.

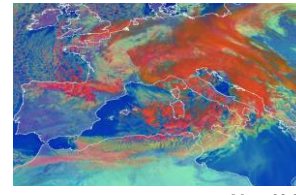
FIGURE 2-2

Image des données traitées d'un satellite météorologiques OSG

Tempête tropicale sur l'Atlantique Nord
(Meteosat-9 Airmass RGB, 19/05/08
12 : 00 UTC)



Grand nuage de poussière en provenance
d'Afrique du Nord et en direction de la Grèce,
de la Turquie, de la Russie et du Kazakhstan
(Meteosat-9, Dust RGB, 22/03/08 - 24/03/08)



Puissant mistral et cyclone Gene apportant
de fortes précipitations sur les Alpes du Sud
(Meteosat-8 RGB: VIS0.8, IR3.9r, IR10.8,
20/03/07 09 : 00 UTC)

Meteo-02-02

Les stations 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 donc au total environ 50 à 60 stations primaires au sol exploitées par les exploitants des satellites MetSat OSG. Munies d'antennes de 10 à 18 m de diamètre, elles fonctionnent généralement avec un angle d'élévation d'au moins 3 degrés. Le facteur de qualité se situe aux alentours de 23 dB/K. Les largeurs de bande les plus fréquentes sur les réseaux MetSat OSG de génération actuelle vont de 2 à 20 MHz, selon les caractéristiques de l'instrument et les méthodes de modulation employées.

Dans ce contexte, il est important de souligner au sujet des systèmes du service MetSat pour lesquels des assignations ont été notifiées après le 1er janvier 2004 que la bande 1 670-1 675 MHz ne sera pas protégée contre les brouillages préjudiciable causés par les applications du service mobile par satellite (SMS) et ne sera donc plus utilisable par les nouveaux systèmes du service MetSat.

En ce qui concerne les systèmes MetSat OSG de nouvelle génération, qui sont actuellement en cours de développement et qui devraient être déployés pendant la période 2016-2026 comme indiqué dans la Fig. 1-4, 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 800 Mbit/s). Il faudra donc utiliser des fréquences supérieures à la bande 1 670-1 698 MHz, 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), 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)).

2.2.2 La distribution des données MetSat OSG

Les § 2.2.2.1 à 2.2.2.6 suivants décrivent les fonctions de distribution directe des systèmes MetSat OSG utilisés dans le cadre du Système mondial d'observation (SMO) de la Veille météorologique mondiale (VMM).

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 Le service GVAR

Les satellites géostationnaires opérationnels d'étude de l'environnement GOES-13, GOES-14 et GOES-15 des Etats-Unis d'Amérique envoient des données traitées (service GVAR, *geostationary operational environmental satellites (GOES) variable*) à plusieurs centaines de stations situées à l'intérieur de l'empreinte, combinée, des engins situés à 75 °O et à 135 °O. 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'Etat 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. Les observations, transmises à 1 685,7 MHz avec une largeur de bande proche de 5 MHz, comprennent surtout des images et des données de sondage assorties d'informations sur l'étalonnage et la navigation, ainsi que des données de télémétrie, des messages sous forme de texte et des produits auxiliaires.

Avec l'arrivée des satellites GOES de nouvelle génération, à partir de GOES-R, le service existant GOES Variable (GVAR), avec un débit d'environ 2 Mbit/s, va être remplacé par le service GOES ReBroadcast (GRB), qui nécessite une plus grande largeur de bande pour pouvoir prendre en charge un débit beaucoup plus élevé, de l'ordre de 30 Mbit/s. Le service GVAR fonctionne actuellement à 1 685,7 MHz et nécessite une largeur de bande de 4,22 MHz, tandis que le service GRB aura besoin de 9,7 ou 10,9 MHz pour transmettre les données traitées et fonctionnera à 1 686,6 MHz.

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 à 1 691 MHz (586 kHz) sera combiné avec le service LRIT et le service EMWIN (*emergency managers weather information network*) fonctionnant actuellement 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. Le nouveau service combiné assurera des transmissions à 1 694,1 MHz et nécessitera 1,21 MHz de largeur de bande. La transmission en liaison descendante des données collectées par les capteurs ne se fera plus, comme c'est le cas actuellement, 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.

L'OMM a répertorié plusieurs milliers de stations de réception WEFAX dans le monde mais, comme pour les services GVAR et S-VISSR, on ne sait pas exactement combien de récepteurs sont réellement utilisés. Les stations WEFAX sont essentielles au bon fonctionnement des services météorologiques de petite et moyenne envergure; elles sont aussi utiles aux universités, aux organismes environnementaux, aux agences de presse, aux 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 1 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 COMS-1 (qui sera remplacé par le satellite GEO-KOMPSAT-2A), les satellites Himawari, les satellites Electro-L ainsi que sur les satellites de la série FY-2 à partir du satellite FY-2E/F/G, et les transmissions se poursuivront sur 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 COMS-1 (qui sera remplacé par le satellite GEO-KOMPSAT-2A) et les satellites Electro-L; il sera aussi assuré sur les futurs satellites de la série FY-4. En outre, les satellites de la série GOES à partir du satellite GOES-R assureront 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 de 4 m au plus et l'angle d'élévation est d'au moins 3 degrés. 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 plates-formes de collecte de données (PCD) 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 devraient croître rapidement dans un avenir proche. Les largeurs de bandes de canal utilisées sont de 0,7510 kHz pour un débit de 300 bit/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.

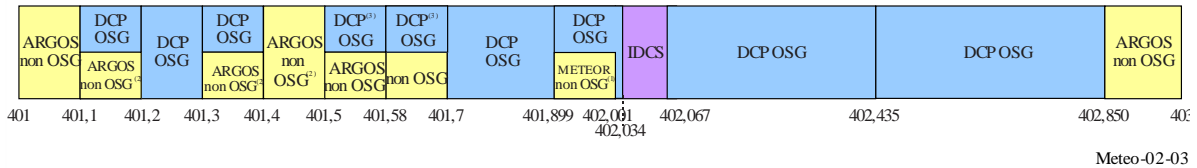
Pour les transmissions vers les satellites météorologiques géostationnaires, les PCD utilisent des fréquences situées entre 401,1 et 402,85 MHz, avec 402,001-402,067 MHz pour l'international (22 canaux de 3 kHz de largeur). L'emploi de bandes étroites (0,75 kHz dans certains cas) et la réduction des délais de transmission à environ 10 secondes permettent de recevoir des données en provenance d'un grand nombre de plates-formes. Concernant les satellites GOES-13, GOES-14 et GOES-15 par exemple, on comptait en 2016 environ 27 000 PCD à haut débit opérationnelles, qui ont envoyé jusqu'à 400 000 messages par jour et qui ont fourni chaque jour plus de 6 millions d'observations au SMO. Ces chiffres devraient continuer à augmenter.

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 de collecte de données (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



Meteo-02-03

2.3 Les systèmes du service MetSat utilisant des satellites non OSG

Outre les nombreux satellites MetSat OSG, le SMO exploite également des satellites MetSat non OSG pour collecter 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 les Fig. 1-3 et 1-4).

La Fig. 2-4 inclut des images de nuages, d'océans et de terres émergées prises par un radiomètre perfectionné à très haute résolution (AVHRR, *advanced very high resolution radiometer*) embarqué 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 prises par un radiomètre perfectionné à très haute résolution



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, 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 établies 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.

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)) 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 utiliseront la bande de fréquences 8 025-8 400 MHz (par exemple, FY-3, METEOR et Suomi-NPP).

2.3.2 La distribution des données MetSat non OSG

Les § 2.3.2.1 à 2.3.2.4 décrivent les fonctions de distribution directe des systèmes MetSat non OSG utilisés dans le cadre du Système mondial d'observation (SMO) de la Veille météorologique mondiale (VMM).

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 et les satellites de la série METEOR-M N2.

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 N2. Basé sur la transmission numérique, il emploie les mêmes fréquences que le service APT actuel. La largeur de bande peut atteindre 175 kHz.

2.3.2.1.3 Le service HRPT

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. Des centaines de stations HRPT dans le monde sont inscrites auprès de l'OMM. Ce chiffre n'est toutefois pas exhaustif, l'inscription de ces stations n'étant pas obligatoire. 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*), destinée à remplacer le service HRPT, est assurée sur certains satellites météorologiques opérationnels parmi les plus récents, à savoir les satellites des séries METEOR-M N2 (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.

Le Groupe de coordination des satellites météorologiques (CGMS) a publié courant 2014 une nouvelle spécification sur la radiodiffusion directe dans le monde (LEO Direct Readout (HRPT/AHRPT)). Dans cette spécification, qui s'applique aux systèmes LEO 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.

2.3.2.2 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 18,7 Mbit/s dans une largeur de bande de 45 MHz centrée à 7 775 MHz, ou à 45 Mbit/s dans une largeur de bande de 60 MHz centrée à 7 780 ou 7 820 MHz. De plus, les satellites FY-3 assurent un service de transmission d'images en différé (DPT), qui permet de transférer des données à 8 145,95 MHz avec une largeur de bande de 149 MHz à un débit de 93 Mbit/s ou à 8 175 MHz et 8 125 MHz avec une largeur de bande de 300 MHz à un débit de 225 Mbit/s. Le service de données à haute résolution (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 de radiodiffusion directe de données (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 de collecte de données (DCS) MetSat non OSG

Les DCS des satellites MetSat non OSG fournissent diverses informations utiles aux organismes d'Etat 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 de collecte de données embarqués à bord de satellites météorologiques non OSG. Le système Argos de troisième génération (Argos-3) est déjà opérationnel sur les satellites de la série Metop, le satellite NOAA-19 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. A 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.

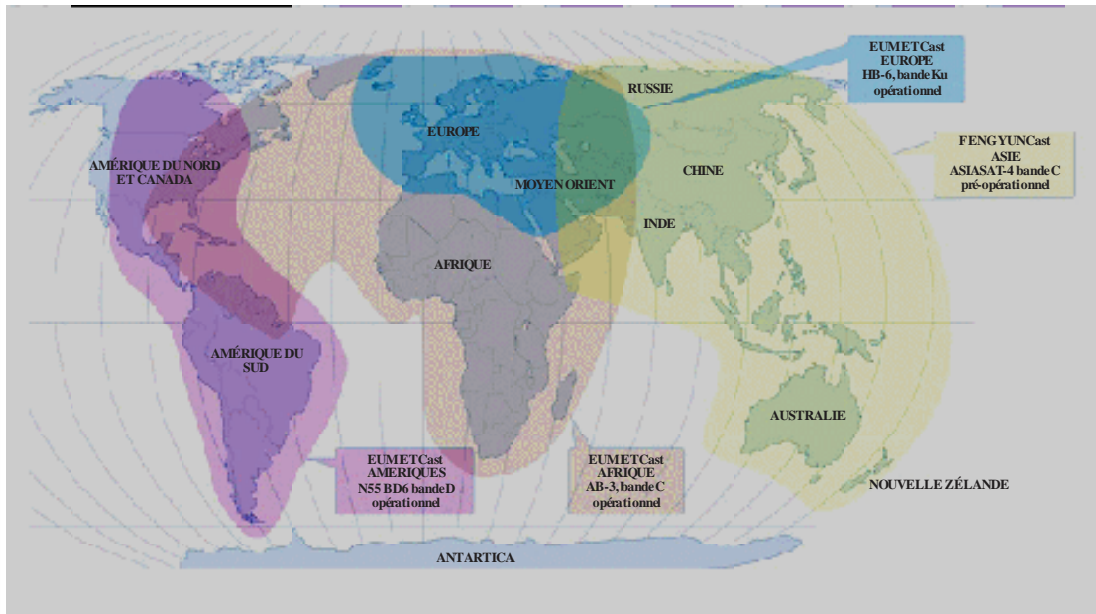
2.4 Les autres systèmes de distribution de données

En parallèle des mécanismes traditionnels de distribution de données embarqués à bord des systèmes MetSat OSG et non OSG va être 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*) visant à développer, sur la base de l'infrastructure de télécommunication commerciale existante, un système mondial de collecte et de distribution de données sur l'observation de la Terre, opérationnel de bout en bout. Il exploitera la fonctionnalité de multidiffusion d'un réseau mondial de satellites de communication pour transmettre les données des satellites d'observation de l'environnement, ainsi que des données et produits *in situ* des fournisseurs aux utilisateurs. 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), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et EUMETSAT, ainsi que de nombreux fournisseurs de données potentiels.

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

FIGURE 2-5

Couverture mondiale du système GEONETCast



CHAPITRE 3

LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE

	Page
3.1 Introduction.....	22
3.1.1 Les bandes de fréquences.....	22
3.1.2 Les applications en météorologie du service MetAids.....	23
3.2 Quelques systèmes de détection du service MetAids.....	25
3.2.1 Les radiosondes.....	25
3.2.2 Parasonde	26
3.2.3 Sonde-fusée.....	27
3.3 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids	28
3.3.1 Antenne-récepteur au sol.....	28
3.3.2 Installation de traitement au sol	29
3.3.3 Blocs de détection non récupérables	29
3.4 Caractéristiques des observations météorologiques fournies par le service MetAids.....	30
3.5 Les variations nationales dans l'exploitation du service MetAids.....	33
3.5.1 Technologie accessible	33
3.5.2 Vents en altitude.....	33
3.5.3 Densité des réseaux	34
3.5.4 Utilisation de la bande 401-406 MHz	34
3.5.5 Utilisation de la bande 1 668,4-1 700 MHz	34
3.5.6 Conservation des deux bandes de fréquences	35
3.6 Les tendances futures	35

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 au Chapitre 6 du présent manuel.

Concrètement, le service MetAids assure la liaison entre un système de détection *in situ* 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 ou d'une fusée météorologique. La station de base peut être fixe ou montée sur une plate-forme mobile, comme dans les opérations militaires. Elle peut aussi se trouver à bord d'un navire ou d'un aéronef de recherche ou de surveillance des ouragans. La grande majorité de ces systèmes de détection *in situ* sont des radiosondes, dont la plupart sont lancées régulièrement à partir d'emplacements fixes et d'un petit nombre de navires commerciaux, formant le réseau mondial en altitude du SMO de l'OMM, conformément à un calendrier mondial fixe (00, 06, 12 et 18 UTC) établi par l'OMM.

3.1.1 Les bandes de fréquences

Les bandes de fréquences attribuées au service MetAids (outre celles régies par les renvois nationaux) sont énumérées dans le Tableau 3-1¹.

TABLEAU 3-1
Bandes de fréquences attribuées aux systèmes/applications MetAids

Bandes de fréquences
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

D'autres services bénéficient également d'attributions à titre primaire dans ces bandes, ce qui est synonyme de contraintes importantes pour le 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.

L'OMM actualise régulièrement un catalogue des radiosondes utilisées dans son réseau (OMM, N° 9, Vol. A, désormais remplacé par le répertoire de métadonnées WIGOS OSCAR/Surface) afin que les météorologistes qui consultent les observations effectuées sachent quel type d'appareil est employé à chaque station. Ce catalogue renferme une liste des bandes de fréquences exploitées.

¹ Pour connaître les attributions de fréquences actuelles dans ces bandes, consultez l'Article 5 du RR.

Parmi les autres usagers du service MetAids figurent:

- les organismes environnementaux;
- les universités et les équipes de chercheurs en météorologie;
- les services de la défense.

Les systèmes correspondants sont en général exploités séparément des activités courantes menées par les services météorologiques nationaux. Ils n'apparaissent donc pas dans le catalogue de l'OMM. La plupart, montés sur des plates-formes mobiles, peuvent être déployés à des emplacements très variables pendant leur utilisation. Ces groupes indépendants utilisent à peu près autant de radiosondes que le réseau régulier de l'OMM. Leur fonctionnement est rarement réglementé par les autorités nationales de radiocommunication.

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 vendues dans le commerce 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 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 donnent les caractéristiques des systèmes météorologiques qui permettent de prévoir le temps à court terme. Elles alimentent aussi les modèles numériques qui servent à établir des prévisions à plus longue échéance. Elles sont également utilisées pour la surveillance du climat. Une bonne résolution verticale des mesures de la température et de l'humidité relative est nécessaire pour les prévisions à court terme. Ainsi, on doit connaître la position des nuages près de la surface avec une exactitude supérieure à 100 m dans le plan vertical.

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 de la détection passive. Le service MetAids transmet les 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. On mesure couramment la pression, la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction des vents, mais aussi parfois certains constituants de l'atmosphère tels l'ozone, les aérosols ou la radioactivité. Les informations produites par la station de base 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 car on récupère rarement les MetAids.

Le système MetAids le plus courant consiste en une radiosonde opérationnelle qui peut être élevée par un ballon météorologique jusqu'à 36 km de la surface, altitude à laquelle le ballon éclate. L'altitude à laquelle doivent être effectuées les observations régulières dépend en partie 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. Dans beaucoup de pays, les activités courantes visent une altitude de plus ou moins 25 km, même si quelques stations ont besoin de mesures au-delà de 30 km. Les prévisions à l'échelle du globe doivent tenir compte des flux de l'atmosphère dans les couches supérieures, mais la précision n'a pas à être aussi grande que près de la surface. Toutefois, la surveillance du climat à long terme et les travaux scientifiques connexes exigent des mesures à haute résolution dans les couches les plus hautes possible.

Les mesures de radiosondage sont transmises pendant deux heures maximum à la station de base établie au point de lancement. Le ballon se déplace au gré des vents présents dans la haute atmosphère. Il peut parcourir 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. La puissance de transmission est toujours faible à cause des piles. Ces dernières doivent résister aux très basses températures du vol mais ne doivent pas nuire à l'environnement ni menacer la sécurité lors de leur chute après l'éclatement du ballon.

On lance chaque jour plus de 1 400 radiosondes au sein du réseau rattaché au SMO de l'OMM, dont au moins 400 sont dédiées aux mesures sur les sites sélectionnés par le SMOC (système mondial d'observation du climat). Les données émises par chaque appareil servent immédiatement à établir les prévisions locales dans les services météorologiques nationaux. L'information est aussi utile à la prévision numérique du temps dans toutes les parties du globe, l'objectif étant de diffuser les messages (en code standard) vers tous les services météorologiques de la planète en moins de trois heures. On procède également à l'archivage afin que les observations puissent servir ultérieurement aux recherches scientifiques. Voici d'autres systèmes MetAids, actuellement déployés en moins grand nombre:

Type	Description
Parasonde	Appareil parachuté d'un aéronef à haute altitude, qui transmet généralement pendant une demi-heure des données à la station de réception située à bord de l'aéronef
Sonde captive	Appareil, attaché à un ballon captif, qui transmet en continu à partir de la couche limite de l'atmosphère le plus souvent
Sonde fusée	Appareil qui transmet des mesures atmosphériques jusqu'à 95 km d'altitude, en vue des recherches scientifiques, ou qui est lancé d'un navire pour les mesures à basse altitude
Petit aéronef téléguidé RPV (véhicule piloté à distance, <i>remotely piloted vehicle</i>) or UAV (véhicule aérien sans équipage, <i>unmanned aerial vehicle</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 des informations sous forme de message météorologique standard

En plus d'être utilisé pour le SMO et pour des activités de défense et de recherche, le service MetAids sert aussi pour des reconnaissances météorologiques afin d'atténuer les effets des catastrophes naturelles et industrielles.

Le coût actuel des radiosondages empêche de ramener l'écartement au sein du réseau opérationnel à moins de 250 km dans le plan horizontal. Ce chiffre, qui tient compte de la dérive des ballons, sert de norme quand on étudie le spectre radioélectrique nécessaire au service MetAids. Toutefois, il faudrait un écartement horizontal de 50 km ou moins pour obtenir, avec une résolution adéquate, les caractéristiques persistantes des systèmes météorologiques organisés. Il en va de même dans le cas des observations par radiosonde et parasonde destinées à la recherche scientifique. L'attribution future des fréquences devra faciliter ces opérations, tant pour l'exploitation que pour la recherche.

Le nombre de stations de radiosondage actives dans le réseau du SMO diminue quelque peu, ce qui est compensé par un emploi accru des radiosondes pour des activités touchant l'environnement et la défense. De plus, les services météorologiques nationaux ont besoin de plus de mesures *in situ* sur certaines zones océaniques. On peut s'attendre dans les dix prochaines années à une utilisation beaucoup plus large de nouveaux types de systèmes MetAids, à l'appui de ces besoins croissants.

3.2 Quelques systèmes de détection du service MetAids

3.2.1 Les radiosondes

Plus de 800 000 radiosondes sont emportées par des ballons chaque année dans le monde (Fig. 3-1 et 3-2). 400 000 lancements supplémentaires sont également effectués pour d'autres applications. Les stations de base sont généralement équipées de manière à pouvoir effectuer des lancements par tous les temps. Les sites cruciaux 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.

FIGURE 3-1

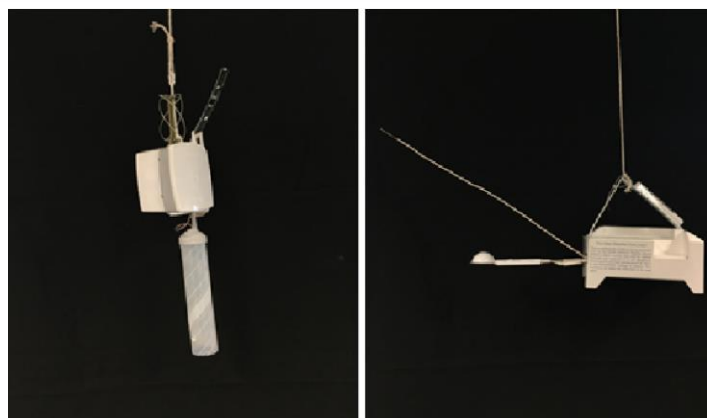
Lancement d'une radiosonde



Metco-03-1

FIGURE 3-2

Radiosondes



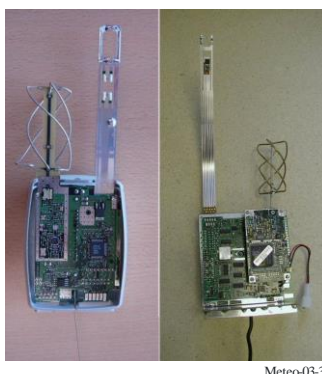
Metco-03-02

Une radiosonde classique 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) (Fig. 3-3). L'émetteur envoie les données à la station de réception. En règle générale, les radiosondes utilisent des piles au lithium ou des piles alcalines capables de résister à des températures de -90° C. Le bloc de détection contient les capteurs qui mesurent divers paramètres atmosphériques, par exemple la température, la pression, l'humidité et, dans certains cas, l'ozone ou le rayonnement ionisant. 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 NAVAID/GNSS ou, dans certaines zones côtières, des réémetteurs LORAN-C sur la charge utile et transmettent les données à la station au sol, ou des radiothéodolites.

FIGURE 3-3

Équipement électronique des radiosondes modernes



3.2.2 Parasonde

Les parasondes ont des composants semblables à ceux des radiosondes, mais elles ont une structure qui leur permet d'être parachutées d'un aéronef afin d'établir les profils de l'atmosphère pendant leur descente. Voir la Fig. 3-4. L'aéronef ne pouvant être muni d'une grande antenne de poursuite, toutes les parasondes fonctionnent dans la bande 401-406 MHz et mesurent les vents par les signaux NAVAID/GNSS. La densité spatiale et temporelle de leur déploiement en exploitation 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 jusqu'à seize 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-03-4

3.2.3 Sonde-fusée

Il s'agit d'un système MetAids plus spécialisé que les précédents, qui est largué depuis une fusée une fois que celle-ci a atteint une altitude élevée. Comme les parasondes, les sondes-fusées établissent les profils de l'atmosphère en descente, suspendues à un parachute. Elles peuvent renfermer les mêmes composants de base que les radiosondes, mais les blocs de détection destinés aux mesures à haute altitude sont souvent différents de ceux utilisés dans la basse atmosphère. Contrairement aux parasondes, elles peuvent mesurer les vents par radiogoniométrie ou par signaux NAVAID/GNSS. La majorité des sondes-fusées sont lancées à des altitudes très élevées, à l'appui d'opérations spatiales le plus souvent (voir la Fig. 3-5). Le déploiement étant coûteux, il est important d'utiliser des émetteurs de grande qualité.

FIGURE 3-5

Sonde-fusée

Meteo-03-5

3.3 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids

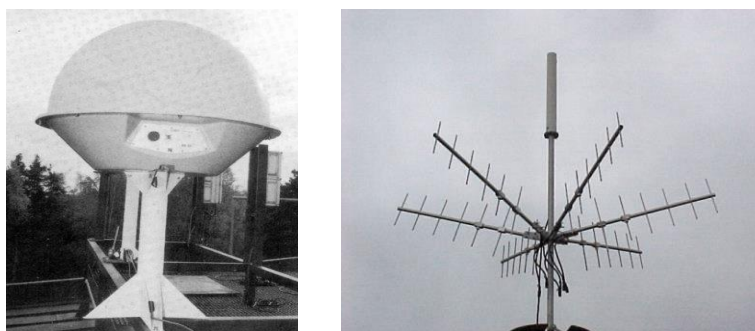
Les systèmes du service des auxiliaires de la météorologie comprennent plusieurs éléments de base dont, au sol, un ensemble antenne-récepteur et une installation de traitement des signaux. La Recommandation UIT-R RS.1165 – Caractéristiques techniques et critères de qualité de fonctionnement des radiosondes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

3.3.1 Antenne-récepteur au sol

Les radiosondes, les parasondes et les sondes-fusées utilisent une liaison radioélectrique pour transmettre les données vers l'ensemble antenne-récepteur situé à l'installation de traitement. On utilise surtout pour cela les bandes 400,15-406 MHz et 1 668,4-1 700 MHz. L'ensemble antenne-récepteur se trouve en général au sol pour les radiosondes et les sondes-fusées, 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 (voir la Fig. 3-6). 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 3-6

Antenne équidirective et système directif (401-406 MHz)



Meteo-03-6

La mesure des vents se fait généralement par radiogoniométrie ou au moyen 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 de détection des vents avec récepteur NAVAID/GNSS intégré – ce qui laisse la possibilité d'utiliser des radiosondes sans récepteur NAVAID/GNSS intégré. 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. 3-7). 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 3-7

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

Meteo-03 -07

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, y compris les vents. Certains appareils MetAids fournissent à la station de réception, non pas les valeurs météorologiques en tant que telles (pression, température, humidité, ozone, vents, etc.), 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 paramètres météorologiques. D'autres appareils MetAids effectuent la plus grande partie du traitement du signal et fournissent directement les valeurs météorologiques effectives et les vents. 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.

Le coût de production est souvent le premier élément considéré quand on envisage d'utiliser des émetteurs qui utilisent plus efficacement le spectre. Les radiosondes ne servent en principe qu'une fois, même s'il arrive de récupérer quelques appareils et de les remettre en état. Les circuits doivent être les plus simples possible de manière à minimiser les coûts. Les progrès technologiques ont dans une certaine mesure 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. 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 circuits sont conçus pour optimiser l'énergie puisqu'on ne peut utiliser de grosse pile, toujours dans le souci de limiter la densité et le poids.

En vol, les appareils MetAids peuvent être exposés à des conditions extrêmes: température allant de $+50^{\circ}$ 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 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. L'efficacité d'un point de vue spectral influe donc sur le coût de fabrication des émetteurs et sur le coût des composants connexes.

3.4 Caractéristiques des observations météorologiques fournies par le service MetAids

Nous verrons dans cette partie, par quelques exemples de mesures de radiosondage, quelles sont les caractéristiques que doivent présenter les observations provenant du service MetAids.

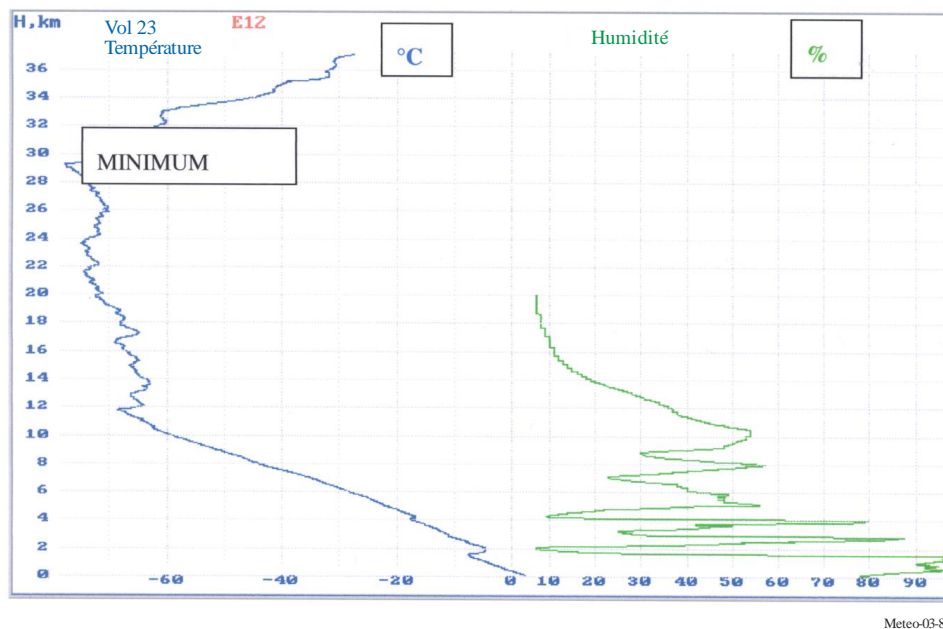
La Fig. 3-8 montre les mesures de la température et de l'humidité relative en fonction de l'altitude obtenues le 23 janvier 2000 à une station de surveillance du climat située à 60° N au Royaume-Uni (Lerwick, îles Shetland). Les valeurs de la température, qui comportent de faibles erreurs (moins de $0,5^{\circ}$ C jusqu'à 28 km), conviennent aux activités de surveillance du climat. Dans le cas présent, la température baisse assez régulièrement, de la surface jusqu'à 12 km environ. Ce niveau, appelé tropopause par les météorologistes, trace la limite entre l'air qui est en interaction avec la surface du globe et l'air stratosphérique qui interagit très peu avec les couches superficielles. On note, entre la surface et le haut de la tropopause, des couches plutôt minces dans lesquelles la température s'élève légèrement avec l'altitude ou diminue très lentement. L'humidité relative chute brusquement pendant la traversée de ces couches. La baisse est très marquée à 1,8 et 4 km, zones qui présentent une inversion de température selon la terminologie des prévisionnistes. De plus, le gradient vertical de température est moins accentué près de 8 km et de 10,3 km, phénomène là encore associé à une chute très nette de l'humidité. Le rythme d'évolution de la température et de l'humidité dans le plan vertical influe sur la propagation des ondes radioélectriques dans l'atmosphère. Les observations effectuées par le service MetAids peuvent donc servir à déceler des conditions particulières de propagation.

Les ballons qui emportent les radiosondes sont conçus pour offrir une performance optimale au cours de leur ascension à 300 m/min. Tout problème de réception en début de vol, ne serait-ce que pendant 10 s, 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, oblige souvent à lancer une deuxième radiosonde afin de satisfaire les exigences d'exploitation.

Les courbes de la Fig. 3-8 sont typiques en ce sens que les données de mesure de l'humidité relative vont de 5% à 90% entre la surface et le niveau auquel la température passe sous -40°C . Quand on atteint -60°C , à 10 km de hauteur, le capteur est trop lent pour pouvoir déterminer complètement les variations rapides de valeur. La performance des capteurs d'humidité relative est nettement meilleure depuis les années 1980. Les appareils plus anciens n'étaient plus fiables à partir de -30°C ou -40°C . Ces capteurs sont extrêmement difficiles à fabriquer. Ils exigent encore de lourds investissements à long terme dans la conception et les installations de production.

FIGURE 3-8

Mesure de la température et de l'humidité par radiosondage



Meteo-03-8

Les caractéristiques des capteurs ne permettent pas de mesurer l'humidité au-delà de 20 km d'altitude. Dans la Fig. 3-8, la température la plus basse est relevée à 29 km environ². La remontée rapide de la température au-delà de 29 km peut être attribuée au réchauffement important que produisent les mouvements de la haute atmosphère durant l'hiver dans l'hémisphère Nord.

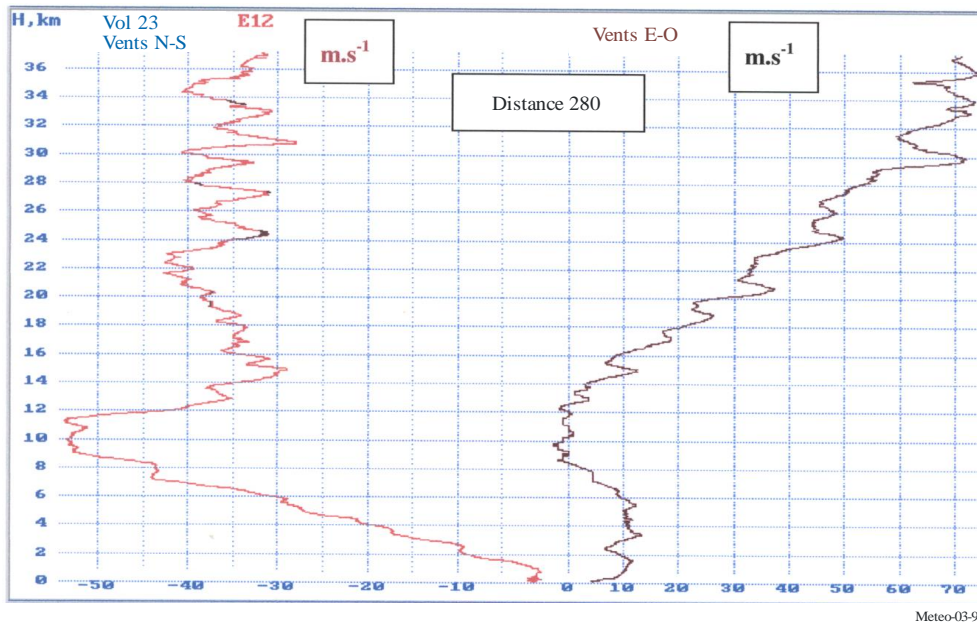
La Fig. 3-9 présente les mesures du vent déduites de la position de cette même radiosonde lancée de Lerwick, îles Shetland, le 23 janvier 2000. Le déplacement a été calculé au moyen des signaux de navigation Loran-C reçus par la radiosonde et retransmis vers la station de base. A faible distance, l'exactitude est d'environ $0,5\text{ ms}^{-1}$ pour chacune des deux composantes orthogonales; elle tombe à $1,5\text{ ms}^{-1}$ avec l'éloignement, lorsque la transmission vers la station de base n'est pas optimale. Les vents les plus forts dans la direction N-S ont été relevés entre 10 km et 12 km d'altitude, le courant-jet étant centré près de la discontinuité de température qui apparaît à 10 km dans la Fig. 3-8. La composante E-O est faible près du maximum du courant-jet, mais elle croît régulièrement de 14 km à 30 km. Ce renforcement des vents s'explique par un gradient de température

² On approche là des conditions propres à déclencher les mécanismes chimiques qui détruisent l'ozone durant l'hiver dans l'hémisphère Nord.

constant du sud au nord, à toutes les hauteurs entre 14 km et 30 km, l'air plus froid du nord étant plus proche du centre du tourbillon polaire. 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 telle que celle de la Fig. 3-9 avant de les transmettre aux unités concernées.

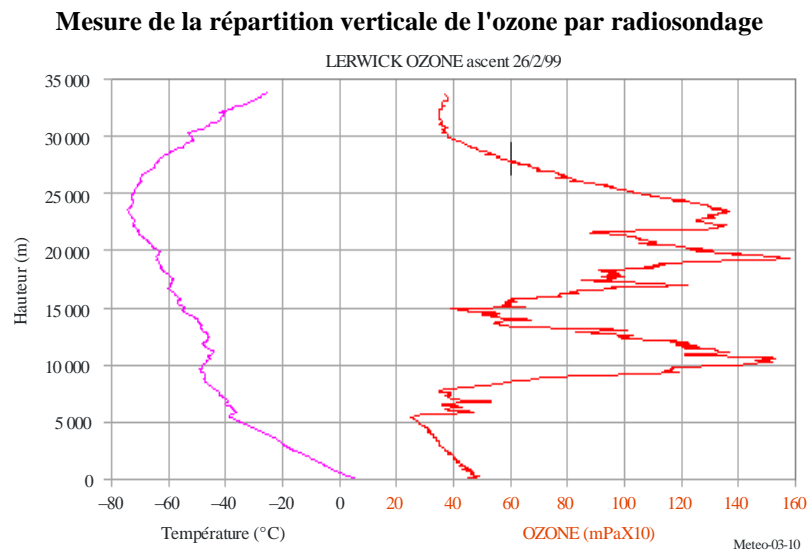
FIGURE 3-9

Mesure du vent par radiosondage



La composition verticale de la couche d'ozone, mesurée à la même station britannique que pour la Fig. 3-8, apparaît à la Fig. 3-10. On voit ici la pression partielle de l'ozone en fonction de la hauteur, accompagnée des mesures simultanées de la température. L'ozone est mesuré plusieurs fois par semaine à l'appui des recherches scientifiques courantes. Les valeurs sont immédiatement transmises à un centre de collecte des données qui coordonne les observations de nombreuses autres stations établies à des latitudes similaires. Des avis sont émis en cas de déperdition importante. Il y a normalement peu d'ozone dans la troposphère, c'est-à-dire à moins de 5 km ce jour-là. On note de fortes concentrations dans la stratosphère à 10 km et à 20 km mais pas à 15 km dans ce cas. Les chercheurs analysent ensuite les observations pour comprendre la baisse des teneurs d'ozone stratosphérique. Ce phénomène peut être dû au transport naturel d'ozone à partir de régions de faible concentration.

FIGURE 3-10



3.5 Les variations nationales dans l'exploitation du service MetAids

3.5.1 Technologie accessible

La plupart des systèmes de radiosondage proviennent d'un petit nombre de fournisseurs internationaux, mais la situation économique ou politique de certains pays oblige à fabriquer ces appareils sur place. Depuis une vingtaine d'années, l'amélioration des équipements nationaux ne s'est pas faite au même rythme que le perfectionnement des systèmes offerts sur le marché. Plusieurs installations reposent sur une technologie vieille de 30 à 40 ans, alors que la majorité des appareils commerciaux utilisés dans le monde intègrent les progrès de ces dix dernières années. Les observations qui en émanent sont très importantes pour l'ensemble du secteur de la météorologie, et l'on doit laisser à ces pays le temps de mettre en place des systèmes qui utilisent de manière plus efficace le spectre des fréquences radioélectriques.

3.5.2 Vents en altitude

On voit, à la Fig. 3-9, que le ballon a dérivé de 280 km par rapport à son point de lancement avant d'éclater. La radiosonde est ensuite descendue, suspendue à un parachute, pour atteindre le sol à une distance encore plus grande. Il est impératif d'utiliser des appareils capables de recevoir les signaux GNSS si l'on veut obtenir des mesures fiables des vents à de telles distances. La dérive est particulièrement forte dans cet exemple. En principe, aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, les courants présents en hiver à plus de 16 km d'altitude ne sont 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 toujours faibles au-dessus de nombreuses régions du globe. Ces écarts influent sur les conditions d'exploitation des réseaux nationaux. La radiosonde restera toujours à un angle d'élévation élevé et à une faible distance dans certains pays (par exemple dans les régions tropicales), tandis qu'ailleurs il faudra la 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 (élévation rarement inférieure à 15 degrés), il est possible de réduire le coût des mesures en utilisant des radiosondes meilleur marché qui n'ont pas à recevoir et à traiter les signaux NAVD/GNSS. On peut suivre les appareils avec une antenne directive à balayage, à partir de la station de base. L'antenne peut être beaucoup plus petite si l'appareil émet au voisinage de 1 680 MHz plutôt qu'aux fréquences proches de 403 MHz. Ces dernières conviennent particulièrement bien aux radiosondages à grande distance pour diverses raisons; elles assurent une bonne réception et une mesure exacte des vents tout au long de la montée.

Dans le cas des radars secondaires à 1 680 MHz, les radiosondes peuvent être très bon marché car elles n'ont besoin ni de récepteur NAVD/GNSS ni de capteur de pression; par conséquent, il s'agit de la solution tout indiquée pour certains pays.

Dans beaucoup de pays développés, les frais liés à la surveillance des radiosondages par un opérateur sont devenus trop lourds. On demande et on choisit de plus en plus des systèmes de lancement entièrement automatiques, supervisés à distance. Ces systèmes emploient toujours des radiosondes NAVD/GNSS qui fonctionnent dans la bande 400,15-406 MHz. Deux radiosondes au moins doivent être prêtes au lancement, réglées sur différentes fréquences. Comme dans les opérations manuelles, si le premier ballon éclate trop tôt, l'autre appareil peut continuer à émettre. De plus, une radiosonde lancée d'un emplacement proche pourrait déjà utiliser la fréquence nominale de la station. Le système automatique balaye donc la bande 400,15-406 MHz avant le lancement, pour s'assurer qu'aucun appareil à portée n'émet à la fréquence choisie. Il faut, dans un cas comme dans l'autre, pouvoir utiliser une deuxième fréquence afin d'obtenir les mesures opérationnelles.

3.5.3 Densité des réseaux

L'OMM a défini la densité minimale des réseaux MetAids requise aux niveaux régional et mondial et la revoit régulièrement. Le spectre nécessaire au service MetAids dépend de la densité du réseau dans chaque pays. L'estimation des besoins doit tenir compte de l'ensemble des usagers, dont les organismes de défense nationale et de protection de l'environnement. Plus la densité est grande, plus l'utilisation du spectre doit être efficace. Les pays qui exploitent des réseaux très denses ont en général les budgets voulus pour équiper les appareils d'émetteurs performants. Ils se trouvent souvent dans des régions du globe où les conditions atmosphériques varient le plus d'un jour à l'autre. Les pays dotés de réseaux de faible densité ont rarement les moyens de faire fonctionner beaucoup de stations.

3.5.4 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, entre 401 MHz et 403 MHz, 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).

D'autres pays où la densité des stations n'est pas extrêmement élevée peuvent avoir les moyens d'utiliser des émetteurs aptes à libérer une partie de la bande. C'est ce que l'administration australienne a décidé de faire, par exemple, au bénéfice d'autres services de radiocommunication. Ainsi, une plage du spectre peut être disponible dans certains pays même si, ailleurs, la bande entière est nécessaire pour le service MetAids. L'OMM a conclu que la totalité de la bande 400,15-406 MHz était nécessaire, dans un avenir proche, pour conduire les opérations du service MetAids et a convenu 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.

3.5.5 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. En effet, même si la bande est attribuée dans sa totalité au service MetAids, elle est aussi attribuée conjointement au service de météorologie par satellite à titre primaire. 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 MetSat établies au sol. L'utilisation de la bande 1 680 MHz varie mais, dans plusieurs régions du globe (Amérique du Nord, Europe et Asie), il ne reste parfois que la sous-bande 1 675-1 683 MHz pour les opérations MetAids. 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 7 MHz à 8 MHz de spectre, mais plusieurs autres ont encore besoin de 15 MHz ou plus.

3.5.6 Conservation des deux bandes de fréquences

La conservation des deux bandes de fréquences radioélectriques pour le service MetAids est jugée indispensable à la poursuite des activités. D'une part, ces bandes sont nécessaires pour répondre aux besoins spectraux des opérations MetAids dans certains pays d'Europe et d'Amérique du Nord, vu les dispositions actuelles de partage avec d'autres services. Il serait impossible de répondre aux besoins en matière d'analyse synoptique, de recherche et de défense avec une seule d'entre elles. De plus, les différents types d'opérations 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 optent pour la bande 1 668,4-1 700 MHz. Dans cette bande, la radiogoniométrie rend inutiles les circuits de radionavigation, ce qui abaisse le coût des appareils non récupérables. Enfin, certains pays exigent que leurs systèmes MetAids soient indépendants des systèmes internationaux NAVAIID/GNSS, qui ne sont pas toujours disponibles.

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. On l'a vu, les investissements portent surtout sur les qualités du capteur, plus rarement sur la liaison de télémesure du système. Toutefois, le besoin croissant de nouvelles fréquences dans certaines parties du globe, dans le but de mener des activités synoptiques et autres, a également donné lieu à une amélioration des caractéristiques d'utilisation du spectre radioélectrique.

L'utilisation du GNSS pour mesurer les vents avec des radiosondes a déjà conduit à une nette amélioration de l'efficacité spectrale des appareils NAVAIID/GNSS. Elle se traduit, dans la plupart des pays, par une exactitude beaucoup plus grande des mesures de l'altitude et des vents en altitude. 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 sont transmises. A l'heure actuelle, on n'a plus besoin de nombreuses applications pour transmettre des données GNSS "différentielles" afin de récupérer la qualité des données GNSS, ce qui réduit la quantité de données à transmettre.

CHAPITRE 4

LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES

		<i>Page</i>
4.1	Introduction.....	38
4.1.1	Les différents types de radars météorologiques	38
4.1.2	Equation radar	39
4.2	Les radars météorologiques.....	40
4.2.1	Applications	40
4.2.2	Réseaux de radars météorologiques.....	40
4.2.3	Aspects opérationnels de la réflectivité.....	42
4.2.4	Systèmes d'émission, stratégies de balayage et modes de fonctionnement des radars météorologiques.....	44
4.2.5	Les radars Doppler	49
4.2.6	Radars à double polarisation	49
4.2.7	Données de base produites par les radars météorologiques classiques	49
4.2.8	Diagramme de l'antenne et comportement dynamique de l'antenne	54
4.2.9	Besoins actuels et futurs de spectre.....	55
4.2.10	Risques de brouillage des radars météorologiques	58
4.2.11	Vulnérabilités des systèmes partageant leur bande avec d'autres radars météorologiques ...	66
4.2.12	Tendances futures	66
4.3	Les radars profileurs de vent.....	67
4.3.1	Applications	68
4.3.2	Aspects relatifs au fonctionnement et aux fréquences	70
4.3.3	Besoins actuels et futurs de spectre.....	71
4.3.4	Partage du spectre	71

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 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 la vitesse du vent. 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 informent 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.

Ce chapitre présente les types de radars au sol couramment employés 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 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
2 700-2 900	Bande S
5 250-5 725 (principalement 5 600-5 650 MHz)	Bande C
9 300-9 500	Bande X

Le radar profileur de vent est le deuxième type de radar météorologique. Il fournit 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).

Une troisième 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 quatrième type de radar est utilisé en météorologie, il s'agit du radar profileur de nuage. Fonctionnant généralement au voisinage de 35 GHz et de 94 GHz en raison de l'affaiblissement atmosphérique relativement faible, 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 émettent 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 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. Il est possible de pallier les difficultés de réception des signaux de faible intensité par différents moyens: puissances d'émission plus élevées, grandes antennes à gain élevé, récepteurs très sensibles, longs temps d'intégration des signaux, etc. Un spectre relativement «silencieux» (absence de brouillage et de bruit électronique d'origine anthropique) est également essentiel.

4.1.2 Equation radar

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:

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot c \cdot \tau \cdot |K|^2 \cdot L \cdot Z}{2^{10} \cdot \lambda^2 \cdot R^2 \cdot \ln 2} \tag{4-1}$$

où:

- $\overline{P_r}$: puissance moyenne reçue en retour (W)
- P_t : puissance de sortie de l'émetteur (W)
- G : gain d'antenne (sans dimension)
- K : indice de réfraction complexe (sans dimension)
- λ : longueur d'onde radar (m)
- c : vitesse de la lumière (m/s)
- θ : ouverture de faisceau (rad) d'antenne à mi-puissance (3 dB)
- τ : largeur de l'impulsion
- η : réflectivité
- r : distance de la cible
- L : facteurs d'affaiblissement liés à la propagation et à la détection du récepteur (dB)
- Z : réflectivité effective du radar (m³).

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.

$$\overline{P_r} = \underbrace{\frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln 2}}_{\text{Constantes}} \cdot \underbrace{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot L}{\lambda^2}}_{\text{Facteurs radar}} \cdot \underbrace{|K|^2 \frac{Z}{R^2}}_{\text{Facteurs de cible}} \tag{4-2}$$

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]:

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

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.

Il convient de souligner que l'équation radar correspondant aux radars poursuivant des cibles discrètes indique un signal reçu proportionnel à $1/r^4$ (où r correspond à la distance). La situation est différente pour les radars météorologiques puisque les cibles, comme les précipitations, occupent souvent tout le faisceau radar. 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 Applications

Les météorologistes utilisent des radars météorologiques pour détecter, localiser et mesurer le volume des précipitations contenues dans les nuages ou s'en échappant et 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, permettant ainsi la mesure de la rotation des événements météorologiques. Ces mesures permettent de détecter les phénomènes extrêmes, comme les tornades et crues éclair, et d'aviser les autorités suffisamment tôt. Les radars météorologiques servent surtout à détecter les précipitations solides et liquides et à mesurer leur intensité et la composante vitesse radiale³.

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).

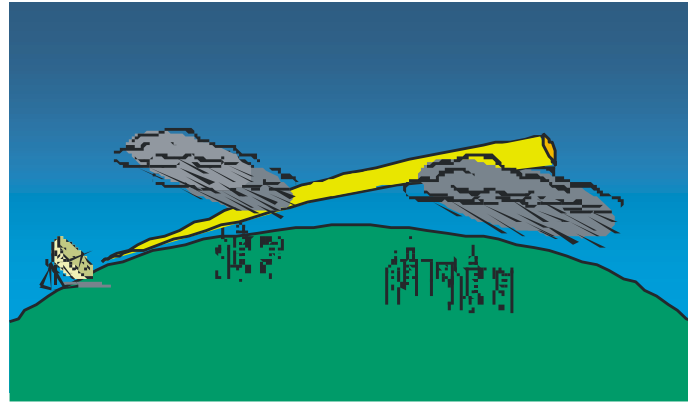
Ce phénomène réduit par conséquent le pourcentage de l'événement météorologique illuminé par le faisceau.

³ 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.

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

Description synthétique de l'accroissement du faisceau du radar proportionnel à la distance

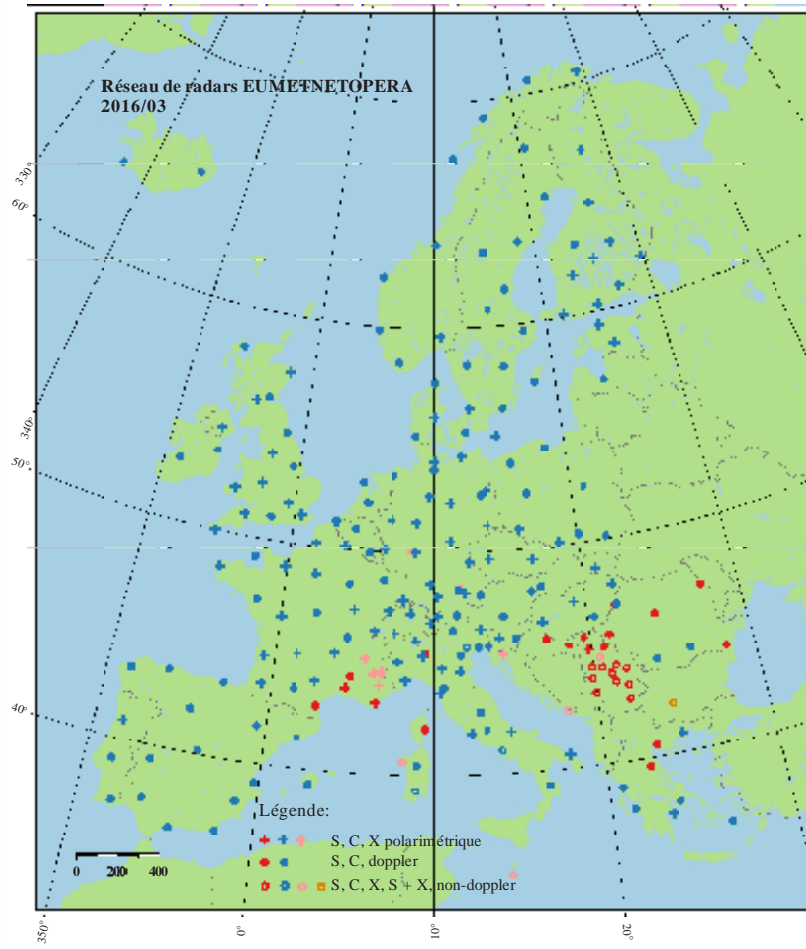


Meteo-04-1

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).

FIGURE 4-2

Exemple de réseau de radars météorologiques
(situation en mars 2016)



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 ϵ_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:

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

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

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

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 $\text{dB}_Z = 10 \log Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3)$ 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, 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.

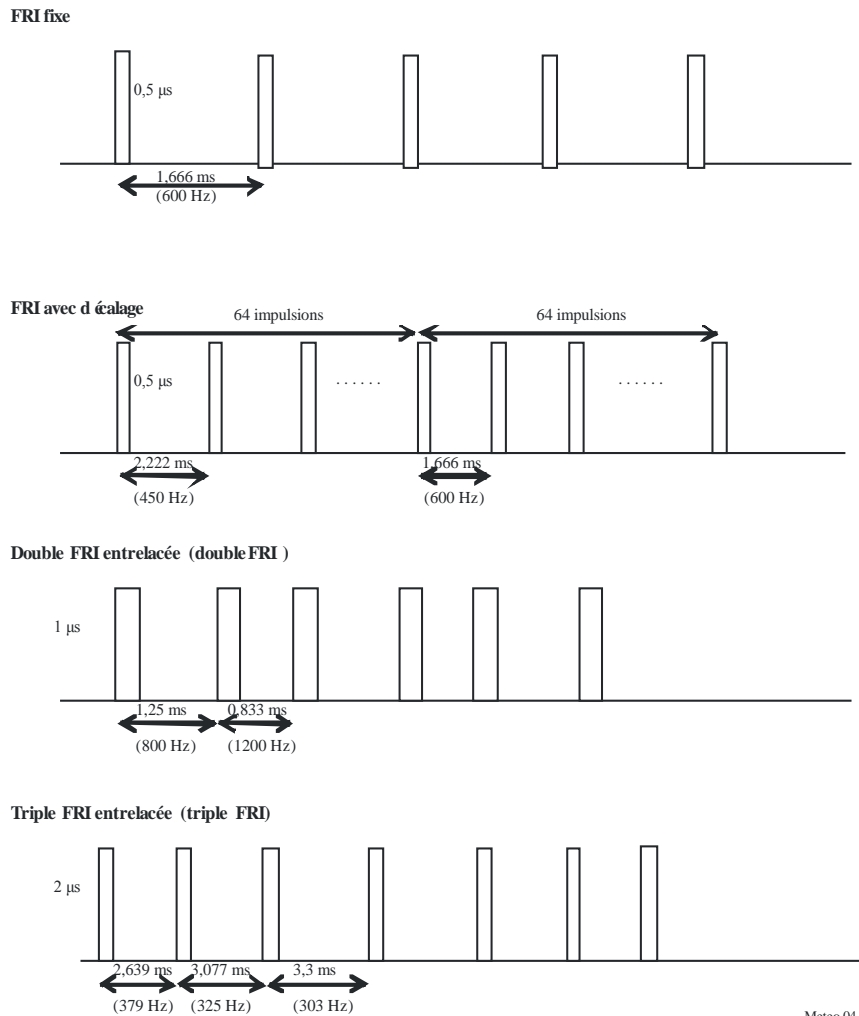
A titre d'exemple, une enquête menée récemment sur les radars météorologiques en bande C a montré que les intervalles de valeurs des différents paramètres des systèmes d'émission sont larges:

- Élévation de fonctionnement comprise entre 0° et 90°
- Largeur d'impulsion comprise entre 0,5 et 3,3 μs (pour les radars opérationnels) pour les impulsions non compressées, tandis que certains radars utilisent une compression d'impulsion avec une largeur d'impulsion comprise entre 30 μs et 350 μs (il est à noter que la compression d'impulsion fait augmenter la largeur de bande nécessaire (3 à 6 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).

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

FIGURE 4-3

Types de systèmes d'émission des radars météorologiques



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 3 (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)

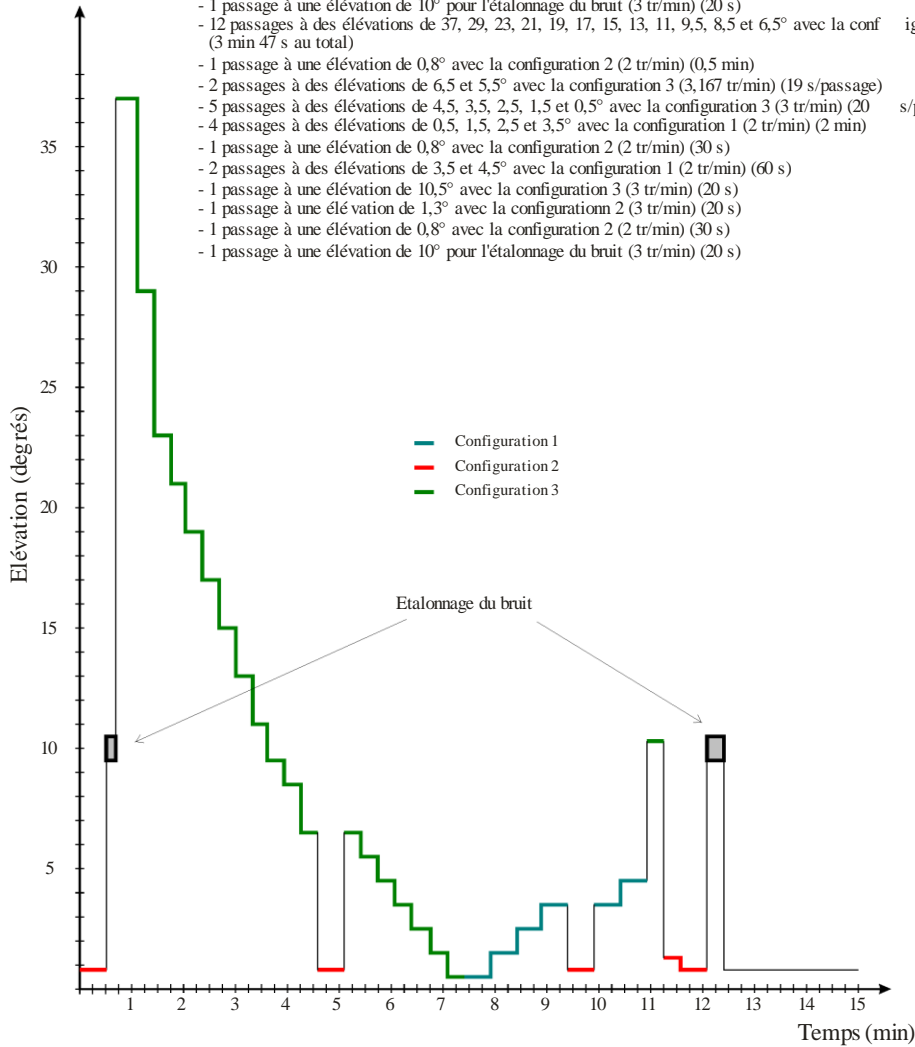
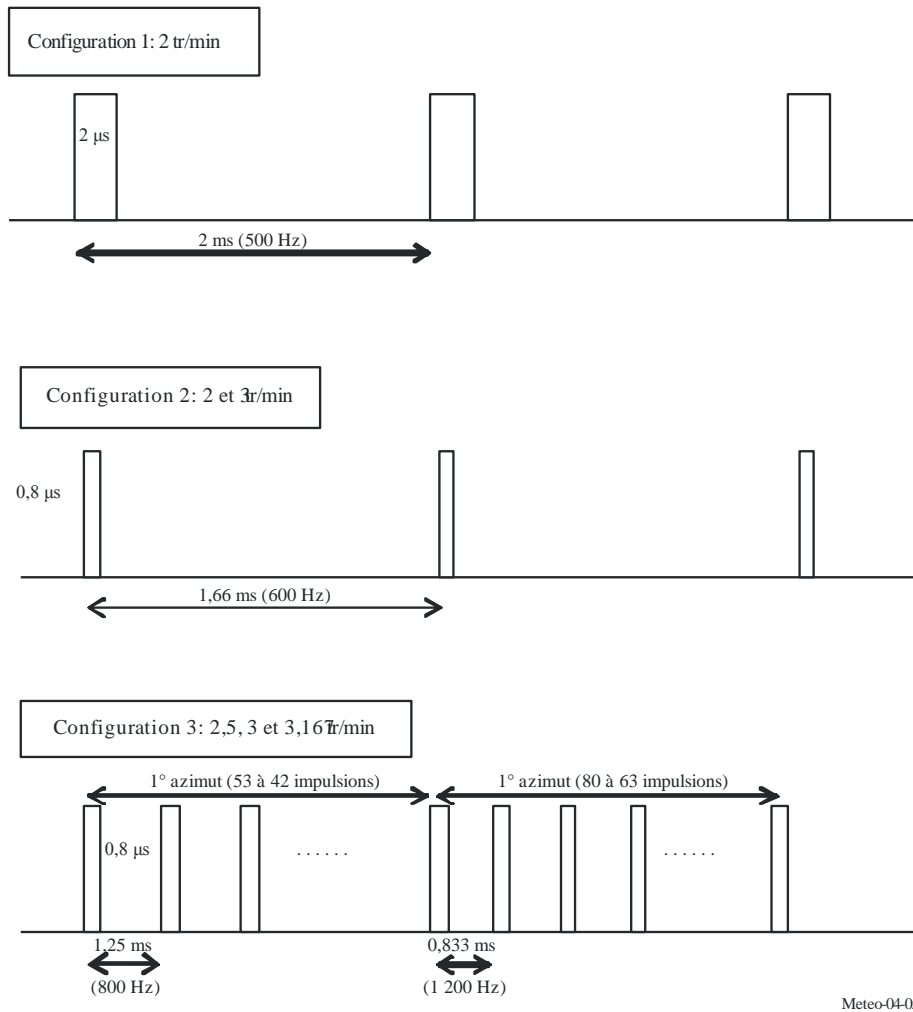


FIGURE 4-5

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



4.2.4.2 Etalonnage du bruit

Etant 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.

Dans de nombreux cas, cette mesure du bruit est réalisée sans émission du radar (ce qui pourrait en particulier avoir un impact sur la conception de certains systèmes radioélectriques qui cherchent à détecter le signal du radar pour réduire les brouillages).

Dans tous les cas, les brouillages reçus pendant l'étalonnage du bruit vont altérer toutes les collectes de données jusqu'à ce que l'étalonnage suivant sans brouillage soit réalisé. Ces brouillages pourraient entraîner la présentation d'intensités de précipitations inférieures 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 Etats-Unis, fonctionnent dans deux modes sélectionnables par l'utilisateur: mode temps clair et mode précipitations. Le mode temps clair nécessite une sélection manuelle par l'utilisateur. 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).

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 fréquence de répétition des impulsions (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.

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 S/N . L'utilisation d'une grande largeur d'impulsion et d'une faible FRI donne approximativement une puissance d'écho de 8 dB pour un dBz donné de réflectivité.

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 oeuvre différents types de stratégies de balayage (voir l'exemple du § 4.2) avec un échantillonnage différent en fonction de l'élévation. Les phénomènes météorologiques surveillés normalement dans le mode précipitations sont associés à la formation de précipitations avec des tempêtes convectives (averses de pluie, grêle, orages violents, tornades, etc.) 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. Ce procédé est efficace si la vitesse radiale du vent dépasse la fréquence de coupure du filtre.
- Application du filtrage statistique fondé sur le fait que 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 plus de 30 ans 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 $Z-R$ (4-10). D'autres algorithmes, basés sur la phase différentielle $\varphi_h - \varphi_v$ 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, 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 oeuvre 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

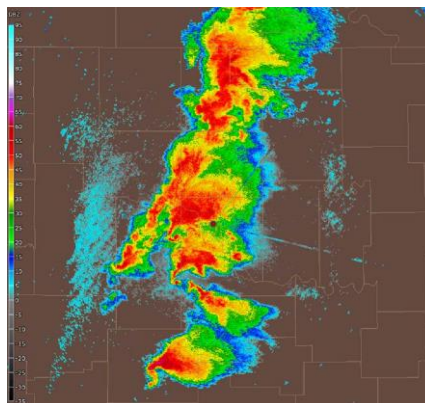
Données de base produites	Précision nominale requise
Réflectivité de base	< 1 dB
Vitesse radiale moyenne	< 1 m/s
Largeur spectrale	< 1 m/s

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

**Réflectivité obtenue à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC
le 24 mai 2011 lors d'une tornade**



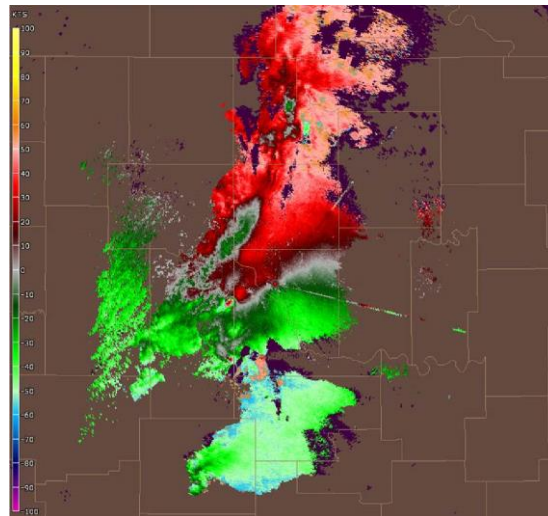
Meteo-0 4-06

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. La vitesse radiale moyenne est donnée par le premier moment de la densité spectrale. Elle est généralement déterminée à partir d'un grand nombre d'impulsions successives et est calculée à partir de l'argument de la variance complexe avec décalage unique. L'argument de covariance complexe donne une estimation du déplacement angulaire du vecteur de signal Doppler d'une impulsion radar à l'autre. La vitesse angulaire du vecteur Doppler est égale au déplacement divisé par l'intervalle de temps entre impulsions. Le spectre Doppler fait apparaître la réflectivité et la distribution des vitesses avec pondération du radar dans le volume radar.

FIGURE 4-7

Vitesse radiale obtenue à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC le 24 mai 2011 lors d'une tornade



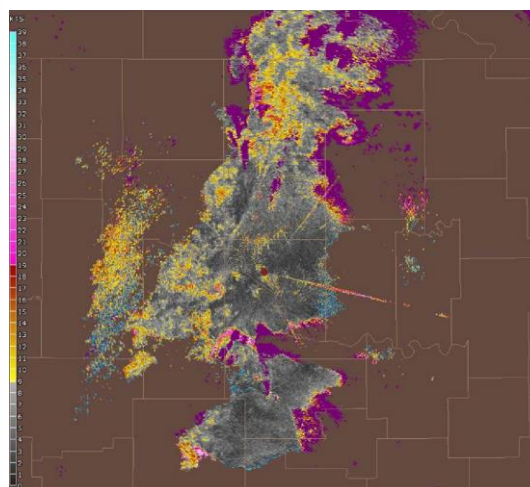
Meteo-04-07

4.2.7.3 Largeur spectrale

Pour la conception des radars météorologiques, la largeur spectrale est calculée 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 et Zrníc, 1984]

FIGURE 4-8

Largeur spectrale obtenue à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC le 24 mai 2011 lors d'une tornade



Meteo-04-08

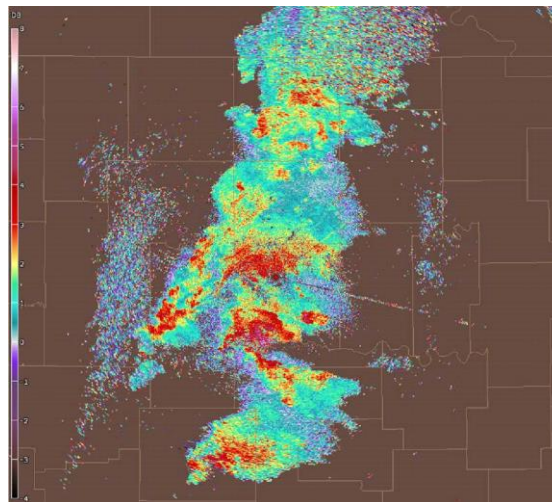
4.2.7.4 Produits de radars météorologiques à double polarisation

4.2.7.4.1 Réflectivité différentielle

La réflectivité différentielle est un produit qui est associé aux radars météorologiques polarimétriques, et c'est un 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

**Réflectivité différentielle obtenue à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC
le 24 mai 2011 lors d'une tornade**



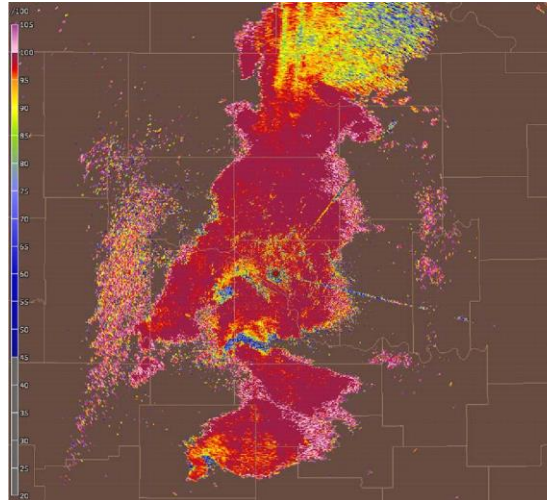
Meteo-0 4-09

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 puissances réfléchies 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

**Coefficient de corrélation obtenu à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC
le 24 mai 2011 lors d'une tornade**



Meteo-0 4-10

4.2.7.4.3 Taux de dépolarisation linéaire

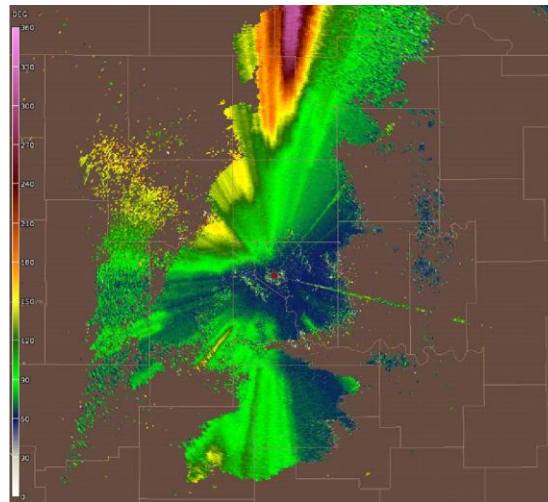
Le taux de dépolarisation linéaire est un autre produit de radar polarimétrique, qui donne le taux de puissance d'écho verticale pour une impulsion horizontale ou de puissance d'écho horizontale pour une impulsion verticale (non illustré). Tout comme le coefficient de corrélation, c'est un bon indicateur 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

**Phase différentielle obtenue à partir d'un radar KOUN à 22 h 34 UTC
le 24 mai 2011 lors d'une tornade**



Meteo-0 4-11

4.2.7.5 Données dérivées produites

A 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 une coupe horizontale, est obtenue par une rotation de l'antenne dans le plan horizontal à un angle d'élévation constant. On augmente l'angle d'élévation de l'antenne d'un incrément prédéfini après chaque coupe. 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° . 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. Les balayages sectoriels sont utilisés pour obtenir une partie de coupe à un angle d'élévation donné. Les balayages volumiques sectoriels consistent à effectuer un balayage volumique sur un intervalle d'angles d'azimut pour lesquels l'antenne produit plusieurs coupes à différents angles d'élévation. Dans un troisième mode, l'antenne est maintenue à un angle d'azimut et à un angle d'élévation constants pour surveiller un endroit spécifique dans l'atmosphère. Les trois stratégies permettent à l'opérateur du radar de se concentrer sur une partie spécifique de l'atmosphère.

4.2.9 Besoins actuels et futurs de spectre

A 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. Par exemple, 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 ($\leq 200 \mu\text{m}$). On opte en revanche pour la bande S (2 700-2 900 MHz, longueur d'onde de 10 cm) 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 (fréquences nominales 2 700-3 000 MHz), la bande C (fréquences nominales 5 250-5 725 MHz) et la bande X (fréquences nominales 9 300-9 500 MHz). On trouvera les valeurs exactes des fréquences des bandes assignées dans des normes reconnues (IEEE 2002).

La bande S (2 700-3 000 MHz, avec une longueur d'onde nominale de 10,7 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 5,4 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, et 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 (9 300-9 500 MHz, avec une longueur d'onde comprise entre 2,5 et 3,2 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, ...).

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 (5,0 cm) est près de 6 à 8 fois plus élevé que dans la bande S (10,0 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 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 est problématique pour les petites longueurs d'ondes, car une très grande précision de mesure de la puissance est nécessaire (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 Etats-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 Etats-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). Etant 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 ambiguë⁴ 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:

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

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.

⁴ 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.

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'effet d'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. Les radars à balayage rapide ont besoin de davantage de spectre, 10 MHz par exemple, en raison de la compression des impulsions.

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 Etats-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:

$$V_a = \frac{\lambda \cdot FRI}{4}$$

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 effective 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'un premier trajet plus court requis 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. Le front avant ou arrière d'une impulsion est le marqueur qui sert à mesurer le temps d'arrivée d'une impulsion réfléchi; 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 bande relativement large. La largeur de bande 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 nécessaire étonne souvent ceux qui ne connaissent pas les systèmes radar. 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. En raison de la sensibilité des radars météorologiques, leur performance peut être grandement détériorée par les signaux de brouillage. Il est donc important d'identifier les types de brouillage pouvant nuire aux 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:

$$z = AR^B$$

où:

- z: réflectivité
- A: constante de diffusion
- B: multiplicateur d'intensité

et

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)}$$

où:

dBz: réflectivité (dB).

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

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

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

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

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

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

Le Tableau 4-4 contient des valeurs types de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité pour plusieurs types de précipitations⁵.

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.

⁵ 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

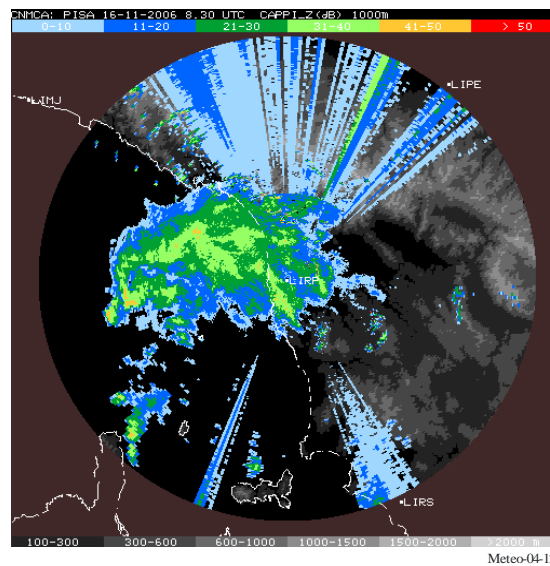
Ces calculs montrent que, quels que soient la valeur de l'intensité et le type de précipitations, le pourcentage de surestimation correspondant à une augmentation d'énergie constante donnée est également constant, et ne peut donc pas être négligé.

Par ailleurs, si on considère le calcul de la réflectivité pour un pixel donné qui est fondé 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, l'évaluation de l'impact d'un brouillage constant est quelque peu différente et dépend surtout de l'impact que la phase du signal de brouillage peut avoir sur la phase du signal attendu, ayant alors des conséquences sur la mesure dérivée des vents.

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.

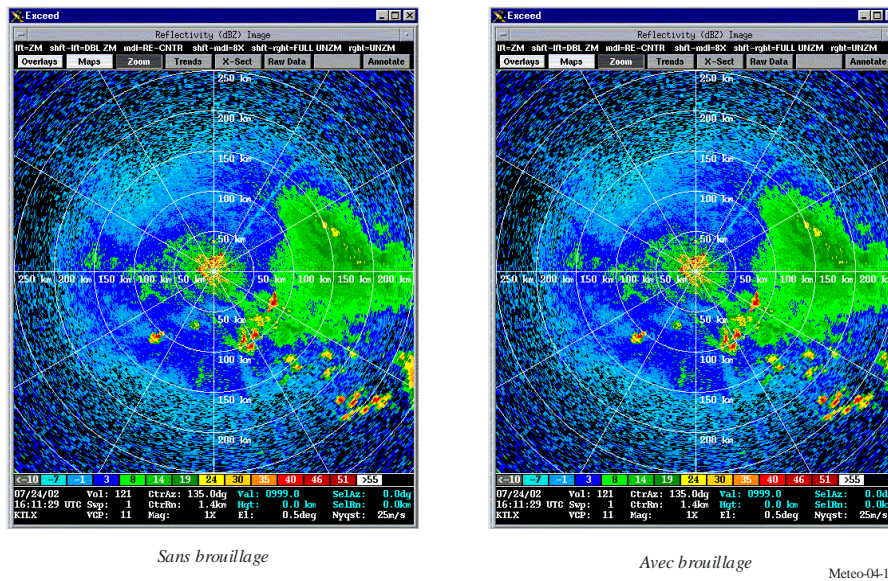
De plus, on peut également estimer que lorsque le niveau de brouillage est nettement inférieur au signal attendu, la phase de ce dernier ne sera pas modifiée tandis que, au contraire, si le signal de brouillage est nettement supérieur, alors la phase détectée par le radar sera la phase du signal de brouillage. 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

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

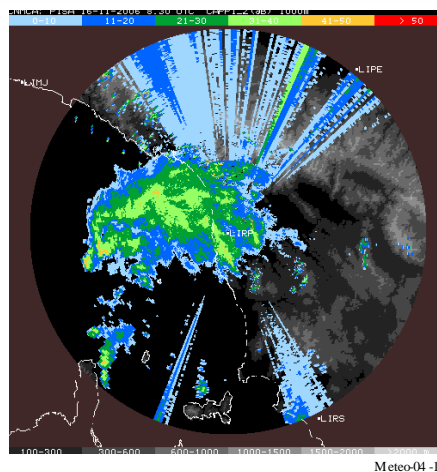
Comparaison d'images sans et avec brouillage du mode précipitation d'un radar météorologique



La Fig. 4-14 illustre un autre exemple de brouillage causé à un radar météorologique par un seul émetteur de faible puissance en intérieur.

FIGURE 4-14

Brouillage causé à un radar météorologique (mode précipitations)



4.2.10.4 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 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.

4.2.10.4.1 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).

4.2.10.4.2 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.

4.2.10.4.3 Energie 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.

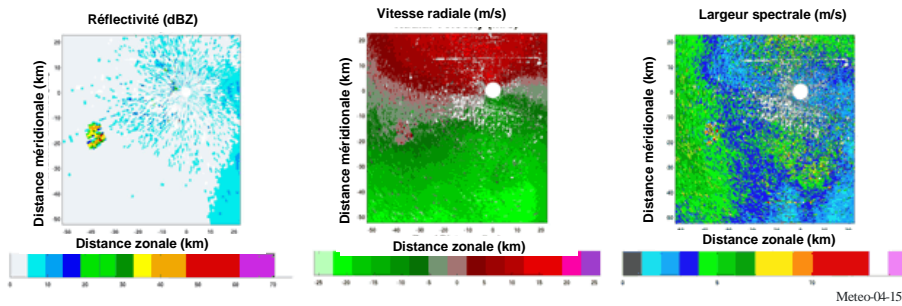
4.2.10.4.4 Exemples de fouillis radar causé par des éoliennes

Deux exemples distincts de brouillage causé par les parcs éoliens⁶ sont donnés à la Fig. 4-15 [Palmer et Isom, 2006]. 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.

⁶ Les parcs éoliens sont des champs d'éoliennes qui servent à produire de l'électricité.

FIGURE 4-15

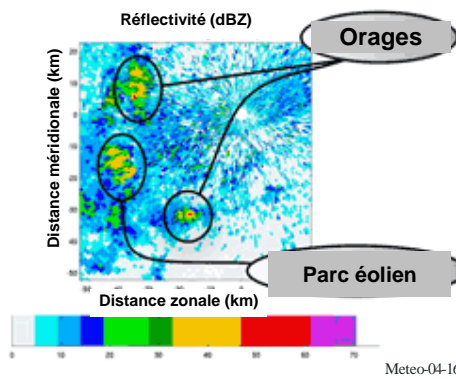
Exemples de brouillage de radar météo causé par un parc éolien en conditions de ciel clair



La Fig. 4-16 illustre le même parc éolien lors d'un orage.

FIGURE 4-16

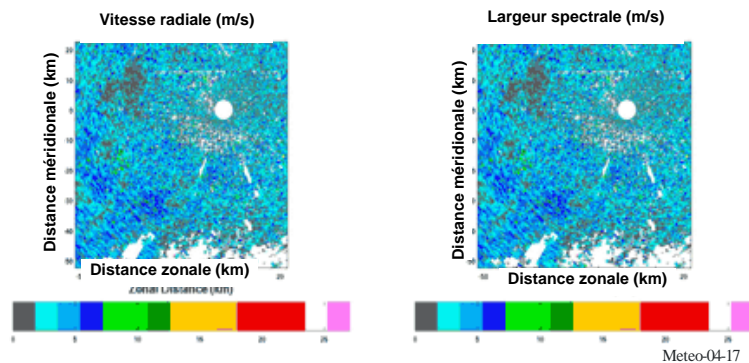
Exemple de brouillage causé par un parc éolien et de son impact sur la réflectivité en situation d'orage isolé



Sans connaissance préalable, il serait extrêmement difficile de faire une distinction entre le fouillis radar causé par les éoliennes et les orages. Etant 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. 4-17).

FIGURE 4-17

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



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

De récentes études sur le terrain illustrent 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, l'analyse a 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.

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 dBX 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

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, tous les radars NEXRAD aux Etats-Unis et près de la moitié des radars OPERA en Europe ont été modernisés pour prendre en charge la double polarisation.

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.

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 seront 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 min. Les améliorations, mises en oeuvre 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 oeuvre), 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.

Il existe une possibilité de déploiement de radars météorologiques mis au point par CASA (*Center for collaborative adaptive sensing of the atmosphere*) dans la bande X dans la portion de spectre comprise entre 8 000 MHz et 12 000 MHz. La National Science Foundation a créé un nouveau centre de recherches techniques, CASA, en septembre 2003 afin de mettre au point de petits radars bon marché pour la télédétection haute résolution dans la basse atmosphère. Les conditions météorologiques dans la basse troposphère sont extrêmement sous-échantillonnées, ce qui empêche les prévisions et l'initialisation de modèle dans la région où les tempêtes se développent. Les radars CASA à haute densité spatiale pourront détecter l'évolution des conditions météorologiques dans la région de la basse atmosphère qui se trouve souvent au-dessous de la couverture actuelle des radars Doppler en service (c'est-à-dire les trois plus bas kilomètres). Les radars CASA seront placés sur des pylônes de téléphonie mobile ou une autre infrastructure existante avec une grande capacité de transmission de données. A la différence de l'actuel réseau de radars préprogrammés, les radars CASA communiqueront entre eux et adapteront leurs stratégies de détection directement en fonction de l'évolution de la météo et des besoins des utilisateurs finals. Ces données radar pourront être incorporées dans des modèles numériques de prévision météorologique pour une initialisation plus complète des données.

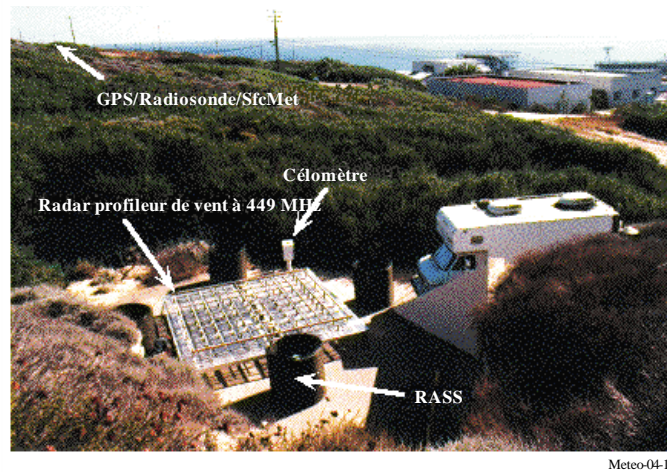
Enfin, il convient également de noter le projet SENSR aux Etats-Unis, qui vise à regrouper les radars météorologiques et ATC (primaires et secondaires) dans un seul et même matériel.

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 au-dessus d'une station automatique et parfois d'un emplacement éloigné en détectant l'infime partie de la puissance émise rétrodiffusée par des turbulences dans l'atmosphère claire. La Figure 4-18 est une photographie d'une installation classique de radar profileur de vent.

FIGURE 4-18

Photographie d'une installation de radar profileur de vent

Meteo-04-14

L'un des principaux avantages des profileurs de vent sur d'autres systèmes de mesure est leur capacité à surveiller en continu le champ de vent. Ils peuvent également servir à détecter des précipitations, mesurer des caractéristiques importantes dans le champ de vitesse vertical (ondes de gravité et ascendances de convection), estimer 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*).⁷

4.3.1 Applications

L'équation simplifiée suivante, obtenue à partir de [Gossard et Strauch, 1983], est utile pour analyser l'impact des besoins sur les paramètres de fonctionnement et sur la conception des profileurs :

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-12)$$

où :

- \bar{P}_t : puissance émise moyenne (W)
- A_e : ouverture équivalente (degrés)
- 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 (sans dimension).

Cette équation n'est valable que dans le sous-domaine inertiel de la turbulence atmosphérique. 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). Au-dessous de la limite inférieure de ce

⁷ 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.

sous-domaine inertiel, la turbulence se dissipe rapidement sous forme de chaleur par viscosité. Les petites longueurs d'onde ne peuvent donc pas être utilisées pour l'établissement de profils du vent en raison de l'absence de fluctuations mesurables de l'indice de réfraction à très petite échelle.

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

Si l'utilisateur a besoin d'une résolution temporelle élevée, le rapport signal-bruit diminue par la réduction du temps d'intégration. On peut y parvenir en combinant certains des facteurs ci-après :

- grande ouverture;
- puissance de crête et FRI élevées pour augmenter la puissance moyenne;
- grande longueur d'onde;
- fonctionnement sur une gamme de hauteurs proche du radar lorsque la FRI ne cause pas de problèmes d'ambiguïté de la portée et lorsque la rétrodiffusion atmosphérique et l'inverse du carré de la hauteur sont relativement importants.

Si l'utilisateur a besoin d'une résolution verticale élevée, le rapport signal-bruit diminue car il faut de courtes impulsions et, donc, réduire la puissance moyenne. Une grande largeur de bande est aussi nécessaire. On peut y parvenir en combinant certains des facteurs ci-après :

- grande ouverture;
- puissance de crête et FRI élevées, compression des impulsions pour augmenter la puissance moyenne;
- grande longueur d'onde;
- fonctionnement sur une gamme de hauteurs proche du radar lorsque la FRI ne cause pas de problèmes d'ambiguïté de la portée et lorsque la rétrodiffusion atmosphérique et l'inverse du carré de la hauteur sont relativement importants.

Soulignons qu'en recourant à la compression des impulsions (pour allonger leur durée), on doit accroître la hauteur de la fenêtre de distance la plus basse.

Si l'utilisateur a besoin de données sur les vents à haute altitude, le rapport signal-bruit diminue par la réduction de l'inverse du carré de la hauteur et, même si cela n'apparaît pas clairement dans l'équation, par la réduction du paramètre de la structure en fonction de la hauteur et par la compression du sous-domaine inertiel à partir des petites longueurs d'onde (hautes fréquences) avec l'élévation. On peut y parvenir en combinant certains des facteurs ci-après :

- grande ouverture;
- puissance de crête élevée, compression des impulsions pour augmenter la puissance moyenne;
- grande longueur d'onde;
- longs temps d'intégration.

Si l'utilisateur a besoin d'un fonctionnement fiable par tous les temps, le rapport signal-bruit doit être adéquat même quand la diffusion est faible 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 au cœur des courants-jets entre 10 et 15 km d'altitude. On peut répondre à cette exigence comme suit :

- choix de la bande de fréquences;
- puissance moyenne élevée et grande ouverture d'antenne;
- grande sensibilité du récepteur;
- niveau bas de brouillage et de bruit système.

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 projettent successivement le faisceau principal vers au moins trois directions indépendantes. Pour relever les données, les systèmes actuels utilisent généralement deux ou quatre azimuts orthogonaux, à des angles d'élévation d'environ 75° et souvent 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 5° à 10°, qui correspondent à des gains d'antenne de 33 dBi à 27 dBi. Le gain détermine l'ouverture équivalente selon l'équation (4-13):

$$A_e = 10^{G/10} \lambda^2 / 4\pi \quad (4-13)$$

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 MU au Japon et l'Eastern and Western Missile Ranges aux Etats-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 profileurs qui fonctionnent dans la gamme 400-500 MHz ont été conçus pour:

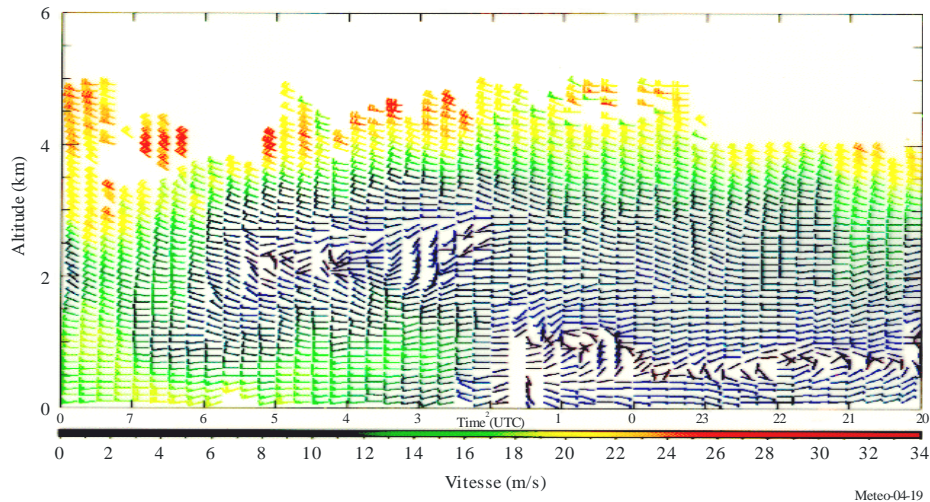
- mesurer les profils du vent de 0,5 km à 16 km au-dessus du radar avec une résolution verticale de 150-250 m à basse altitude et de 300-1 000 m à haute altitude, au moyen d'antennes présentant un gain de 32-34 dBi environ;
- des puissances moyennes de 500 et 2 000 W pour les sondages à basse et à haute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

A titre d'exemple, un graphique vitesse des vents/altitude produit par un profileur mobile fonctionnant à 924 MHz est illustré à la Fig. 4-19. 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.

FIGURE 4-19

Vitesse des vents en fonction de l'altitude



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 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 peu coûteux, 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 compatibles avec la plupart des services au sol pour les mêmes raisons.

Il est communément admis qu'il faut une largeur de bande de 2 à 3 MHz au voisinage de 400 MHz et de 2,5 MHz au voisinage de 1 000 MHz ou 1300 MHz. On peut donc convenir que la Résolution 217 (CMR-97) assure un choix suffisant de fréquences radioélectriques:

«... de prier instamment les administrations de mettre en oeuvre 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 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 (CMR-97)** 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 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.)

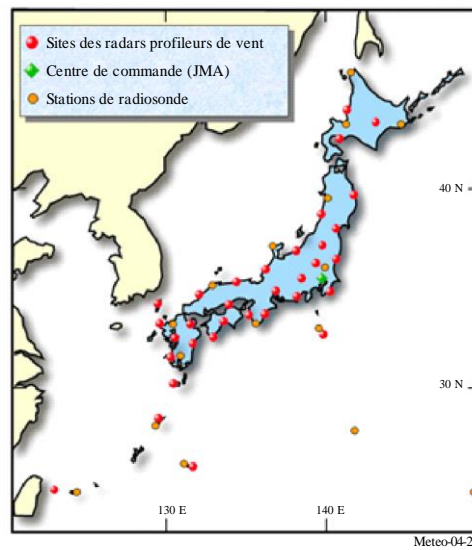
Le codage de phase appliqué aux émissions des profileurs à 404 MHz doit être «défait» par le récepteur afin que le brouillage provenant de systèmes autres apparaisse incohérent et semblable à du bruit. Ainsi, le signal minimal détectable (profileur) se situe à environ -170 dBm, alors que le brouillage 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 (Fig. 4-20).

FIGURE 4-20

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.

CHAPITRE 5

LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE PASSIVE ET ACTIVE POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES

		<i>Page</i>
5.1	Introduction.....	76
5.2	La radiométrie passive à hyperfréquences	78
5.2.1	Besoins de spectre.....	78
5.2.2	Observation des paramètres à la surface de la Terre.....	82
5.2.3	Caractéristiques techniques.....	84
5.2.4	Conditions d'exploitation types des capteurs passifs	85
5.2.5	Principales caractéristiques techniques	85
5.2.6	Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage.....	87
5.2.7	Mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques.....	87
5.3	Les capteurs actifs.....	95
5.3.1	Introduction.....	95
5.3.2	Radars à ouverture synthétique	97
5.3.3	Altimètres.....	98
5.3.4	Diffusiomètres.....	99
5.3.5	Radars de précipitations	101
5.3.6	Radars de profil des nuages.....	102
5.3.7	Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs	103
5.3.8	Niveaux de puissance surfacique	103

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 assimilation dans des modèles numériques.

Des études menées récemment en Europe ont confirmé que les satellites Metop, à bord desquels sont embarqués plusieurs systèmes de télédétection différents (passifs et actifs), contribuent dans une large mesure à la qualité des prévisions numériques du temps (PNT), en réduisant de 25% les erreurs de prévision sur 24 heures grâce à toutes les données d'observation qui alimentent en temps réel les modèles. Cette réduction importante permet d'attribuer aux satellites Metop une grande part – de l'ordre de 4,9 milliards d'euros par an – des retombées socio-économiques considérables des prévisions météorologiques, qui sont estimées à 61,4 milliards d'euros par an dans l'Union européenne.

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 actuellement exploités uniquement sur des satellites non géostationnaires.

Dans la **télédétection passive**, on emploie que des récepteurs, sans émetteur. Le rayonnement ciblé par ces récepteurs est d'origine naturelle, généralement 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 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, mais ce n'est 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 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 souhaités 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:

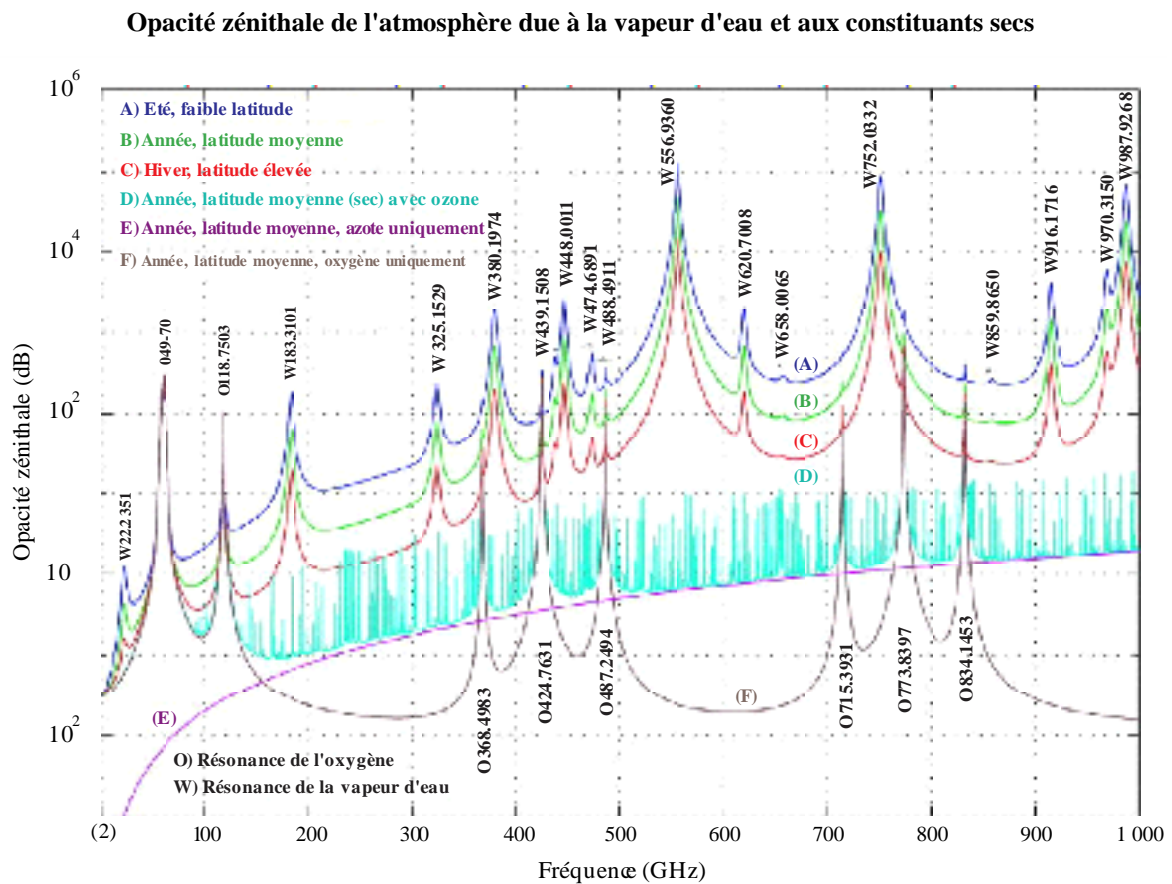
- paramètres de la surface de la Terre, par exemple l'humidité du sol, la température de surface de la mer, les contraintes du vent sur les océans, l'étendue et l'âge de la glace, la couverture de neige, les précipitations au-dessus des terres;
- paramètres atmosphériques tridimensionnels (basse, moyenne 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 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 (voir la Fig. 5-1).

FIGURE 5-1



Meteo-05-01

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 attribuée (GHz)	Largeur de bande attribuée et {souhaitée} (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
6,425-7,25 (RR 5.458)	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
114,25-116	1 750 ⁽¹⁾	CO
115,25-122,25	7 000 ⁽¹⁾	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
155,5-158,5	3 000	Paramètres de la Terre et des nuages
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 ⁽²⁾	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 ⁽²⁾	O ₃
250-252	2 000 ⁽²⁾	N ₂ O
275-285,4	10 400 ⁽²⁾	N ₂ O, ClO
296-306	10 000 ⁽²⁾	Canal latéral pour les sondages de température, oxygène, HNO ₃ , HOCl, N ₂ O, O ₃ , O ¹⁷ O,
313-355,6	42 100 ⁽²⁾	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
361,2-365	3 800 ⁽²⁾	O ₃
369,2-391,2	22 000 ⁽²⁾	Profil de vapeur d'eau H ₂ O
397,2-399,2	2 000	Profil de vapeur d'eau
409-411	2 000	Sondage de température
416-433,46	17 460 ⁽²⁾	Oxygène, profil de température O ₂
439,1-466,3	27 200	Profil de vapeur d'eau, nuage HNO ₃ , H ₂ O, O ₃ , N ₂ O, CO
477,75-496,75	19 000	Oxygène, profil de température O ₂
497-502	5 000 ⁽²⁾	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau O ₃ , N ₂ O, BrO,
523-527	4 000 ⁽²⁾	Canal latéral pour profil de vapeur d'eau
538-581	43 000 ⁽²⁾	Profil de vapeur d'eau ClO, H ₂ O, O ₃ , HNO ₃
611,7-629,7	18 000 ⁽²⁾	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 ⁽²⁾	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
656,9-692 (RR 5.565)	35 100 ⁽²⁾	Profil de vapeur d'eau, nuage H ₂ O, HO ₂ , ClO, CH ₃ Cl, CO
713,4-717,4	4 000 ⁽²⁾	O ₂
729-733	4 000 ⁽²⁾	HNO ₃ , O ¹⁸ O
750-754	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
771,8-775,8	4 000 ⁽²⁾	O ₂
823,15-845,15	22 000 ⁽²⁾	O ₂
850-854 (RR 5.565)	4 000 ⁽²⁾	NO
857,9-861,9	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
866-882	16 000 ⁽²⁾	Nuage, fenêtre
905,17-927,17	22 000 ⁽²⁾	H ₂ O
951-956	5 000 ⁽²⁾	O ₂ , NO, H ₂ O
968,31-972,31	4 000 ⁽²⁾	H ₂ O
985,9-989,9	4 000 ⁽²⁾	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 ITU-R RS.515.

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

(2) Cette largeur de bande est occupée par des capteurs 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). Toutefois, il n'est pas nécessaire de régler 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

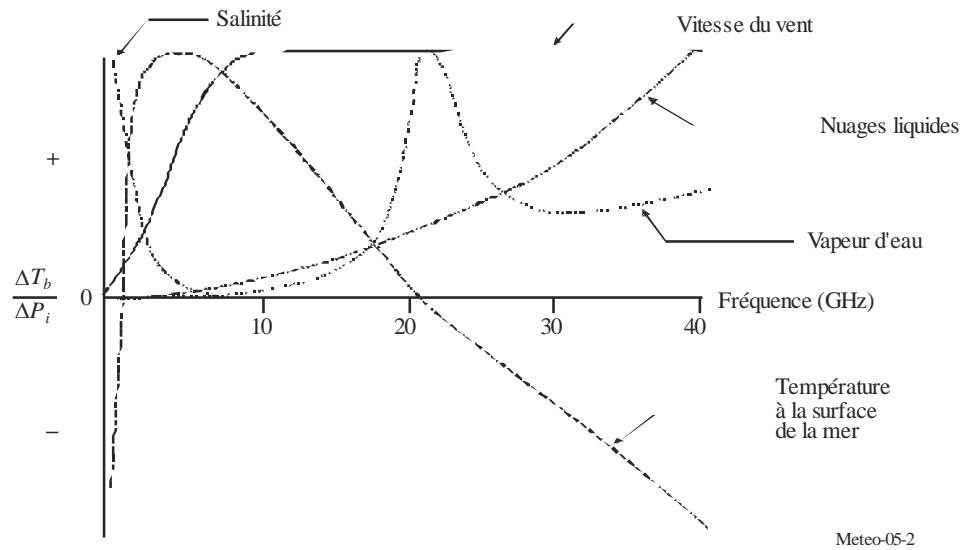
La télédétection sur les surfaces océaniques permet de mesurer quantité des paramètres également mesurés sur les terres (ex. vapeur d'eau, vitesse du vent, intensité des précipitations), ainsi que des paramètres fournissant des informations sur l'état de l'océan (ex. température de surface de la mer,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

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;
- cinq fréquences (proches de 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 24 GHz et 36 GHz) sont nécessaires pour déterminer les paramètres dominants.

FIGURE 5-2

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



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).

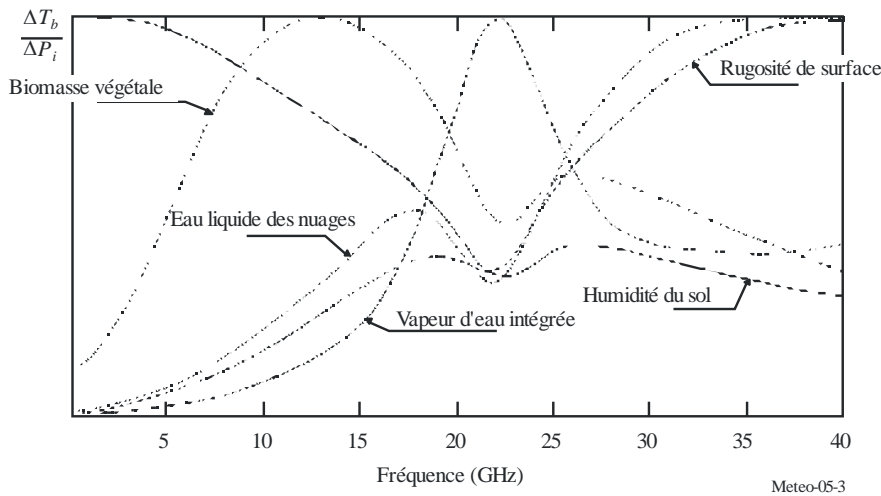
Une fréquence de 85 GHz ou 90 GHz est utile pour surveiller les pluies, mais uniquement lorsque tous les autres facteurs peuvent être évalués à des fréquences plus basses.

Des études effectuées à l'aide du radiomètre en hyperfréquence à balayage multibande (SMMR, *scanning multichannel microwave radiometer*) et de l'imager 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



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 au voisinage de 13,5 GHz doivent être complétées par une série de mesures passives auxiliaires au voisinage de 18,7 GHz, 24 GHz et 36 GHz.

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:

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

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. A 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 -3dB 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. 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.

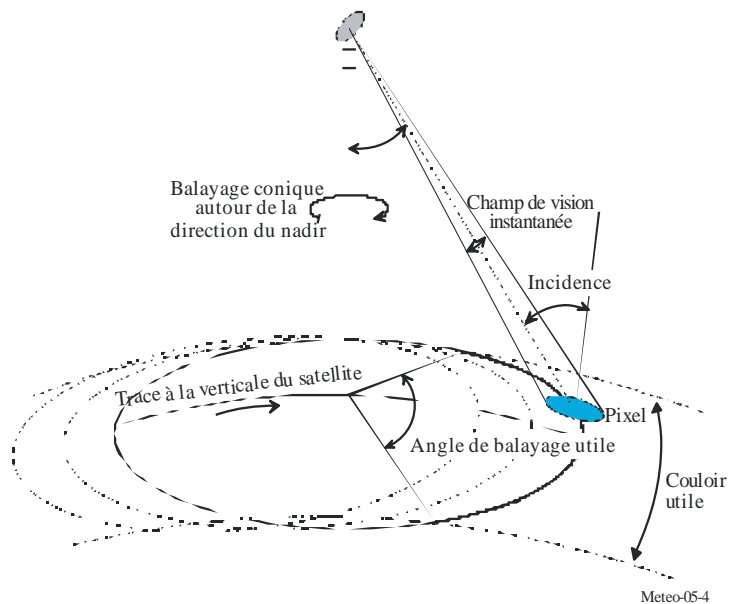
5.2.4.2 Satellites géostationnaires

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. Les données sont en général recueillies toutes les 30 min.

5.2.5 Principales caractéristiques techniques

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 passifs en hyperfréquence à balayage conique

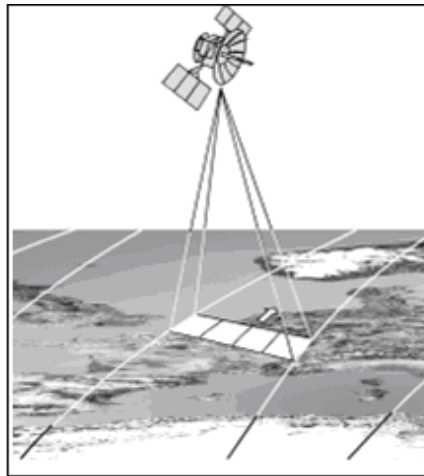
Voici les caractéristiques géométriques types (pour une altitude de 803 km):

- angle d'incidence au sol d'environ 55°;
- angle demi-conique de 46,7° 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.

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 perpendiculaire à la direction de vol d'un engin spatial tel que l'illustre la Fig. 5-5. 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. 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 5-5

Géométrie type des radiomètres passifs en hyperfréquence à barrette de détecteurs

Meteo-05-5

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 , etc.). 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 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):

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

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 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot Hz)$)

$k = 1,38 \times 10^{-23}$: 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 μm pour le CO_2 et en hyperfréquence aux alentours de 60 GHz et de 118,75 GHz pour l' O_2).

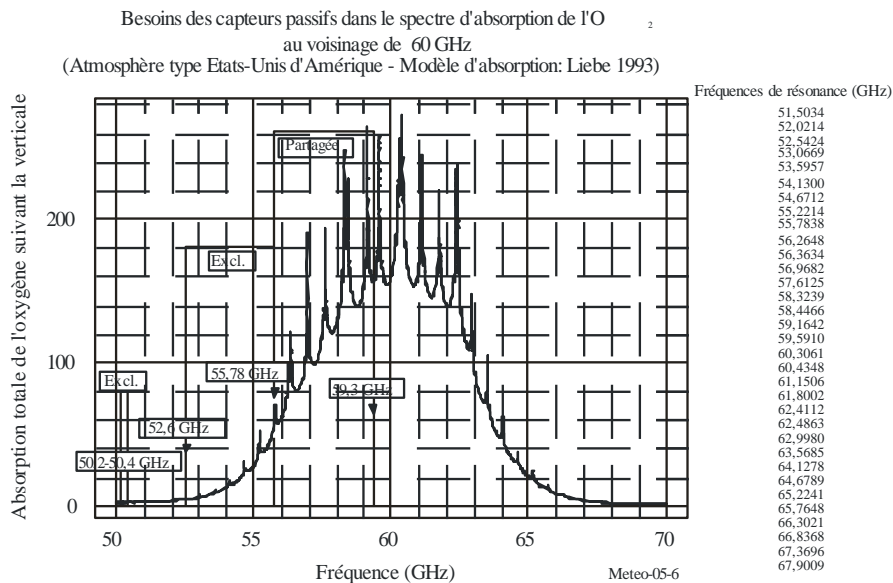
On effectue également des mesures radiométriques, dans les bandes d'absorption précises, d'autres gaz atmosphériques importants sur le plan radioactif et chimique, dont la concentration est variable et inconnue (H₂O, O₃, CH₄, ClO, etc.). Mais, dans ce cas, il faut impérativement connaître les profils 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. 5-6 à 5-8. 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 5-6

Spectre d'absorption de l'oxygène suivant la verticale au voisinage de 60 GHz
(raies d'absorption multiples)



Remarque – La Figure 5-6 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), 52,6-55,78 GHz (exclusivité) et 55,78-59,3 GHz (partage)).

FIGURE 5-7

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

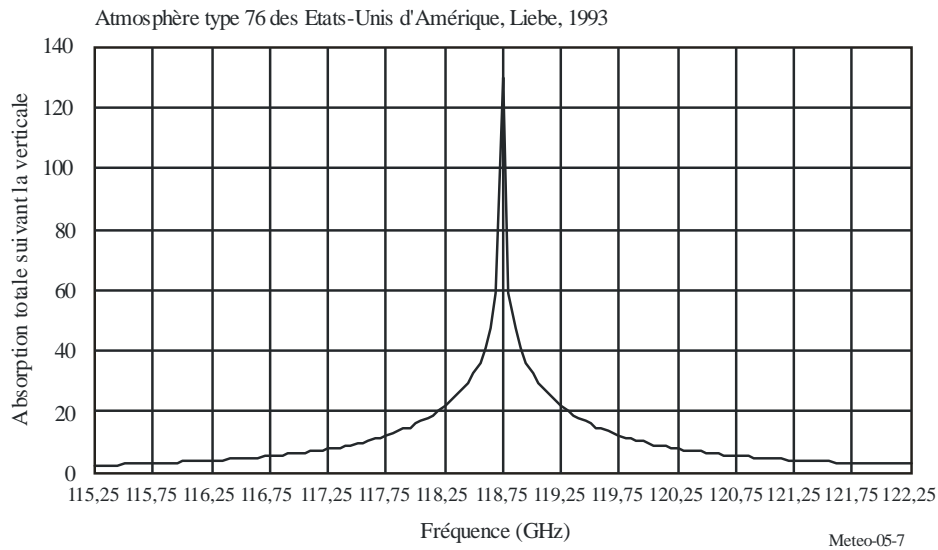
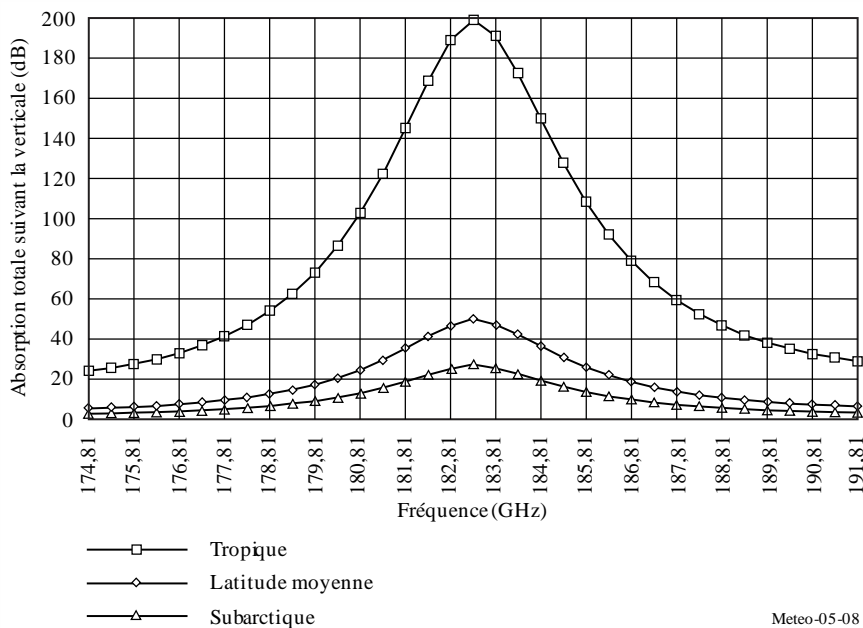


FIGURE 5-8

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



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 (vers le radiomètre) est en partie absorbée par les couches supérieures qui, à leur tour, absorbent en partie les émissions ascendantes provenant des niveaux inférieurs.

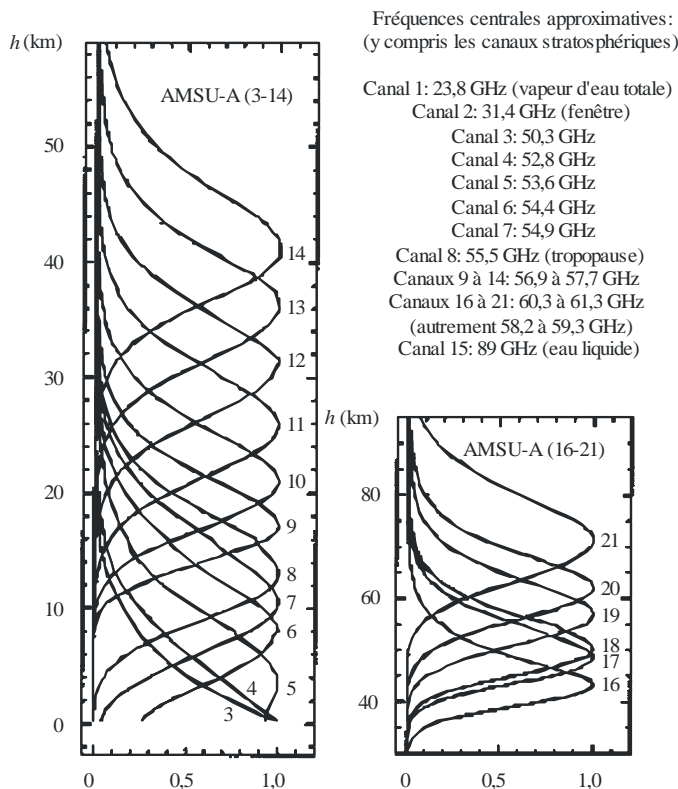
L'intégration de l'équation du transfert radiatif le long du trajet surface de la Terre-satellite reflète ce mécanisme et produit une fonction de pondération qui décrit l'apport relatif de chaque couche selon son altitude et qui présente aussi la résolution longitudinale (verticale) du capteur.

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. 5-9 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. 5-9 donne les fonctions de pondération types pour un sondeur de température à hyperfréquences qui fonctionne dans la bande de 60 GHz.

FIGURE 5-9

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



Meteo-05-9

Soulignons l'importance particulière des canaux 1 (23,8 GHz), 2 (31,5 GHz) et 15 (90 GHz) (non illustrés dans la Fig. 5-9 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.

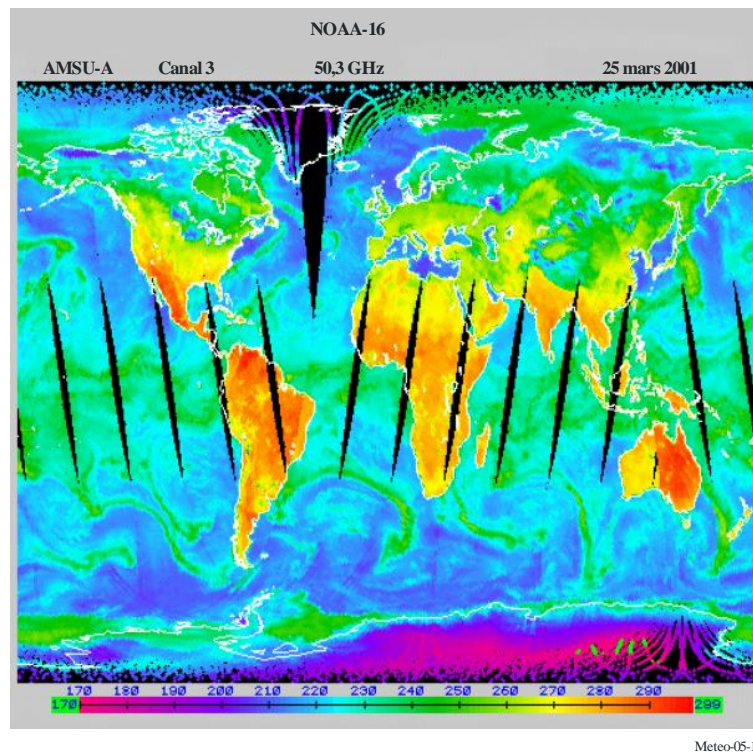
- Le canal 15, capable de détecter l'eau liquide atmosphérique, sert à éliminer les effets des précipitations qui contaminent les mesures effectuées dans les autres canaux.

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 de prévision numérique du temps (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. 5-10 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. 5-9).

FIGURE 5-10

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

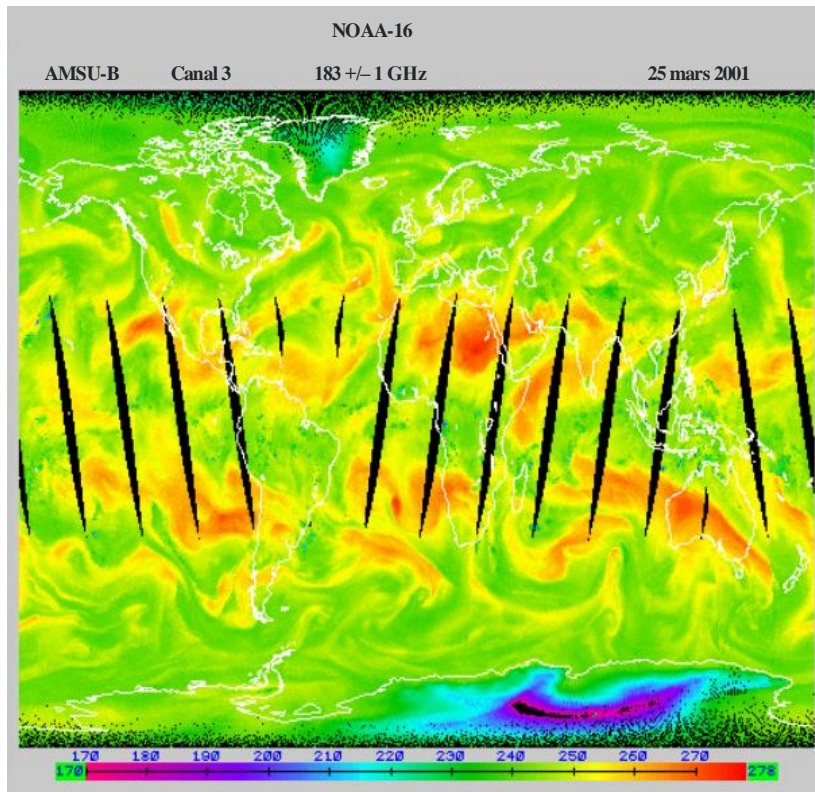


On voit, à la Fig. 5-11, l'image composite mondiale des mesures de la température de luminance (K) provenant du capteur AMSU-B, produites à l'intérieur d'une fenêtre temporelle d'une douzaine d'heures. AMSU-B est un radiomètre qui fonctionne en association avec AMSU-A afin d'améliorer la détection de la vapeur d'eau troposphérique. A 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 5-11

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



Meteo-05-11

Pour accroître l'efficacité des modèles PNT, il est nécessaire d'améliorer les modèles et de les initialiser 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.

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. 5-12;
- 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. 5-12);
- 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 5-12

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

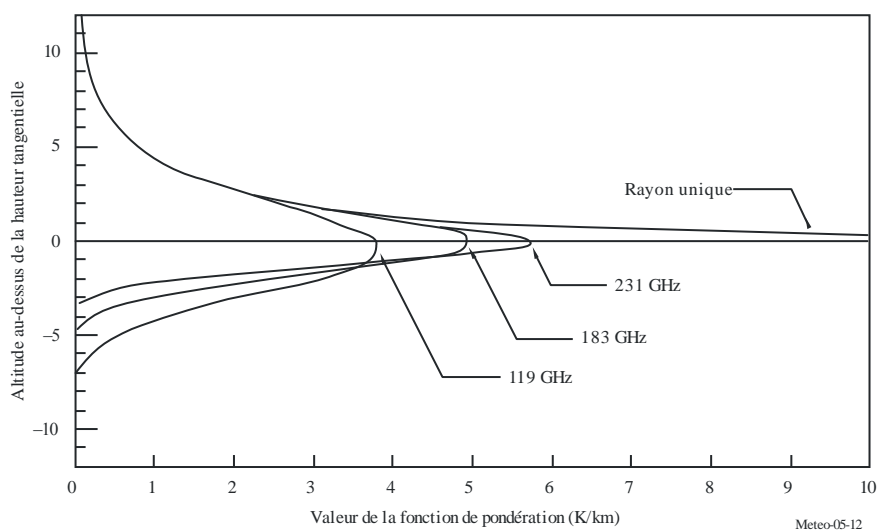


TABLEAU 5-3

Objectifs de mesure des MLS et régions spectrales types

Paramètre géophysique	Région spectrale (GHz)	Altitude (km)	Bruit quadratique moyen (intervalle)
Pression atmosphérique	50-60	30-70	1% (2 s)
Vitesse du vent	119	70-110	2-10 m/s (10 s)
Température		20-100	0,5-3 K (2 s)
O ₂		80-120	3×10^{-3} v/v (2 s)
Champ magnétique	183	80-110	0,3-1 m gauss (10 s)
H ₂ O		15-90	1×10^{-7} v/v (2 s)
ClO		20-40	2×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃	205	15-90	1×10^{-8} v/v (2 s)
H ₂ O ₂		20-50	9×10^{-10} v/v (10 s)
O ₃	231	15-90	1×10^{-8} v/v (2 s)
CO		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.

5.3 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.

Cinq 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 côtés 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.

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

TABLEAU 5-4
Caractéristiques des capteurs spatiaux actifs

Caractéristiques	Types de capteurs				
	SAR	Altimètre	Diffusiomètre	Radars de précipitations	Radars de profil des nuages
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	Orientation 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
Faisceau d'antenne	Faisceau-éventail	Faisceau-crayon	– Faisceaux-éventail – Faisceaux-crayon	Faisceau-crayon	Faisceau-crayon
Crête de puissance rayonnée (W)	1 500-8 000	20	100-5 000	600	1 000-1 500
Forme d'onde	Impulsions linéaires FM	Impulsions linéaires FM	Impulsions courtes ou entretenues interrompues (océans) ou impulsions MF linéaires (terres)	Impulsions courtes	Impulsions courtes
Largeur de bande	20-1 200 MHz	320/500 MHz	5-80 kHz (océans) ou 1-4 MHz (terres)	14 MHz	300 kHz
Facteur d'utilisation (%)	1-30	46	31 (océans) ou 10 (terres)	0,9	1-14
Zone de service	Terres/côtes/océans	Océans/ glace /côtes/ eaux intérieures	Océans/glace/terres/ côtes	Terres/ océans	Terres/ océans
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

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 des pixels de l'image. La Fig. 5-13a) 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. 5-13b). 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. 5-14 montre une image SAR de la mer Morte, entre Israël et la Jordanie.

FIGURE 5-13

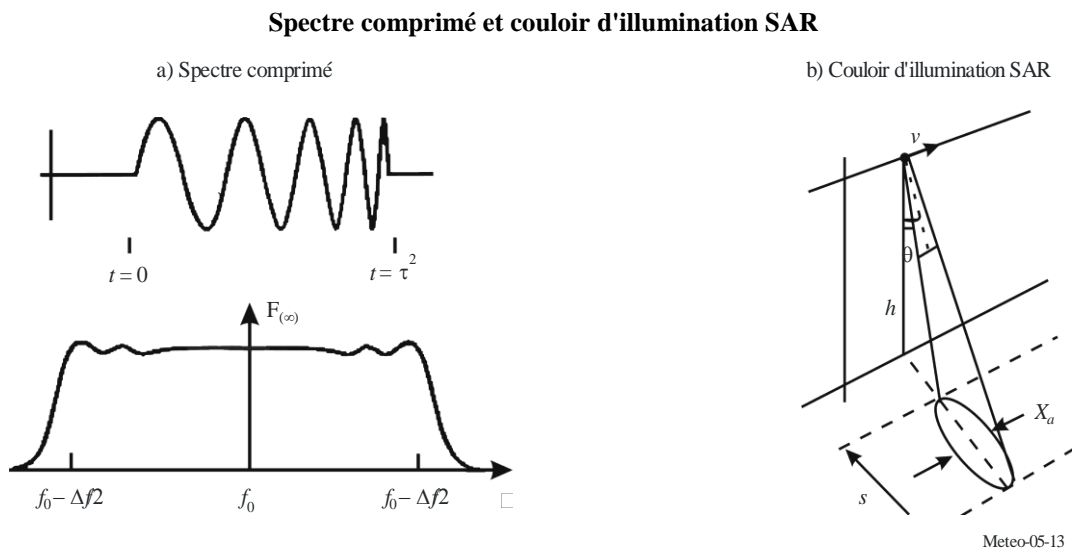


FIGURE 5-14

Image SAR de la mer Morte le long de la Cisjordanie entre Israël et la Jordanie

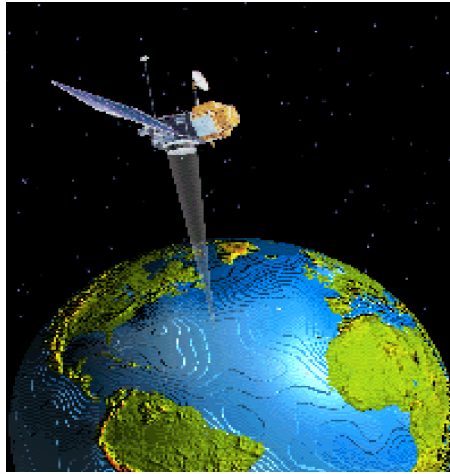
Meteo-05-14

5.3.3 Altimètres

Les altimètres mesurent l'altitude de la surface des océans. Les Fig. 5-15, 5-16a) et 5-16b) 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 Δ_t 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 de 4,2 cm. La dégradation admissible de la qualité prescrite dans la Recommandation UIT-R RS.1166-4 est de 4%.

FIGURE 5-15

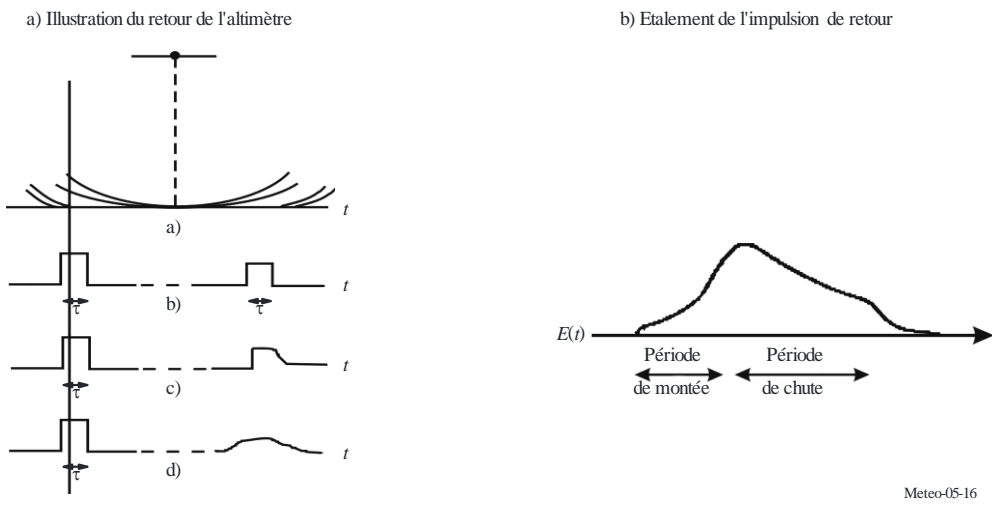
Altimètre à hyperfréquences embarqué à bord d'un satellite



Meteo-05-15

FIGURE 5-16

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



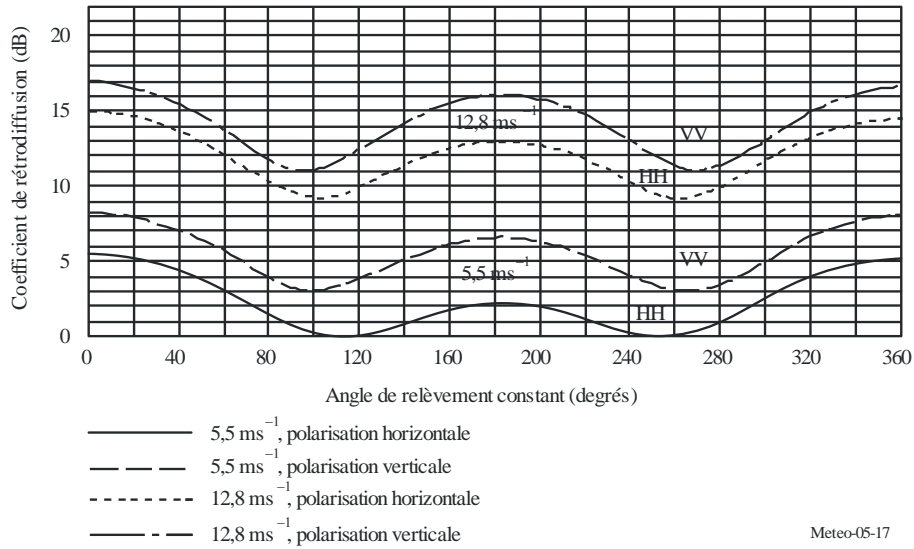
Meteo-05-16

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. 5-17 montre la fluctuation de la rétrodiffusion par rapport à la direction du vecteur vitesse du vent.

FIGURE 5-17

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



Comme on le voit à la Fig. 5-18, un diffusiomètre classique illumine la surface de la Terre à différents angles fixes de relèvement constant. A la Fig. 5-19, 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 5-18

Empreinte fixe du diffusiomètre

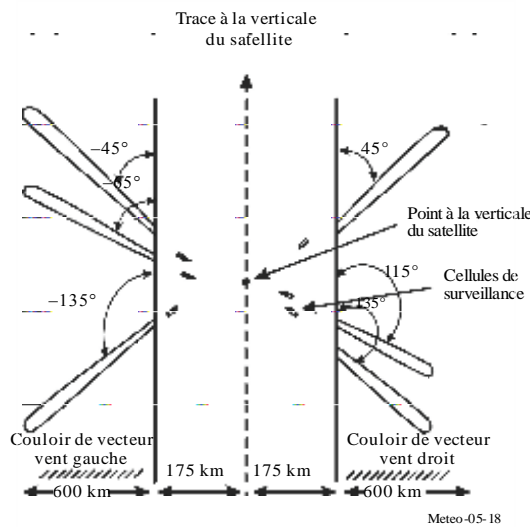
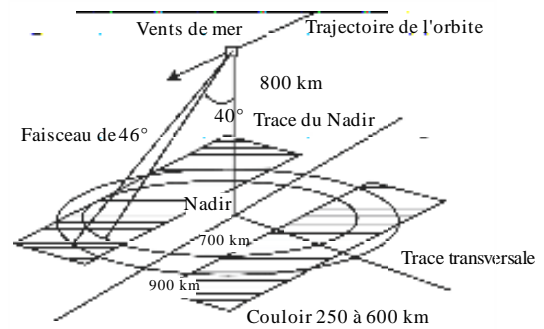


FIGURE 5-19

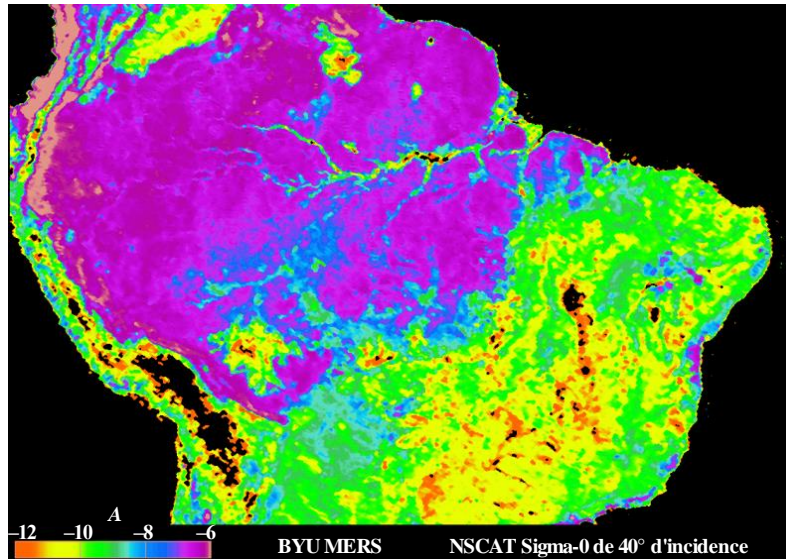
Balayage du faisceau-crayon du diffusiomètre



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. 5-20 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 5-20

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



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:

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

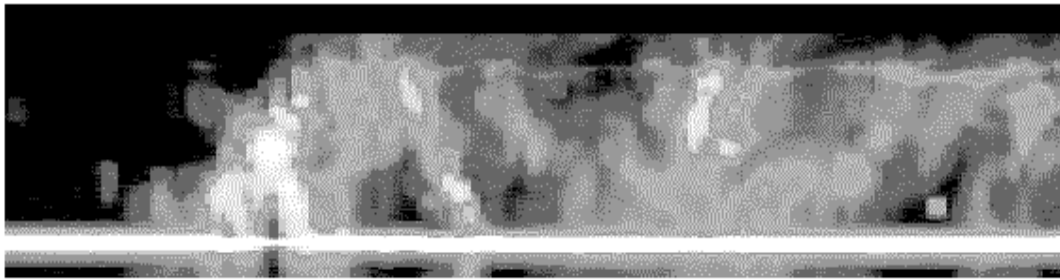
où:

- $|K_W|^2$: 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. 5-21 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 5-21

Réfectivité synthétisée selon les mesures de réfectivité des précipitations

Meteo-05-21

5.3.6 Radars de profil des nuages

Les radars de profil des nuages fournissent un profil tridimensionnel de la réfectivité des nuages au-dessus de la surface de la Terre. La Fig. 5-22 montre un exemple type de réfectivité 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 (5-5) montre comment calculer la puissance de retour des nuages.

$$\tilde{P} = \frac{\pi^5 10^{-17} P_r G^2 t \theta_r^2 |K_W|^2 Z_r}{6.75 \times 2^{14} (\ln 2) r_0^2 \lambda^2 l^2 l_r} \quad \text{mW} \quad (5-5)$$

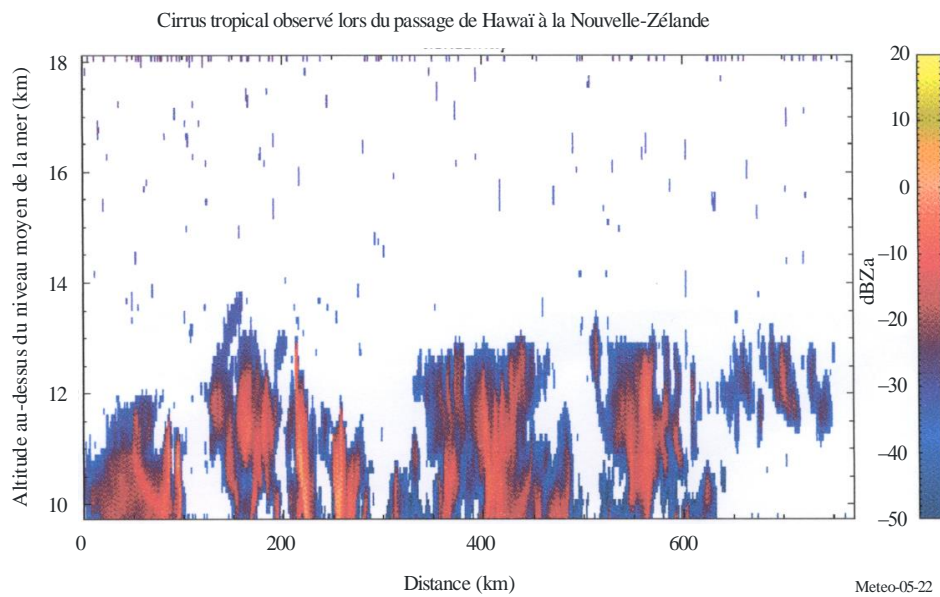
où:

- \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 réfectivité 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 5-22

Exemple de réflectivité d'un cirrus



5.3.7 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.

5.3.8 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
Puissance rayonnée (W)	1 500	20	100	578	630
Gain d'antenne (dB)	36,4	43,3	34	47,7	63,4
Portée (km)	695	1 344	1 145	350	400
Puissance surfacique (dB(W/m ²))	-59,67	-77,25	-78,17	-46,55	-31,64

CHAPITRE 6

**LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION
UTILISÉS EN MÉTÉOROLOGIE**

	Page
6.1 Introduction.....	106
6.2 Les systèmes de diffusion	106
6.3 Les systèmes hydrologiques.....	106
6.4 La radiocommunication appliquée aux systèmes météorologiques et environne-mentaux distants	107
6.5 Les applications météorologiques des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS).....	108
6.6 Les systèmes de détection de la foudre	109
6.7 La télédétection au sol.....	111
6.8 Les systèmes d'aéronef sans pilote.....	112

6.1 Introduction

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, il est nécessaire de recueillir des observations de nombreuses stations distantes, sur la terre ferme et en mer, pour assurer les services météorologiques. Ainsi, le système d'observation météorologique compte sur beaucoup d'autres services de radiocommunication outre les services MetSat, MetAids, de radiolocalisation et SETS décrits dans les premiers chapitres.

Il est par ailleurs primordial que les météorologistes diffusent, dans les délais les plus courts, des informations et des avis aux clients, à la fois dans les zones fortement peuplées et les lieux reculés. En outre, les services météorologiques sont utiles pour les activités maritimes et la navigation aérienne dans le monde entier. Pour diffuser les produits météorologiques, il est fait appel à un large éventail de services de radiocommunication.

6.2 Les systèmes de diffusion

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 pour pouvoir prendre les mesures nécessaires pour assurer la protection des personnes et des biens et, ainsi, sauver des vies.

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; utilisant les ondes métriques, ces systèmes 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 le service mobile maritime. D'autres systèmes utilisent les techniques de radio-télévision (terrestres et satellites) et les liaisons descendantes MetSat.

De nombreuses administrations ont recours aux radiocommunications haute fréquence pour fournir des informations et des avis météorologiques aux navires en mer et aux aéronefs. Ces appareils assurent habituellement les transmissions de la voix et de cartes météorologiques en fac-similé (WEFAX). Toutefois, le manque de fiabilité des hautes fréquences a souvent provoqué leur remplacement par les transmissions satellites.

Enfin, il convient de noter que les systèmes de service fixe par satellite (SFS), via les charges utiles commerciales en bande C (3 400-4 200 MHz) et en bande Ku (10 700-11 700 MHz), sont maintenant utilisés partout dans le monde pour communiquer des informations météorologiques, hydrologiques et climatiques, notamment des avis de risque de sinistre, aux organismes météorologiques et communautés d'utilisateurs. L'utilisation des satellites en bande C est essentielle dans les zones où les conditions de propagation (fortes pluies dans les zones tropicales et équatoriales, par exemple) rendent l'utilisation de tout autre mode de télécommunication impossible.

6.3 Les systèmes hydrologiques

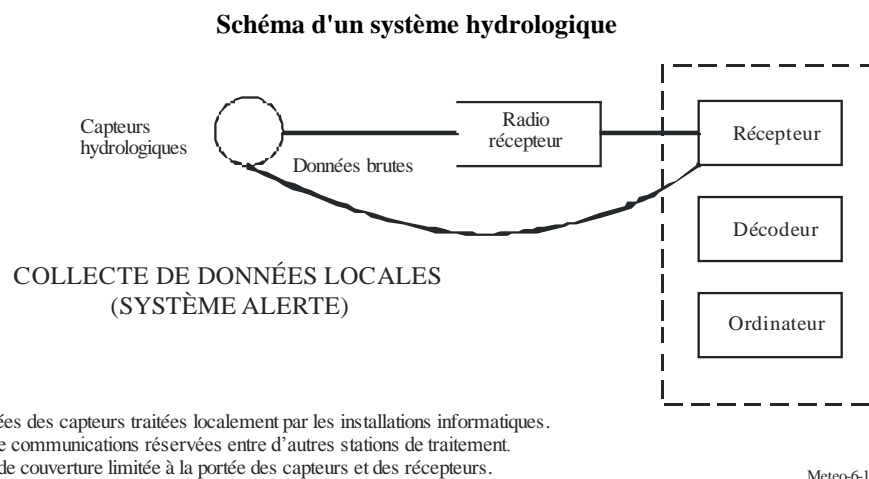
Les crues sont un phénomène naturel inévitable sur la plus grande partie de la planète; les systèmes contribuant à la prévision de leur occurrence, emplacement et ampleur ont permis de sauver de nombreuses vies et une quantité importante de biens. Les informations ainsi obtenues aident à évacuer les populations vulnérables, à construire des digues et des barrages et à relocaliser le plus de biens menacés possible.

Pour compléter les réseaux de radars météorologiques (voir le Chapitre 4) qui sont aujourd'hui essentiels dans le processus hydrologique, on se sert aussi de systèmes hydrologiques spécifiques pour mesurer les précipitations, le niveau des cours d'eau et la hauteur du stock neigeux, informations toutes utiles pour prédire et signaler rapidement les crues, ainsi que pour évaluer la disponibilité des ressources en eau.

Les dégâts moyens annuels causés par les inondations avoisinent actuellement les 4 milliards USD, seulement aux États-Unis d'Amérique. 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 ces pertes. Les systèmes hydrologiques automatisés constituent une solution attrayante en raison de leur faible coût d'exploitation et parce qu'ils peuvent favoriser le recours à d'autres méthodes d'atténuation, comme les réservoirs à vannes, l'assurance contre les crues ou le zonage des plaines inondables.

Un système hydrologique automatisé se compose de capteurs météorologiques et hydrologiques automatisés, axés sur la signalisation d'événements, 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 (voir Fig. 6-1). 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.

FIGURE 6-1



6.4 La radiocommunication appliquée aux systèmes météorologiques et environnementaux distants

Les caractéristiques techniques, y compris les fréquences d'exploitation, de ces systèmes varient beaucoup et presque toutes les bandes de fréquences météorologiques peuvent être employées. 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'information à transmettre. En météorologie, les systèmes distants fixes ont plusieurs utilités et fonctionnent dans un certain nombre de bandes de fréquences. Comme leur nom l'indique, ils sont exploités dans des attributions fixes. Les applications types sont les suivantes:

Modulation de la voix ou liaisons de connexion, permettant d'acheminer les signaux de contrôle ou de données à des stations émettrices de diffusion des données se trouvant souvent dans des endroits isolés (p. ex. au sommet d'une montagne), afin d'optimiser les zones couvertes.

Télécommande du radar, permettant d'acheminer les signaux de retour du radar même (souvent situé dans des lieux reculés) au bureau de traitement des données. Les opérateurs se servent également des ondes radioélectriques pour télécommander l'équipement sur le site radar.

Collecte des données, permettant de transmettre d'une station de collecte éloignée à un service d'archivage central ou un centre de traitement les données recueillies par les capteurs hydrologiques et météorologiques servant à mesurer le vent, la pluie, la température, l'épaisseur de la neige, les secousses sismiques (pour la détection ou la prévision des tremblements de terre), ou tout autre phénomène naturel.

6.5 Les applications météorologiques des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)

Les signaux GPS actuellement transmis à 1 575,42 MHz (L1) et 1 227,6 MHz (L2) (et ceux du système GLONASS) sont utilisés par les météorologistes pour les applications suivantes:

- *Localisation des plates-formes mobiles d'observation météorologique*, par exemple les radiosondes emportées par des ballons météorologiques, les parasondes suspendues à des parachutes, les aéronefs inhabités transportant des capteurs météorologiques (voir le Chapitre 3) ou les systèmes de météorologie maritime comme les bouées océaniques.
- *Synchronisation très précise du temps* entre des stations d'observation éloignées, comme l'exigent, notamment, les systèmes de détection des éclairs (voir le § 6.5).
- *Mesure de la vapeur d'eau totale dans l'atmosphère*, déduite du délai de phase dans les signaux GPS reçus par les récepteurs au sol. Cette mesure nécessite des calculs extrêmement précis pour déterminer la position des divers satellites GPS et la synchronisation de leurs horloges. La position du récepteur au sol doit également être connue de façon très précise. Les récepteurs GPS sont généralement installés sur un bâti fixe convenant à la poursuite de la position de la surface de la Terre ainsi qu'à la fourniture d'informations météorologiques. Ainsi, les mesures peuvent être obtenues comme un sous-produit des observations géodésiques/sismologiques ou à partir des capteurs déployés spécifiquement par les météorologistes. 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 les deux fréquences GPS, L1 et L2. Si l'on connaît la température et la pression de surface, il est possible d'évaluer le délai de phase hydrostatique sèche causé par l'atmosphère, et le délai restant est alors proportionnel à la vapeur d'eau totale sur le trajet du satellite. Le capteur à la surface reçoit des signaux GPS provenant de nombreuses directions en un court laps de temps. Il est, par conséquent, possible d'estimer la vapeur d'eau totale dans le plan vertical et les gradients de la vapeur d'eau totale dans le plan horizontal autour du capteur. Cette technique est pertinente pour les études sur la propagation atmosphérique, car elle permet de mesurer directement la teneur en vapeur d'eau sur un trajet oblique, du récepteur au sol vers un satellite. Voir également [Coster *et al.*, 1997].
- *Mesure de la température et de l'humidité relative en fonction de la hauteur déduite des mesures spatiales par occultation de signaux GPS*: Dans cette application, un récepteur installé à bord d'un satellite indépendant reçoit des signaux en provenance d'une constellation GPS traversant l'atmosphère à une incidence rasante par rapport à la surface de la Terre. On mesure la réfraction des signaux GPS à une série de hauteurs au-dessus de la surface. Cela permet de dériver l'indice de réfraction de l'air en fonction de la hauteur. Aux niveaux supérieurs de l'atmosphère neutre, l'humidité relative est très basse et on peut supposer que l'indice de réfraction de l'air est directement dépendant de la température. Plus près de la surface, sous la tropopause, à la fois la température et la pression partielle de la vapeur d'eau influent sur cet indice. Il est possible d'estimer la pression partielle de la vapeur d'eau si l'on connaît déjà la température à partir d'une autre source. Les mesures des variables météorologiques dérivées de cette technique ont une meilleure résolution verticale que celles effectuées avec des radiomètres passifs orientés sur le nadir (voir le Chapitre 5), mais cela s'égalise sur des distances relativement longues dans le plan horizontal. Comme dans le cas des mesures de la vapeur d'eau totale, cette technique nécessite une synchronisation très précise et la connaissance des positions des deux satellites. On prévoit de recourir à des récepteurs GNSS pour la prochaine génération de satellites météorologiques à orbite polaire.

6.6 Les systèmes de détection de la foudre

Les systèmes de télédétection de la foudre sont aujourd'hui un outil important utilisé par les météorologistes d'exploitation. Les exigences des clients se développent en conjonction de l'évolution de l'utilisation des produits de radars et satellites météorologiques et bénéficient d'une haute priorité avec la nécessité d'automatiser les observations météorologiques de surface dans de nombreux pays industrialisés. La fiabilité de ces systèmes est nettement liée aux notions de sécurité publique sur terre, sur mer et dans les airs. L'efficacité du service de prévision joue un rôle au niveau des 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 fronts d'ondes produits par les coups de foudre. Les données obtenues aux stations de détection peuvent être transmises par les moyens habituels, y compris les liaisons fixes, le téléphone, Internet, etc.

Dans les systèmes opérationnels actuels, la position de l'éclair est déterminée en mesurant la direction d'arrivée de la sphère associée (onde atmosphérique), son temps d'arrivée, ou la combinaison des deux.

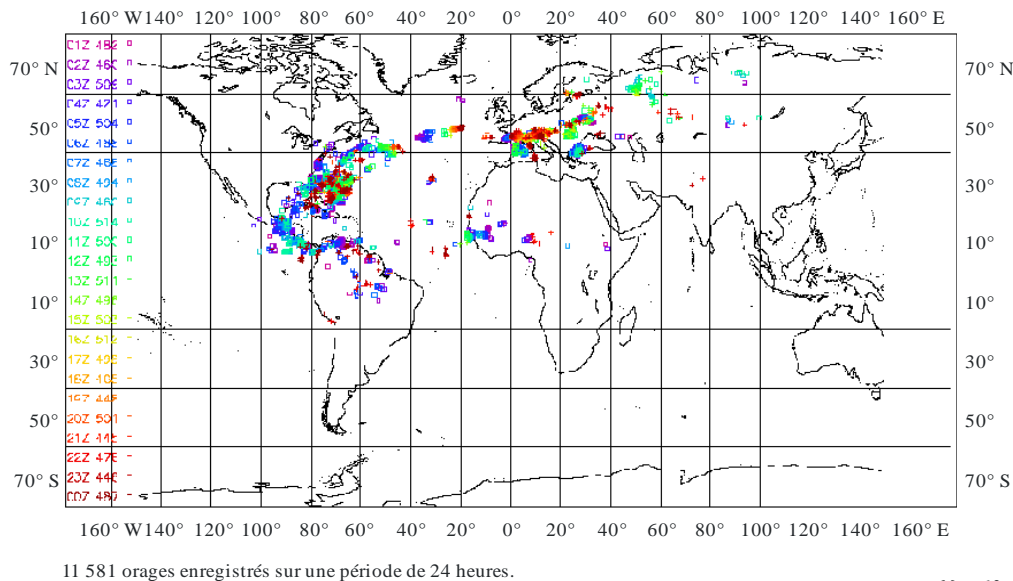
Il faut prendre des mesures à plus de trois stations de détection bien espacées. Le nombre de sites utilisés concrètement est généralement supérieur au minimum requis, afin d'améliorer la fiabilité des localisations. Dans ces applications, les systèmes à temps d'arrivée donnent la plupart du temps des 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 souvent beaucoup aux signaux de radionavigation GPS pour obtenir la synchronisation 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 centrées sur 10 kHz (2-15 kHz) (voir la Fig. 6-2), comme c'est le cas pour le système ATDNET exploité par le Met Office au Royaume-Uni. Dans ce système, les parasites atmosphériques sont reçus à des stations éloignées situées dans le monde entier et espacées jusqu'à 2 000 km. Ceux-ci sont soumis à une analyse de Fourier et reçoivent une indication temporelle aux sites de détection. 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.

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.

FIGURE 6-2

Carte des données sur la foudre pour une journée, établie à partir d'un système grande portée



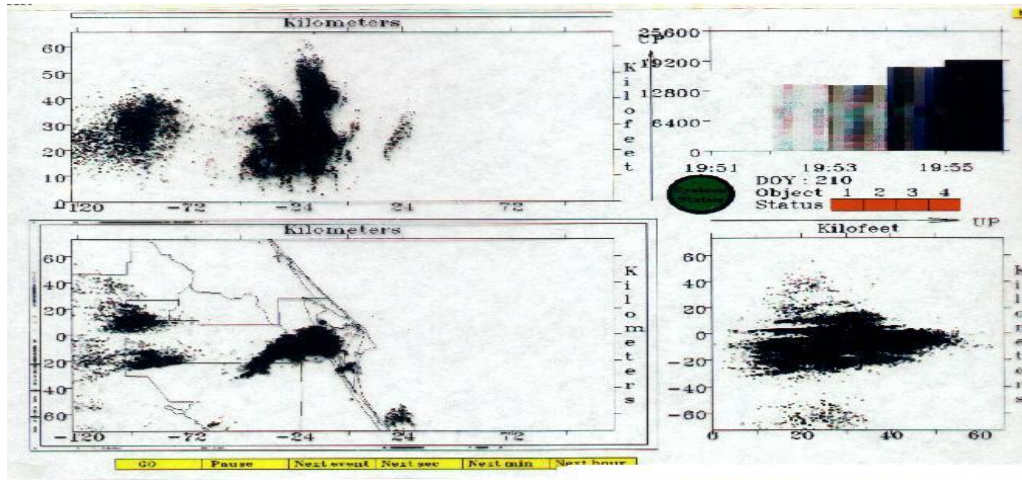
Les systèmes opérationnels les plus couramment employés couvrent en détail une superficie plus limitée. Dans ce cas, les parasites atmosphériques sont observés à des fréquences plus élevées centrées sur 200 kHz (les récepteurs à large bande utilisés sont plus sensibles au milieu de la bande 1-350 kHz) 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. A 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. [Holle et Lopez, 1993] passent en revue différents systèmes de détection des éclairs et [Diendorfer et autres, 1994] traitent des observations réalisées par leur réseau en Autriche.

Dans certaines régions, il est par ailleurs nécessaire d'observer toutes les décharges électriques associées aux orages, qu'elles soient du type nuage-sol ou nuage-nuage. On peut y arriver en ayant recours à des fréquences beaucoup plus élevées (63 MHz et 225 MHz avec le système LDAR (*lightning detection and ranging*), et 110 MHz à 118 MHz avec le système SAFIR (*surveillance et alerte foudre par interférométrie radioélectrique*)). La Fig. 6-3 montre un affichage LDAR en temps réel. Pour que l'ensemble du phénomène soit observé, il faut que les orages demeurent dans la ligne de visée. 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.

L'image inférieure gauche de la Fig. 6-3 montre des données LDAR sur une carte de la côte est de la Floride (partiellement visible). Les données sont ensuite représentées dans l'axe est-ouest (coin supérieur gauche) et nord-sud (coin inférieur droit) en fonction de l'altitude. Soulignons que cette dernière image a été tournée de 90 degrés. Un histogramme (coin supérieur droit) présente les données en cinq tranches d'une minute.

FIGURE 6-3

Affichage LDAR en temps réel



Meteo-6-3

6.7 La télédétection au sol

Les sondages atmosphériques verticaux par télédétection passive par satellite sont décrits en détail au § 5.1. Les météorologistes qui font des prévisions locales détaillées ou les scientifiques qui étudient les limites de la planète ont besoin de sondages atmosphériques présentant une meilleure 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 dans la bande de l'oxygène, entre 50 GHz et 58 GHz, pour mesurer la structure des températures. Les canaux situés entre 21 GHz et 24 GHz sont utilisés pour fournir des informations sur les variations de la vapeur d'eau à la verticale et une observation par fenêtre dans la région de 30 GHz permet d'identifier les nuages. D'autres observations 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.

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 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, les radiomètres au sol bénéficient de la même protection que les systèmes de télédétection par satellite, mais dans d'autres bandes, ils auraient besoin d'une protection adaptée. Les radiomètres au sol en service sont encore relativement peu nombreux, mais leur nombre devrait augmenter dans un avenir proche. On pourrait mettre au point une méthode pragmatique de partage lorsque l'on dispose les radiomètres de manière à éviter le brouillage provenant d'autres services.

La télédétection passive d'autres constituants atmosphériques, comme l'ozone, (en particulier à 142 GHz) devrait également bénéficier de l'augmentation du nombre de radiomètres au sol.

6.8 Les systèmes d'aéronef sans pilote

Les systèmes d'aéronef sans pilote (UAS) deviennent de plus en plus essentiels pour les études météorologiques et l'exploration de la Terre. Ils permettent d'effectuer des observations là où les systèmes traditionnels ne peuvent être déployés, où les vols avec équipage sont impossibles en raison de la durée du vol ou quand les conditions dangereuses l'imposent (par exemple ouragans, cyclones). Les opérations effectuées au moyen d'UAS (2008) aux fins d'études météorologiques utilisent souvent les bandes sans licence pour les systèmes de commande et de contrôle du système aérien, même si des bandes avec licence sont utilisées par certains systèmes. Les UAS sont utilisés notamment pour le largage de routine de parasondes au-dessus des zones océaniques sur lesquelles on manque de données, les vols au travers d'ouragans et de cyclones pour la collecte *in situ* de données, la reconnaissance aérienne dans les zones où les conditions météorologiques sont difficiles ou dans les zones touchées par la sécheresse, et enfin la surveillance de la fonte des glaces arctiques.

L'utilisation d'UAS aux fins d'analyses météorologiques améliore et accélère la prévision du tracé des ouragans et permet de mieux comprendre le climat. Le spectre de fréquences utilisé par les systèmes de commande et de contrôle d'UAS est également exploité pour la transmission des données de la charge utile. Ceci peut se faire dans les bandes attribuées aux fins d'analyse météorologique (MetAids) ou, selon le volume de données, dans d'autres bandes de fréquences.

Références

- 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, No. 6, juin 1981.
- BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, National Bureau of Standards Monograph 92, US Government Printing Office, Washington DC, Etats-Unis d'Amérique.
- 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, Etats-Unis d'Amérique.
- COSTER, A. J., NIELL, A. E., BURKE, H. K. et CZERWINSKI, M. G. [décembre 1997] The westford water vapor experiment: use of GPS to determine total precipitable water vapour. MIT/Lincoln Laboratories.
- DIENDORFER et autres [1994] Results of performance analysis of the Austrian lightning location network. ALDIS, Vingt deuxième Conférence internationale sur la protection contre la foudre, Budapest, Hongrie.
- DOVIK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- DOVIK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations, 2nd Ed.* Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- DOVIK, R. J., ZRNIC, D. et SIRMANS, D. [novembre 1979] *Doppler Weather Radar. Proc. IEEE*, Vol. 67, 11.
- DOVIK, 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 No.2, février 1978, American Meteorological Society.
- FABRY, F. [2015] *Radar Meteorology – Principles and Practice*, Cambridge University Press, University Printing House, Cambridge, Royaume-Uni.
- GOSSARD, E. E. et STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, New York, Etats-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.
- HOLLE, R. L. et LOPEZ, R.E. [1993] Overview of real-time lightning detection systems and their meteorological uses. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-102, National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, Etats-Unis d'Amérique, p. 68.

- IEEE [2002] *IEEE Standard Letter Designations for Radar Frequency Bands*, IEEE New York, Etats-Unis.
- PALMER, R. et ISOM, B. [février 2006] Mitigation of Wind Turbine Clutter on the WSD88D Network. School of Meteorology. University of Oklahoma, Radar Operations Center Presentation.
- RHEINSTEIN, J. [1968] *Backscatter from Spheres: A Short Pulse View*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **AP16**, No. 1, janvier 1968.
- SIRMANS, D, *WSR-88D Antenna Polarization Change*, Titan Corporation, rapport au WSR-88D Operational Support Facility, 15 janvier 1993, disponible auprès du WSR-88D Radar Operations Center.
- 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.
- SKOLNIK, M., [1990] *Radar Handbook*, Ch. 6, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, Etats-Unis.
- 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.

Textes de l'UIT-R

- Recommandation UIT-R F.699-7 – Diagrammes de rayonnement de référence pour antennes de systèmes hertziens fixes à utiliser pour les études de coordination et l'évaluation du brouillage dans la gamme de fréquences comprise entre 100 MHz et environ 70 GHz
- Recommandation UIT-R F.1245-2 – Modèle mathématique de diagrammes de rayonnement moyens et de diagrammes de rayonnement connexes pour antennes de systèmes hertziens fixes en visibilité directe point à point, à utiliser dans certaines études de coordination et pour l'évaluation du brouillage dans la gamme de fréquences comprise entre 1 GHz et environ 70 GHz
- Recommandation UIT-R M.1652-1 – Utilisation de la sélection dynamique des fréquences dans les systèmes d'accès hertzien, y compris les réseaux locaux hertziens, aux fins de protection du service de radiorepérage dans la bande des 5 GHz
- Recommandation UIT-R M.1849-1 – Aspects techniques et opérationnels des radars météorologiques au sol
- Recommandation UIT-R RS.515 – Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées pour la télédétection passive par satellite.
- Recommandation UIT-R RS.577 – Bandes de fréquences et largeurs de bande nécessaires utilisées pour les capteurs actifs à bord de satellites fonctionnant dans le service d'exploration de la Terre par satellite (active) ou dans le service de recherche spatiale (active)
- Recommandation UIT-R RS.1166 – Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage applicables aux capteurs spatiaux actifs.
- Recommandation UIT-R RS.2017 – Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage pour la télédétection passive par satellite

Bibliographie

- BROOKNER, E. ed. [1988] *Aspects of Modern Radar*, Artech House, Boston, Etats-Unis d'Amérique.
- DIBBERN, J., MONNA, W., NASH, J. et PETERS, G. (Ed.) [mars 2000] COST Action 76. Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Rapport final. Commission européenne, Direction générale Science, Recherche et Développement.
- DOVIK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1993] Doppler radar and weather observations. Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- DOVIK, R., ZRNIC, D. et SIRMANS, D. [novembre 1979] Doppler Weather Radar. Proc. IEEE, Vol. 67, 11.
- ECC Report 90 – Compatibility of wind profiler radars in the Radiolocation Service (RLS) with the Radionavigation Satellite Service (RNSS) in the band 1 270-1 295 MHz.
- ELACHI, DR. C. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, New York, Etats-Unis d'Amérique.
- Elena SALTIKOFF, John Y. N. CHO, Philippe TRISTANT, Asko HUUSKONEN, Lynn ALLMON, Russell COOK, Erik BECKER, et Paul JOE "The threat to weather radars by wireless technology" Bulletin of the American Meteorological Society, juillet 2016.
- HOBAN, N. P., CUNNINGHAM, J. G. et Zittel, D. W. [2014] *Estimating Systematic WSR-88D Differential Reflectivity (ZDR) Biases Using Bragg Scattering*, 30th Conference on Environmental Information Processing Technology, American Meteorological Society.
- Intercomparison of Techniques to Correct for Attenuation of C-Band Weather Radar Signals. J. Applied Meteorology: Vol. 37, 8, p. 845-853.
- KAWASAKI, Z. I., YAMAMOTO, K., MATSURA, K., RICHARD, P., MATSUI, T., SONOI, Y. et SHIMOKURA, N. [1994] SAFIR operation and evaluation of its performance, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, 12, p. 1133-1136.
- LAW, D. et al. [March 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, NTIA Report 93-301, 63 pages. National Telecommunications and Information Administration.
- 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*.
- LENNON, C. et MAIER L. [1991] Lightning mapping system. Proc. of International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Cocoa Beach, FL., Etats-Unis d'Amérique. NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1-89-10.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Report No. 69.
- MCLAUGHLIN, D. J., CHANDRASEKAR, V., DROEGEMEIER, K., FRASIER, S., KUROSE, J., JUNYENT, F., PHILIPS, B., CRUZ-POL, S. et COLOM, J. [janvier 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.
- PROBERT-JONES, J. R. [1962] *The Radar Equation in Meteorology*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 88.
- SESSIONS, W. B. [décembre 1995] SARSAT SARP instrument performance when receiving emissions from NOAA 404 MHz wind profiler radars, NOAA, NESDIS, E/SP3, 87 pages.
- SKOLNIK, M. [1990] Radar Handbook. Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, Etats-Unis d'Amérique.
- OMM Guide des instruments et de méthodes d'observation météorologiques, n° 8, Organisation météorologique mondiale.

Annexe 1

Acronymes et abréviations courants en météorologie

A		APT	Transmission automatique des images
A/D	Analogique-numérique	ARGOS	Système de localisation et de collecte de données des satellites NOAA
AAAS	American Association for the Advancement of Science	ASC	Agence spatiale canadienne
AARS	Système de transmission automatique des observations d'aéronefs	ASCII	Code normalisé américain pour l'échange d'information
AA VMM	Activités d'appui à la VMM	ASE	Agence spatiale européenne
ABSN	Réseau synoptique de base de l'Antarctique	ASIC	Circuit intégré à application spécifique
ACARS	Système embarqué de communication, d'adressage et de compte rendu	ATMS	Sondeur hyperfréquence de haute technologie (NPOESS/NASA)
ACMAD	Centre africain pour les applications de la météorologie au développement	ATOVS	Sondeur vertical opérationnel perfectionné de TIROS
ADC	Convertisseur analogique-numérique	ATSR	Radiomètre à balayage longitudinal
ADEOS	Satellite de pointe d'observation de la Terre (Japon)	AVCS	Système de caméra Vidicon perfectionné
AFC	Contrôle de fréquence automatique	AVHRR	Radiomètre perfectionné à très haute résolution
AGRHYMET	Centre régional de formation, de recherche et d'application en agrométéorologie et en hydrologie opérationnelle	AWIPS	Système avancé de traitement météorologique interactif
		B	
AIMSA	Association internationale de la météorologie et des sciences de l'atmosphère	BPS	bits par seconde
AIRS	Sondeur infrarouge avancé à haute résolution (NASA)	BR	Bureau des radiocommunications de l'UIT
AISH	Association internationale des sciences hydrologiques	C	
AM	Modulation d'amplitude	C/N0	Rapport porteuse-densité de bruit
AMDAR	Retransmission des données météorologiques d'aéronefs	CAG	Commande automatique de gain
AMI	American Meteorological Society	CCI	Commission de climatologie
AMSR	Radiomètre perfectionné hyperfréquence à balayage	CCADC	Comité consultatif pour les applications et les données climatologiques
ANSI	American National Standards Institute	CCD	Dispositif à charge couplée
AOPC	Groupe d'experts des observations atmosphériques pour l'étude du climat	CCIR	Comité consultatif international des radiocommunications, voir UIT-R
		CCRS	Centre de télédétection canadien

C (suite)		COI	Commission océanographique intergouvernementale
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems	CONUS	Zone continentale des Etats-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
CEPMMT	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	Balayeur 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	EUV	Ultraviolet extrême
DUS	Système d'utilisation des données	F	
E		FAX	Fac-similé
E&M	Exploitation et maintenance	FC	Fausse couleur
EBR	Enregistreur à faisceau d'électrons	FCC	Composition fausse couleur
		FCC	Federal Communications Commission

F (suite)		GOSSP	Groupe d'experts de la composante spatiale des systèmes mondiaux d'observation
FFT	Transformation de Fourier rapide		
FI	Fréquence intermédiaire	GPCP	Projet mondial de climatologie des précipitations
FIFO	Premier entré-premier sorti		
FM	Modulation de fréquence	GPS	Système mondial de radiorepérage, Système de positionnement global
FOV	Champ		
fps	Images par seconde	GPSOS	Capteur d'occultation GPS
FRI	Fréquence de répétition des impulsions	GRC	Glenn Research Center, ancien Lewis Research Center (LeRC)
FSK	Modulation par déplacement de fréquence	GRT	GOES temps réel (base de données)
FSS	Logiciel d'établissement des plans de vol	GSFC	Centre des vols spatiaux Goddard
FTM	Fonction de transfert de modulation	GSN	Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC
G		GSTDN	Ground Spaceflight Tracking and Data Network
GAME	Expérience GEWEX sur la mousson d'Asie	<i>G/T</i>	Rapport gain d'antenne/température de bruit du système (dB/K)
GARP	Programme de recherches sur l'atmosphère globale	GTOS	Système mondial d'observation de l'environnement terrestre
GARS	Système d'archivage et de restitution des satellites GOES	GUAN	Réseau de stations d'observation en altitude du SMOC
GCIP	Projet international d'échelle continentale (GEWEX)	GVAR	Données GOES
GDTA	Groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale	H	
GEO	Orbite géostationnaire terrestre	HEPAD	Détecteur de particules alpha et de protons à haute énergie
GEWEX	Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau	HiRID	Données d'imageur à haute résolution
GHz	Gigahertz	HIRS	Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution (TIROS)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	HR	Humidité relative
GIMGSP	Projet de système au sol GOES I-M	HRIS	Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution ou interféromètre de sondage à haute résolution
GIMTACS	Système de télémessure et de télécommande GOES I/M	HRPT	Transmission des images à haute résolution
GMACS	Système de surveillance et de contrôle GOES (remplacé par GIMTACS)	Hz	Hertz (remplace cycles par seconde)
GMS	Satellite météorologique géostationnaire	I	
GMT	Greenwich Mean Time	IASI	Interféromètre de sondage atmosphérique dans l'infrarouge
GNSS	Systèmes mondiaux de navigation par satellite	ICSAR	International Committee for Search and Rescue
GOES	Satellite géostationnaire d'exploitation pour l'étude de l'environnement	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GOMS	Satellite météorologique d'exploitation géostationnaire	IFOV	Champ de vision instantanée
GOOS	Système mondial d'observation de l'océan	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	Echange 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
ISSETAP	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 nocturne 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	NRCT	Conseil national de recherches thaïlandais
MODIS	Spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (NASA)	NROSS	Navy Remote Ocean Sensing System
MOPITT	Mesure de la pollution dans la troposphère (NASA)	NRSA	National Remote Sensing Agency
MOS	Satellite d'observation de la mer (Japon)	NRZ	Sans retour au zéro
mrad	Milliradian	NRZ-L	Sans retour au niveau zéro
MRF	Multiplexage par répartition en fréquence	NSI	Navigation et superposition d'images
MSFC	Centre des vols spatiaux Marshall	NSSFC	National Severe Storms Forecast Center
MSI	Imagerie multispectrale	NSSL	National Severe Storms Laboratory
MSS	Radiomètre multispectral	nT	Nanotesla
MSU	Sondeur à hyperfréquences	O	
MTBF	Temps moyen entre deux pannes	OAD	Détermination d'attitude et d'orbite
MUX	Multiplexeur	OAR	Bureau de la recherche océanique et atmosphérique
MW	Volant d'inertie, onde moyenne ou mégawatt	OCTS	Scanner de la couleur et de la température de l'océan
N		OMI	Ozonomètre
N-S	Nord-sud	OMM	Organisation météorologique mondiale
NASA	Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace	OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS)
NASCOM	Réseau de télécommunications de la NASA	OOPC	Groupe sur les observations océaniques pour l'étude du climat
NASDA	Agence nationale de développement spatial	OQPSK	Modulation par déplacement de phase à quatre états non équilibrés
NCDC	Centre national de données climatologiques	P	
ND	Nœud descendant	p.-p.	Crête à crête
NE-delta-N	Différence de luminance énergétique équivalente au bruit	PA	Amplificateur de puissance
NE-delta-T	Différence de température équivalente au bruit	PCD	Plate-forme de collecte de données
NERC	Conseil national de la recherche sur l'environnement	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/NO	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)		TOMS	Spectromètre imageur d'ozone total
SXI	Imageur de rayons X solaires	TOS	Système opérationnel de TIROS
SXT	Télescope de rayons X solaires (mission Solar-A)	TOVS	Sondeur vertical opérationnel de TIROS
T		tr/min	Tours par minute
T/P	Topex/Poseidon	TRMM	Mission pour la mesure des pluies tropicales
T/V	Vide thermique	TRUCE	Expérience sur le climat urbain dans les régions tropicales
T&C	Télémetrie et télécommande	TV	Vide thermique ou télévision
TAD	Télécommande et acquisition des données	TVM	Mode VAS transparent
TAD	Traitement automatique des données	U	
TADW	Station de télécommande et d'acquisition des données (îles Wallops)	UCT	Unité centrale de traitement
TBUS	Code de 4 lettres pour message de données d'éphémérides	UHF	Ondes décimétriques
TDRS	Satellite de poursuite et d'acquisition de données	UIT	Union internationale des télécommunications
TDRSS	Système à satellites de poursuite et d'acquisition de données	UIT-R	Secteur des radiocommunications de l'UIT (remplace le CCIR)
TEB	Taux d'erreur sur les bits	μrad	Microradian
TED	Détecteur d'énergie totale	μs	Microseconde
TEMS	Système de surveillance des écosystèmes terrestres	UTC	Temps universel coordonné
TEMSI	Temps significatif	UV	Ultraviolet
TES	Spectromètre d'étude des émissions de la troposphère	V	
TIR	Infrarouge thermique	VAG	Veille de l'atmosphère globale
TIP	Processeur d'information de TIROS	VAS	Sondeur atmosphérique du VISSR
TIROS	Satellite d'observation télévisuelle à infrarouge	VDB	Base de données du VISSR
TM	Instrument de cartographie thématique	VDUC	Centre d'utilisation des données VAS
TMG	Temps moyen de Greenwich	VHF	Ondes métriques
TMI	Imageur en hyperfréquence TRMM	VIIRS	Radiomètre-imageur dans le visible et l'infrarouge (NPOESS)
TMR	Radiomètre hyperfréquence Topex	VIP	Processeur d'images VAS
TO	Orbite de transfert	VIRGS	Système de carroyage et de superposition d'images du VISSR
TOGA	Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe	VISSR	Radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge
TOPC	Groupe d'experts des observations terrestres pour l'étude du climat	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		X	
WAFC	Centre mondial de prévisions de zone	XBT	Bathythermographe non récupérable
WEFAX	Transmission de données météorologiques en fac-similé	XRI	Imageur de rayons X
WHYCOS	Système mondial d'observation du cycle hydrologique	XRS	Capteur de rayons X (solaires)
WSFO	Weather Service Forecast Office	Z	
WSFO-Tap	Liaison de communications au sol du WSFO pour la retransmission des données GOES	Z	Notation courante du temps universel ou du temps moyen de Greenwich

Union
internationale des
télécommunications
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

ISBN 978-92-61-24882-6 SAP id



9 7 8 9 2 6 1 2 4 8 8 2 6 | 4 1 4 2 3

Imprimé en Suisse
Genève, 2017

Crédits photo: Shutterstock