



Manuel

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

Edition 2008

Bureau des radiocommunications





Manuel

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

Edition 2008

Bureau des radiocommunications



© OMM-UIT 2009

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'OMM et de l'UIT.

PREFACE

«Le changement climatique est le défi moral que doit relever notre génération ...»

Ban Ki-moon, Secrétaire général des Nations-Unies

Résolution 4 du quinzième Congrès météorologique mondial (Cg-XV) de l'OMM, tenu en 2007:

considérant

l'importance capitale que revêtent les questions relatives aux fréquences radioélectriques pour les activités et la recherche météorologiques et environnementales connexes, ainsi que pour les efforts de réduction du risque de catastrophe naturelle;

...

notant en outre

que les bandes de fréquences radioélectriques attribuées à la télédétection spatiale passive constituent une ressource naturelle unique de par leurs caractéristiques spéciales et leur rayonnement naturel pour les mesures de l'atmosphère et de la surface du sol et qu'elles doivent être protégées absolument;

...

prie instamment tous les Membres

de faire tout ce qui est en leur pouvoir, aux niveaux national, régional et international, pour protéger les bandes de fréquences radioélectriques appropriées et garantir leur disponibilité;

...

demande instamment à l'Union internationale des télécommunications et aux administrations de ses Etats Membres

(1) d'assurer la protection absolue des bandes de fréquences radioélectriques attribuées à la télédétection spatiale passive;

(2) de prêter toute l'attention voulue aux besoins de l'OMM en matière d'attribution de fréquences radioélectriques et de dispositions réglementaires pour les activités météorologiques et environnementales connexes d'exploitation et de recherche;

...

Résolution 673 de la Conférence mondiale sur les radiocommunications de l'UIT, tenue à Genève en 2007 (CMR-07):

considérant

a) que les moyens d'observation de la Terre *in situ* et à distance dépendent de la disponibilité des fréquences radioélectriques d'un certain nombre de services radio, permettant un large éventail d'applications de télédétection passive et active sur des plateformes satellitaires ou terrestres;

...

c) 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;

...

prend la résolution d'inviter l'UIT-R

à procéder à des études sur les moyens envisageables pour améliorer la reconnaissance du rôle essentiel et de l'importance, à l'échelle mondiale, des applications relatives à l'observation de la Terre, ainsi que la connaissance de ces applications et la compréhension de leurs avantages par les administrations,

....

Entre 1980 et 2005, la Terre a connu plus de 7 000 catastrophes naturelles qui ont coûté la vie à plus de 2 millions de personnes et entraîné des pertes économiques estimées à plus de 1,2 trillion de dollars US. Quatre-vingt-dix pour cent de ces catastrophes naturelles, 72% des victimes et 75% des pertes économiques ont été causées par des problèmes liés au temps, au climat et à l'eau: sécheresses, inondations, tempêtes violentes, cyclones tropicaux, etc. Les applications radio, comme les appareils de télédétection, 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 du changement climatique ou tout du moins de s'y adapter.

L'OMM et l'UIT travaillent en partenariat depuis 135 ans et les conditions de leur collaboration sont excellentes. L'OMM s'efforce de mettre à disposition des informations sur l'environnement et les ressources correspondantes utilisant le spectre des fréquences radioélectriques, tandis que l'UIT, préposé international au spectre, attribue les fréquences radioélectriques nécessaires pour garantir le fonctionnement sans interférences des applications radio et des systèmes de radiocommunication (terrestres et spatiaux) utilisés pour la surveillance et la prévision des changements climatiques, pour les prévisions météorologiques et pour détecter et signaler rapidement toute catastrophe naturelle probable.

Plusieurs Conférences mondiales successives de l'UIT sur les radiocommunications ont pris en compte les besoins de l'OMM en vue de protéger les bandes de fréquences radioélectriques appropriées et de garantir leur disponibilité pour les outils d'observation, comme les radiosondes, les radars météorologiques et profileurs de vent et les sondeurs spatiaux infrarouges et hyperfréquences.

Le système d'information de l'OMM (SIO) mobilise d'autres technologies de l'information et des communications non abordées dans le présent manuel, comme des ordinateurs et liaisons de télécommunications filaires et par satellite. Les opérations de développement et d'exploitation de ce système sont régies par plusieurs normes techniques de l'UIT (Recommandations UIT-R et UIT-T).

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 est une nouvelle illustration de l'excellente coopération entre l'UIT et l'OMM. Il a été rédigé 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. E. Marelli (ASE), et par les membres du Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques de la Commission CBS (Commission for Basis Systems) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), sous la présidence de M. P. Tristant (Météo France).

Ce Manuel donne des informations techniques complètes sur le fonctionnement des 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, télédétection spatiale, etc. Il s'adresse à tous les membres intéressés de la communauté de la météorologie (temps, eau et climat) et des radiocommunications, y compris les institutions publiques et l'industrie, et au grand public.



Michel JARRAUD
Secrétaire général

Organisation météorologique mondiale



Hamadou TOURE
Secrétaire général

Union internationale des télécommunications

TABLE DES MATIERES

| | <i>Page</i> |
|---|-------------|
| AVANT-PROPOS..... | vii |
| INTRODUCTION..... | ix |
| CHAPITRE 1 – LA STRUCTURE DES SYSTÈMES MÉTÉOROLOGIQUES..... | 1 |
| CHAPITRE 2 – LE SERVICE DE MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (MetSat)..... | 7 |
| CHAPITRE 3 – LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE | 17 |
| CHAPITRE 4 – LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES | 33 |
| CHAPITRE 5 – LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE PASSIVE ET ACTIVE POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES..... | 61 |
| CHAPITRE 6 – LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION UTILISÉS EN MÉTÉOROLOGIE | 89 |
| ANNEXE 1 – ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS COURANTS EN MÉTÉOROLOGIE | 97 |

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 (MetAids), 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 météorologiques et des avertissements 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, sous la direction générale du service de radiolocalisation.

La météorologie tient une place importante dans notre vie de tous les jours et beaucoup de nos préoccupations quotidiennes y sont liées. Le bulletin météo est probablement le programme le plus suivi à la télévision et à la radio. Si le temps influence nos choix vestimentaires et nos loisirs, ses implications sont également nombreuses sur la sécurité publique; pour les transports publics par exemple, dont la sécurité dépend beaucoup de la précision des prévisions météorologiques. Et, en cette période de forts dérèglements climatiques et météorologiques, cette activité est indispensable pour prévoir et détecter les catastrophes naturelles de manière à en atténuer les conséquences.

La principale activité de la Commission d'études consiste à formuler des Recommandations et à organiser les Conférences mondiales sur les 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 naturelles, rendant les prévisions correspondantes extrêmement difficiles voire impossibles.

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) et M. Jean-Michel Rainer (OMM), ainsi que M. Edoardo Marelli (ASE), Président du GT 7C de l'UIT-R, et M. Philippe Tristant (Météo France), Président du SG-RFC de l'OMM, qui ont dirigé le projet. Toute notre reconnaissance va également à M. A. Vassiliev (Bureau des radiocommunications) qui a largement contribué à la parution de cet ouvrage.

Vincent Meens
Président de la Commission d'études 7
des radiocommunications

INTRODUCTION

Pouvoir prévoir suffisamment à l'avance les catastrophes naturelles et environnementales, effectuer des prévisions justes du climat et comprendre en détail l'état des ressources d'eau mondiales: tels sont les enjeux prioritaires de la communauté mondiale au quotidien. Ce sont les services météorologiques nationaux, partout dans le monde, qui fournissent ces informations, utiles pour la protection de l'environnement, le développement économique (transports, énergie, agriculture, etc.) et la sécurité des personnes et des biens.

Les fréquences radioélectriques sont des ressources rares sur lesquelles s'appuient les services météorologiques nationaux pour collecter et mesurer les données d'observation et effectuer ensuite des analyses et des prévisions, jusqu'aux alertes. L'information est ensuite diffusée aux gouvernements, aux autorités de réglementation, aux organismes chargés de gérer les catastrophes, aux intérêts commerciaux et au grand public.

D'un point de vue plus général, il convient de souligner l'importance capitale des fréquences radioélectriques pour toutes les activités d'observation de la Terre, et plus particulièrement pour les activités liées au réchauffement mondial et aux changements climatiques.

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 (ex. pour les radiosondes ou les satellites), les radars (de mesure des précipitations et profileurs de vent), les systèmes de détection radio (ex. télédétection passive par satellite ou détection des éclairs).

Les fréquences radioélectriques sont donc une ressource rare et pourtant essentielle de la communauté météorologique.

Il faut comprendre que ces applications des fréquences radioélectriques sont liées entre elles et qu'elles composent 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'avis et les prévisions 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 de signalement rapide 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 en extraire plusieurs quantités différentes. Les fréquences radioélectriques nécessaires pour ce faire sont déterminées par la physique fondamentale et sont inaltérables. La poursuite des observations au moyen de ces bandes est également indispensable pour continuer de surveiller et d'évaluer 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. En reconnaissance de l'importance majeure des services spécifiques de radiocommunications pour les activités météorologiques et environnementales connexes nécessaires pour la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement, les études sur les changements climatiques et la recherche scientifique, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) demande instamment, dans sa Résolution 4 (Cg-XV), à l'Union internationale des télécommunications (UIT) et aux administrations de ses Etats Membres:

- de maintenir la disponibilité et de protéger absolument les bandes de fréquences radioélectriques qui, de par leurs caractéristiques physiques spéciales, constituent une ressource naturelle unique pour la télédétection spatiale passive de l'atmosphère et de la surface de la Terre,

- de prêter toute l'attention voulue aux besoins de l'OMM en matière d'attribution de fréquences radioélectriques et de dispositions réglementaires pour les activités météorologiques et environnementales connexes d'exploitation et de recherche.

A cet égard, les dernières Conférences mondiales sur les radiocommunications (CMR-03 et CMR-07) ont bloqué plusieurs attributions de fréquences, notamment pour protéger la télédétection passive par satellite, sous la direction du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (télédétection passive). De prochaines CMR, comme celle de 2011, étudieront la possibilité de nouvelles attributions de fréquences à différents services scientifiques, ce qui permettra d'améliorer ou tout du moins de préserver les fréquences météorologiques.

Les récents débats sur le partage des bandes de fréquences utilisées par les systèmes météorologiques ont donné lieu à une profusion d'études de l'UIT et de son Secteur des radiocommunications (UIT-R) sur la manière de permettre l'utilisation du spectre à d'autres secteurs que la seule météorologie. On a soigneusement analysé les besoins ainsi que les questions de compatibilité technique (possibilité, et selon quelles conditions, de partage du spectre entre les nouvelles technologies et les systèmes météorologiques en place et futurs). Dans certains cas, ces études ont montré que le partage d'un même canal est irréalisable et que l'élargissement du spectre auquel peuvent accéder les nouvelles technologies nécessiterait le déplacement des usagers actuels, ce qui soulève bien sûr plusieurs questions:

- L'estimation du spectre nécessaire aux nouvelles technologies est-elle réaliste?
- Devrait-on obliger les utilisateurs actuels à libérer une vaste partie ou la totalité d'une bande?
- Les usagers de la météorologie ont-ils les moyens de changer de bande? Il faut noter d'ailleurs que tous les systèmes en place ne sont pas exploités par des nations riches ou des entreprises privées et que, plus particulièrement, les bandes de fréquences utilisées par la télédétection passive sont celles dictées par les lois de la physique et qu'on ne les retrouve pas ailleurs dans le spectre.
- Une aide financière pourrait-elle être procurée, éventuellement, par les nouvelles technologies qui réalisent des bénéfices? Et quel rapport pourrait-on établir entre ces éventuels bénéfices et les impacts économiques et sociétaux de la météorologie?
- Advenant un déplacement, combien de temps faudrait-il pour que les anciens utilisateurs puissent occuper une autre bande?

C'est pour mettre ces études en perspective que le présent Manuel a été rédigé par le Groupe de Travail des radiocommunications GT 7C «Télédétection» de la Commission d'études 7 des radiocommunications (CE 7) et par le Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques (SG-RFC) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), à l'attention des usagers, à titre professionnel, des données provenant des systèmes météorologiques basés sur la radiocommunication, des particuliers et des gouvernements desservis par ces systèmes et du secteur des radiocommunications, y compris les régulateurs et le secteur des télécommunications sans fil.

L'ouvrage 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 indésirable 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 MÉTÉOROLOGIQUES**

| | <i>Page</i> |
|---|-------------|
| 1.1 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..... | 4 |
| 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..... | 6 |
| 1.2.3 Le Programme d'hydrologie et de mise en valeur des ressources en eau..... | 6 |
| 1.3 Futurs programmes pour les systèmes d'observation de l'OMM: le système mondial intégré des systèmes d'observation de l'OMM (WIGOS) | 6 |

1.1 La Veille météorologique mondiale

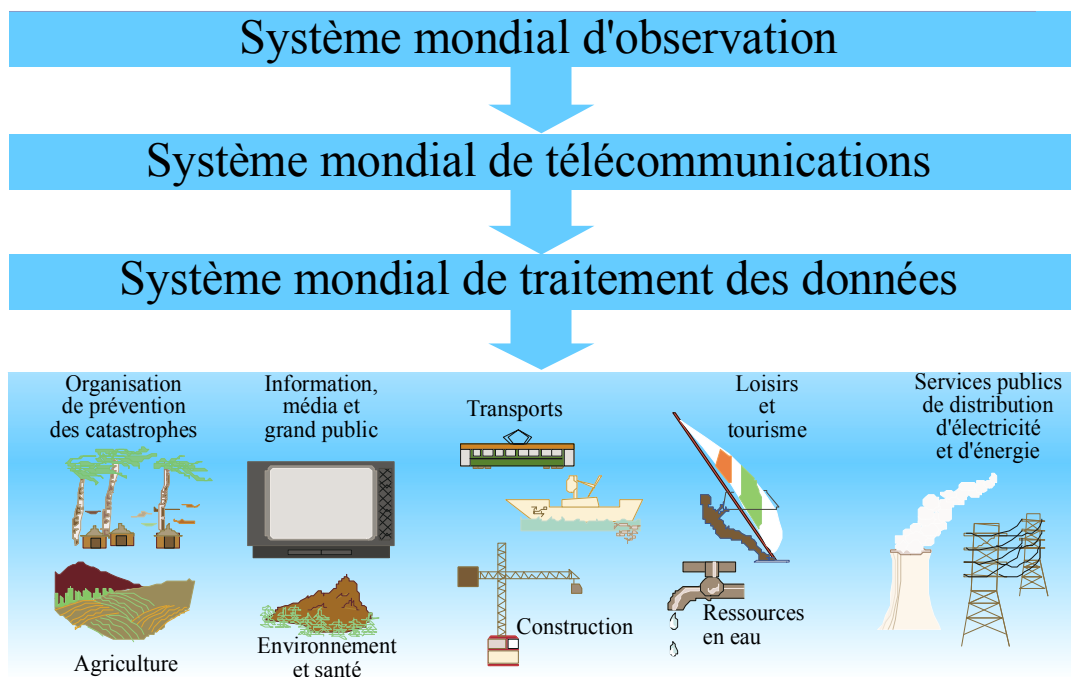
Pour établir des analyses, alertes et prévisions sur le temps, la météorologie moderne procède à l'échange quasi instantané d'informations météorologiques à l'échelle de la planète. La Veille météorologique mondiale (VMM), qui forme le cœur des programmes de l'OMM, allie des systèmes d'observation, des installations de télécommunication et des centres de traitement des données et de prévisions (exécutés et utilisés par les 187 Etats Membres) pour rendre disponibles les informations météorologiques et les données géophysiques connexes nécessaires pour fournir des services efficaces dans tous les pays.

La Veille météorologique mondiale travaille sous la coordination et la supervision de 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 efforts de recherche et de planification à long terme. Une part de plus en plus importante du Programme VMM assiste des programmes internationaux spécialistes du climat mondial, notamment de l'évolution climatique et des autres questions environnementales, et du développement durable.

La Veille météorologique mondiale (VMM) renferme trois composantes essentielles, étroitement imbriquées (voir la Fig. 1-1):

- Le **Système mondial d'observation (SMO)** procure sur l'état de l'atmosphère et de la surface des océans des données d'observation normalisées, de qualité élevée, en provenance de l'espace et de toutes les parties du globe.
- Le **Système mondial de télécommunications (SMT)** assure l'échange en temps réel des données d'observation, des produits traités et des informations connexes entre les Services météorologiques et hydrologiques nationaux.
- Le **Système mondial de traitement des données et de prévisions (SMTDP)** fournit les produits traités (analyses, avis et prévisions) issus du réseau constitué par les centres météorologiques mondiaux et les centres météorologiques régionaux spécialisés.

FIGURE 1-1
Systèmes de la Veille météorologique mondiale



1.1.1 Le Système mondial d'observation

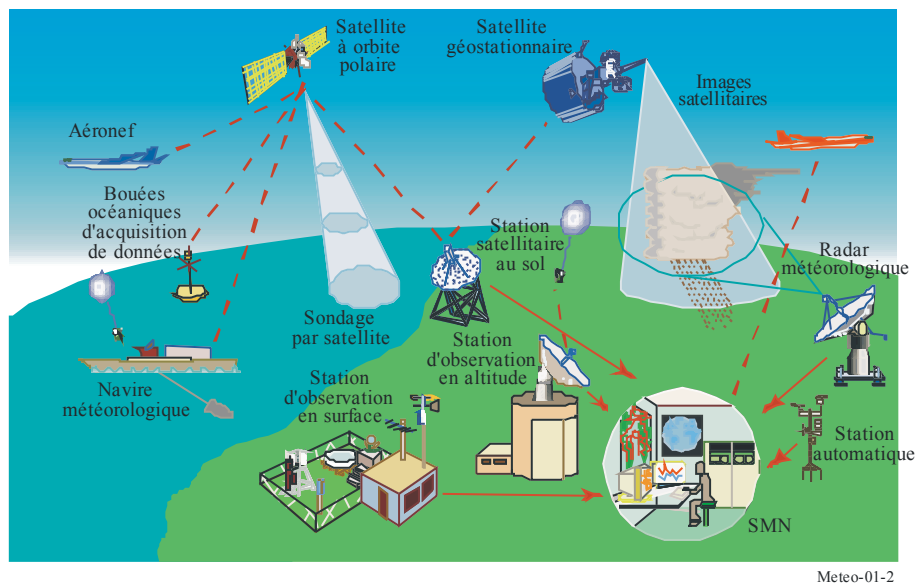
Première source d'information technique sur l'atmosphère du globe, le Système mondial d'observation (SMO) est un ensemble composite de méthodes, de techniques et d'installations complexes servant à mesurer les paramètres liés au temps et à l'environnement. Il permet à tous les pays d'obtenir les données 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 procure des données à la météorologie agricole, à la météorologie aéronautique et à 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.

L'agriculture, les transports, la construction, les services météorologiques destinés au public, le tourisme et une foule d'autres activités bénéficient énormément des prévisions du temps établies pour les jours, les semaines, voire les saisons à venir.

Pour plus d'informations sur le Système mondial d'observation, veuillez consulter: www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html.

FIGURE 1-2
Système mondial d'observation de l'OMM



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 sert aussi au réseau de surface du Système mondial d'observation du climat (SMOC).

1.1.1.2 Observations en altitude

A partir d'environ 900 stations aérologiques réparties sur 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 quinze navires qui sillonnent surtout l'Atlantique Nord. Un sous-ensemble de stations aérologiques, 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, le signalement rapide et la surveillance des tsunamis.

1.1.1.5 Observations en vol

Plus de 3 000 avions mesurent la pression, les vents et la température de l'air en vol. Le système de retransmission des données météorologiques d'avions (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. On estime le nombre de comptes rendus d'avions à 300 000 par jour, nettement plus qu'il y a quelques années. 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 en orbite basse (orbite quasi polaire) (voir la Fig. 1-3). Une liste des satellites météorologiques opérationnels actuellement et de leurs paramètres est disponible sur:

Satellites GEO: www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSgeo.html

Satellites en orbite basse: www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSleo.html

En outre, plusieurs satellites de Recherche & développement (R&D) (par exemple Aqua, CBERS, CloudSat, ERS, SPOT, TRMM, Landsat, QuikSCAT, etc.) sont équipés de la charge utile météorologique ou climatologique spécifique contribuant aussi au SMO. Une liste des actuels satellites de R&D et de leurs paramètres est disponible sur:

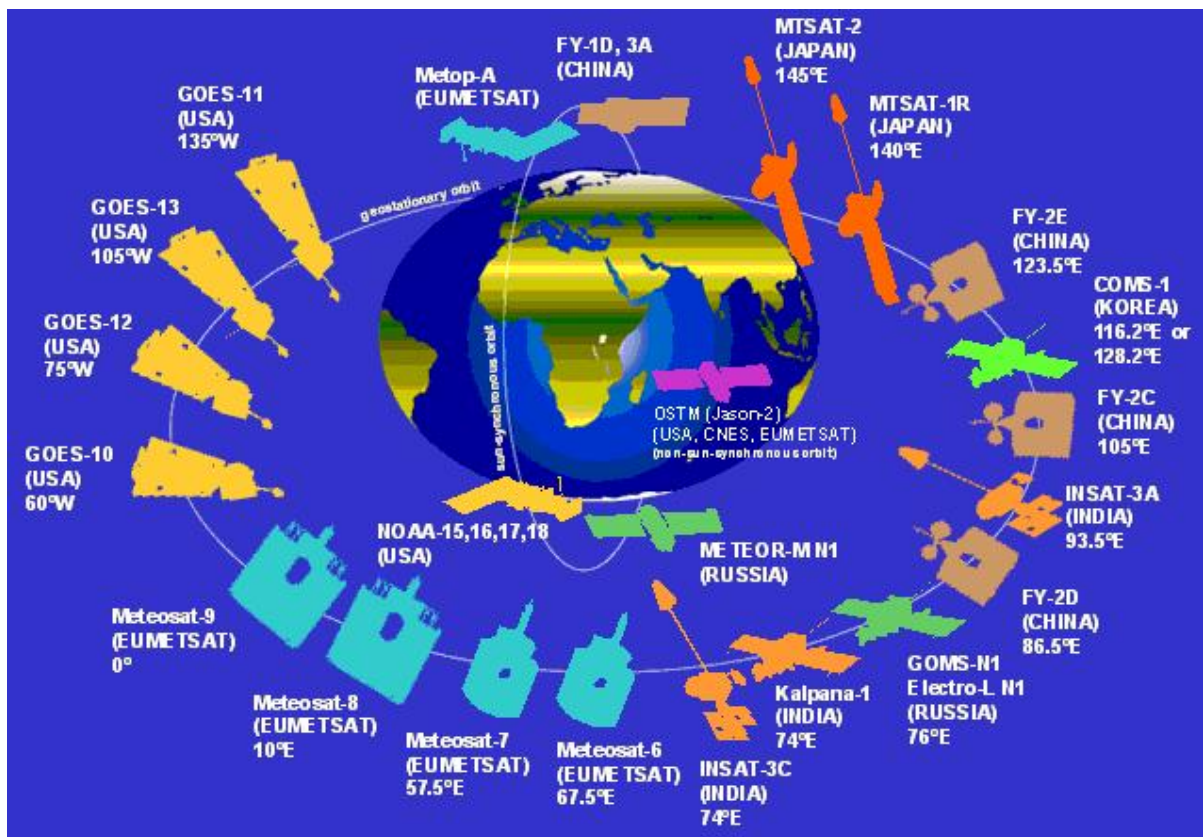
www.wmo.int/pages/prog/sat/GOSresearch.html

Tous ces satellites sont en principe dotés d'imageurs dans le visible et l'infrarouge, ainsi que de sondeurs qui permettent de déduire une multitude de paramètres météorologiques. Plusieurs satellites à 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.

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.

FIGURE 1-3
Constellation des satellites météorologiques du
Système mondial d'observation de l'OMM (en 2008)



Meteo-01-3

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 Futurs programmes pour les systèmes d'observation de l'OMM: 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 MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (MetSat)

| | <i>Page</i> |
|--|-------------|
| 2.1 Le service de météorologie par satellite (MetSat) et ses fréquences..... | 8 |
| 2.1.1 Les principes généraux des systèmes du service MetSat..... | 8 |
| 2.2 Les systèmes du service MetSat à satellites géostationnaires (OSG)..... | 10 |
| 2.2.1 La transmission des données brutes de capteurs d'images par satellite MetSat OSG..... | 10 |
| 2.2.2 La distribution des données par satellite MetSat OSG..... | 10 |
| 2.2.2.1 La distribution des images à haute résolution (HRI, <i>high resolution image</i>)..... | 10 |
| 2.2.2.2 Le service étendu de radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge (S-VISSR, <i>stretched visible infrared spin scan radiometer</i>)..... | 11 |
| 2.2.2.3 Les données (GVAR) des satellites GOES (<i>geostationary operational environmental satellites</i>)..... | 11 |
| 2.2.2.4 Le fac-similé météorologique (WEFAX)..... | 11 |
| 2.2.2.5 La transmission des informations à faible débit (LRIT, <i>low rate information transmission</i>)..... | 12 |
| 2.2.2.6 La transmission des informations à haut débit (HRIT, <i>high rate information transmission</i>)..... | 12 |
| 2.2.3 Les plates-formes de collecte de données (PCD) OSG du service MetSat..... | 12 |
| 2.3 Les systèmes du service MetSat à satellites non OSG..... | 12 |
| 2.3.1 La transmission des données brutes d'instruments MetSat non OSG..... | 13 |
| 2.3.2 La distribution des données par satellite MetSat non OSG..... | 13 |
| 2.3.2.1 La transmission automatique des images (APT, <i>automatic picture transmission</i>)..... | 13 |
| 2.3.2.2 La transmission des images à faible débit (LRPT, <i>low resolution picture transmission</i>)..... | 14 |
| 2.3.2.3 La transmission des images à haute résolution (HRPT, <i>high resolution picture transmission</i>)..... | 14 |
| 2.3.2.4 L'installation de traitement des données à faible débit (LRD, <i>low rate data</i>)..... | 14 |
| 2.3.3 Les systèmes de collecte de données (DCS, <i>data collection system</i>) MetSat non OSG..... | 14 |
| 2.4 Les autres systèmes de distribution de données..... | 15 |

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». Il établit entre les stations terriennes et une ou plusieurs stations spatiales des liaisons de radiocommunication par lesquelles:

- des renseignements relatifs aux caractéristiques de la Terre et de ses phénomènes naturels sont obtenus à partir de détecteurs actifs ou passifs situés sur des satellites de la Terre;
- des renseignements sont recueillis à partir de plates-formes aéroportées ou situées sur la Terre;
- des renseignements sont distribués à des stations terriennes.

Ce chapitre consacré aux applications du service MetSat présente les transmissions par radiocommunication (également appelées, pour certaines, «systèmes de lecture directe») ci-après:

- transmission de données d'observation vers les stations de réception principales;
- retransmission des données prétraitées vers les stations météorologiques d'utilisateur;
- transmission par radiodiffusion directe vers les stations météorologiques d'utilisateur;
- autres systèmes de distribution directe de données.

Le Tableau 2-1 répertorie les bandes de fréquences radioélectriques attribuées à la transmission de données dans le cadre du service MetSat.

TABLEAU 2-1
Bandes de fréquences utilisables par les satellites météorologiques
pour la transmission de données

| Bandes de fréquences (MHz) | Attributions MetSat |
|----------------------------|---|
| 137-138 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire |
| 400,15-401 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire |
| 401-403 | Terre vers espace, attribution à titre primaire |
| 460-470 | Espace vers Terre, attribution à titre secondaire |
| 1 670-1 710 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire |
| 7 450-7 550 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire, satellites géostationnaires uniquement |
| 7 750-7 850 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire, satellites non géostationnaires uniquement |
| 8 025-8 400 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire, pour satellites d'exploration de la Terre (Note 1) |
| 8 175-8 215 | Terre vers espace, attribution à titre primaire |
| 18 000-18 300 | Espace vers Terre dans la Région 2, attribution à titre primaire, satellites géostationnaires uniquement |
| 18 100-18 400 | Espace vers Terre dans les Régions 1 et 3, attribution à titre primaire, satellites géostationnaires uniquement |
| 25 500-27 000 | Espace vers Terre, attribution à titre primaire, pour satellites d'exploration de la Terre (Note 1) |

NOTE 1 – Le service de météorologie par satellite faisant partie du SETS, ses futures applications pourraient profiter des bandes attribuées à ce dernier (25 500-27 000 MHz, par exemple).

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 sont transmises à une station au sol de l'exploitant pour être traitées puis transmises à divers centres météorologiques nationaux, aux archives officielles et aux usagers commerciaux. 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 sont souvent 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.

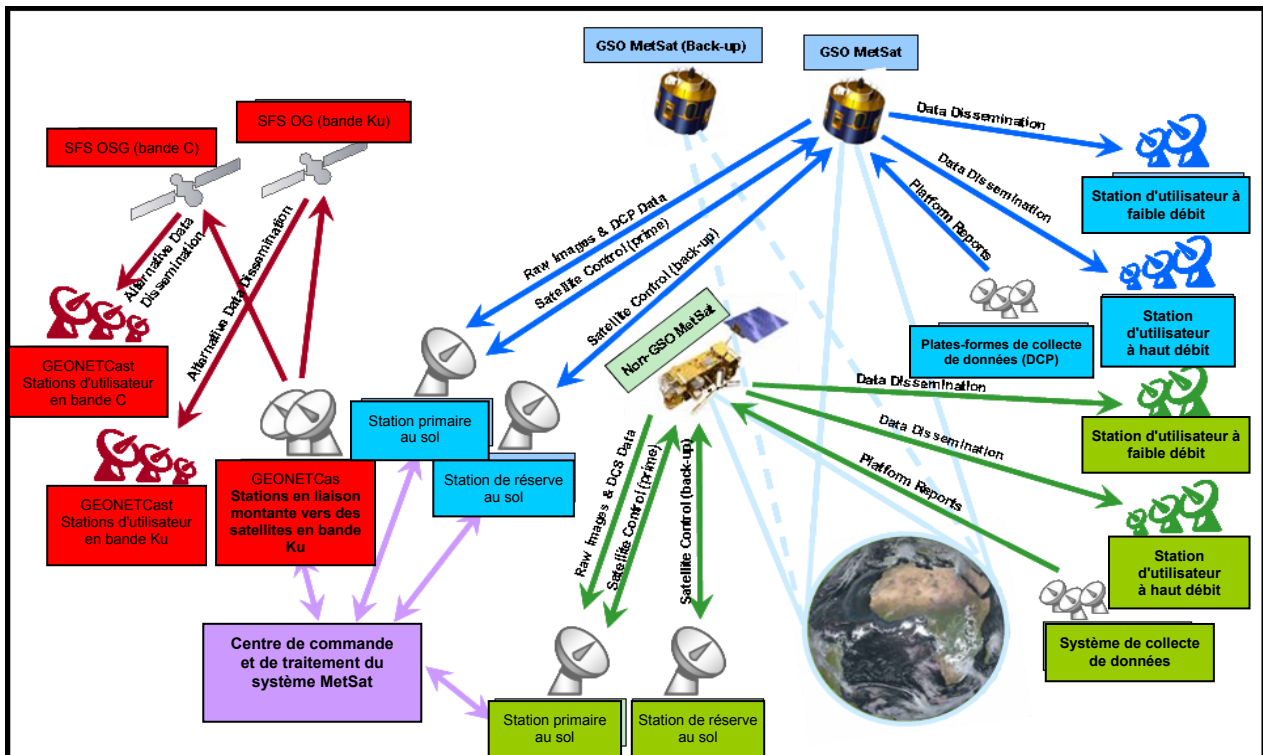
Les satellites météorologiques embarquent également des systèmes de collecte de données (DCS, *data collection systems*). Il s'agit des plates-formes de collecte de données (PCD), embarquées à bord des satellites géostationnaires (OSG) et des systèmes tels qu'Argos à bord des satellites non géostationnaires (non OSG).

La plupart des PCD, généralement situées au sol, à bord d'aéronefs, sur des navires ou sur des bouées en mer, utilisent la bande 401-403 MHz pour envoyer aux satellites météorologiques géostationnaires les données relatives à 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*). A l'avenir, certains canaux du système IDCS pourront 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 dans la bande 401,580-401,690 MHz. 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 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



2.2 Les systèmes du service MetSat à satellites géostationnaires (OSG)

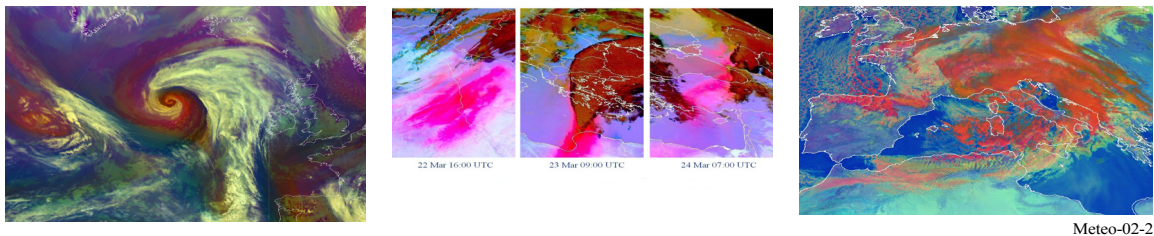
Le Système mondial d'observation (SMO) de la Veille météorologique mondiale (VMM) exploite plusieurs satellites météorologiques pour offrir la couverture nécessaire d'observation de la Terre depuis l'orbite géostationnaire (voir la Fig. 1-3). Le lancement programmé de satellites météorologiques en remplacement ou en complément des satellites existants viendra élargir la 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
Images des données traitées d'un satellite météorologique 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)

Il n'existe que quelques installations de ce genre dans le monde, en principe une ou deux par système à satellites. Munies d'antennes de 10 à 18 m de diamètre, elles fonctionnent généralement avec un angle d'élévation d'au moins 3°. 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 auxquels des bandes de fréquences ont été attribuées après le 1^{er} janvier 2004 que la bande 1 670-1 675 MHz ne sera pas protégée contre le brouillage indésirable créé par les applications du service mobile par satellite (SMS) et ne sera donc plus utilisable par les nouveaux systèmes du service MetSat.

Les systèmes MetSat OSG de nouvelle génération (qui devraient être opérationnels vers 2015) devraient bénéficier de débits et d'une bande passante pour la liaison descendante de transfert de données des instruments nettement plus élevés (de l'ordre de 100 à 300 Mbit/s). Les fréquences les plus élevées, comme dans les bandes 7 450-7 550 MHz, 18,0-18,3 GHz (Région 2), 18,1-18,4 GHz (Régions 1 et 3), 25,5-27 GHz, devront donc être utilisées.

2.2.2 La distribution des données par satellite MetSat OSG

Les § 2.2.2.1 à 2.2.2.6 suivants décrivent les fonctions de diffusion 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 La distribution des images à haute résolution (HRI, *high resolution image*)

Le service de distribution des images à haute résolution (HRI, *high resolution image*) fonctionne avec un engin METEOSAT de première génération (Meteosat-6 et Meteosar-7). Le signal numérique est radiodiffusé

à 166,7 kbit/s, par modulation PCM/PM/SPL. La forme des images est exclusive et la couverture correspond au secteur de télécommunication METEOSAT (orbite géostationnaire, 57,5° Est et 67,5° Est). Les données transmises renferment des images à haute résolution assorties d'informations sur l'étalonnage et la navigation. Les principaux usagers sont les centres météorologiques nationaux, les universités, les sociétés commerciales de prévision et les télédiffuseurs.

La distribution des images à haute résolution se fait dans la sous-bande 1 690-1 698 MHz, avec fréquences centrales à 1 694,5 MHz et 1 691 MHz. La largeur de bande est de 660 kHz et le facteur de qualité des stations de réception atteint 10,5 dB/K. Les antennes mesurent en général 3 m de diamètre et l'angle d'élévation minimal est de 3°.

2.2.2.2 Le service étendu de radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge (S-VISSR, *stretched visible infrared spin scan radiometer*)

Le service S-VISSR est assuré par les satellites FY-2C, -2D et -2E du système MetSat OSG chinois, Feng-Yun-2.

Les données relevées par les capteurs du VISSR sont transmises vers les stations principales au sol de ce système MetSat. 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. La largeur de bande type se situe aux environs de 6 MHz. Les stations de réception présentent un facteur de qualité de 10,5 dB/K et l'angle d'élévation minimal des antennes est de 5°.

2.2.2.3 Les données (GVAR) des satellites GOES (*geostationary operational environmental satellites*)

Les satellites géostationnaires d'exploitation pour l'étude de l'environnement (GOES) des Etats-Unis d'Amérique envoient des données traitées (GVAR) 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 mesures de télémétrie, des messages sous forme de texte et des produits auxiliaires.

2.2.2.4 Le fac-similé météorologique (WEFAX)

Ce service analogique sera remplacé par le service numérique de transmission des informations à faible débit (LRIT, *low rate information transmission*) sur la deuxième génération de satellites météorologiques. Ce service, appelé 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 à orbite polaire et géostationnaires, qui a défini les paramètres de ce service. Il est exploité par les systèmes à satellites suivants: Meteosat-6 et Meteosat-7, ainsi que FY-2C, -2D et 2E.

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. On les appelle également stations SDUS (*secondary data user stations*) (Meteosat) ou LR-FAX (FY-2).

Les transmissions se font dans la sous-bande 1 690-1 698 MHz. La plupart des services ont une fréquence centrale de 1 691 MHz et une largeur de bande de 0,03 à 0,26 MHz. Les stations de réception types fonctionnent avec un angle d'élévation supérieur à 3°, sont dotées d'antennes de 1,2 m de diamètre et présentent un facteur de qualité G/T de 2,5 dB/K. Les transmissions renferment 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.

2.2.2.5 La transmission des informations à faible débit (LRIT, *low rate information transmission*)

Ce nouveau service, appelé LRIT, a été lancé en 2003 sur les satellites météorologiques géostationnaires GOES à destination de stations d'utilisateur peu coûteuses. Il remplacera le service WEFAX sur d'autres satellites MetSat OSG et desservira à peu près la même communauté d'utilisateurs. Des milliers de stations d'utilisateur à faible débit (LRUS, *low rate user stations*) devraient entrer en service.

Les transmissions se feront dans la sous-bande 1 690-1 698 MHz, avec fréquences centrales aux alentours de 1 691 MHz. La largeur de bande pourra atteindre 600 kHz. Les antennes, d'environ 1 m et 1,8 m de diamètre, fonctionneront avec un angle d'élévation d'au moins 3°. Le facteur de qualité des LRUS ira de 5 à 6 dB/K, selon l'emplacement de la station.

2.2.2.6 La transmission des informations à haut débit (HRIT, *high rate information transmission*)

Le service de transmission des informations à haut débit (HRIT, *high rate information transmission*) a été lancé en janvier 2004 et exploitait alors le premier satellite (Meteosat-8) de seconde génération du service Meteosat. L'exploitation du satellite japonais MTSAT-1R, effective depuis juin 2005, a conduit au remplacement des services HRI et S-VISSR par le service HRIT de MTSAT.

Le service HRIT fonctionne dans les sous-bandes 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 et l'angle d'élévation est de 3° ou plus. Le facteur de qualité des stations d'utilisateur va de 12 à 14 dB/K, selon l'emplacement de la station.

2.2.3 Les plates-formes de collecte de données (PCD) OSG du service MetSat

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 bandes offrant ces débits élevés sont les bandes 0,7510 W kHz ou 2,2510 W kHz (respectivement 300 et 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 isotropique rayonnée équivalente (p.i.r.e.) en liaison montante va de 40 à 52 dBm. Les installations de collecte de données exploitent divers systèmes à satellites météorologiques géostationnaires.

Les PCD liées à des satellites météorologiques géostationnaires utilisent les fréquences situées entre 401,1 et 402,4 MHz, avec 402,0-402,1 MHz pour l'international (33 canaux de 3 kHz de largeur). L'emploi de bandes étroites (0,75 kHz dans certains cas) et l'accélération de la procédure de compte rendu à seulement 10 secondes permettent de recevoir des données d'un grand nombre de plates-formes. Concernant les satellites GOES, il y avait en 2007 près de 27 000 PCD et jusqu'à 400 000 messages étaient traités par jour. Ces chiffres devraient par ailleurs croître de manière significative à l'avenir. Cette augmentation nécessitera probablement l'utilisation d'un spectre de fréquences élevées plus large, aux alentours de 403 MHz, pour supporter ces plates-formes de signalement.

2.3 Les systèmes du service MetSat à satellites non OSG

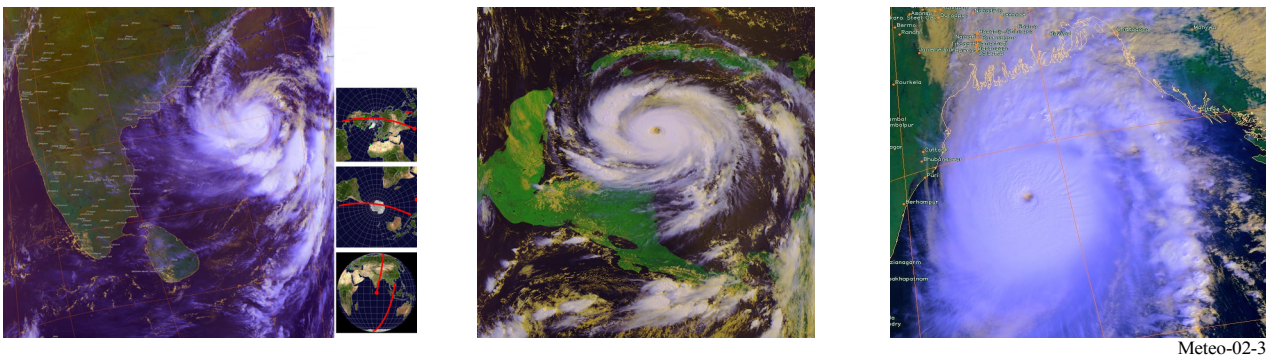
Outre les nombreux satellites OSG du service MetSat, le SMO exploite également des satellites MetSat non OSG pour collecter les données de mesure des capteurs passifs et actifs dans le visible, l'infrarouge et les hyperfréquences avec la plus large couverture possible.

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.

La Fig. 2-3 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 2-3

Images prises par un radiomètre perfectionné à très haute résolution



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

Les données brutes des satellites météorologiques à orbite polaire sont transmises dans la bande 7750-7850 MHz 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. D'autres systèmes MetSat non OSG fonctionnent ou fonctionneront dans la bande de fréquences 8025-8400 MHz (FY-3, METEOR et NPP par exemple) ou dans la bande 25,5-27 GHz (comme NPOESS) pour la liaison descendante de transfert des données brutes des instruments.

2.3.2 La distribution des données par satellite MetSat non OSG

Les § 2.3.2.1 à 2.3.2.4 suivants 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 transmission automatique des images (APT, *automatic picture transmission*)

Le service de transmission automatique des images (APT, *automatic picture transmission*), inauguré dans 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.

Les transmissions APT reposent sur un système à modulation analogique. Elles se font dans quatre sous-bandes de la bande 137-138 MHz, avec des largeurs de bande types de 30 à 50 kHz, mais qui peuvent atteindre 175 kHz. Les diffusions futures seront limitées à deux sous-bandes dans la bande 137-138 MHz, soit 137,025-137,175 MHz et 137,825-138 MHz.

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 table ordinaires.

2.3.2.2 La transmission des images à faible débit (LRPT, *low resolution picture transmission*)

Le service LRPT tend à remplacer l'application APT sur la plupart des systèmes MetSat non OSG. Basé sur la transmission numérique, il emploie les mêmes fréquences que le service APT actuel. La largeur de bande peut atteindre 175 kHz.

2.3.2.3 La transmission des images à haute résolution (HRPT, *high resolution picture transmission*)

Le service de transmission des images à haute résolution 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 extrêmement utiles dans d'autres secteurs.

Les transmissions HRPT se font entre 1 698 et 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°, 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 transfert de données environ deux fois plus élevé que celui des systèmes HRPT d'origine.

Le système HRTP devrait toutefois être remplacé par l'application de transmission perfectionnée des images à haute résolution (AHRPT, *advanced HRPT*) sur les prochains satellites. Les exploitants pourront continuer à offrir le service actuel pendant un certain temps.

Les transmissions AHRPT se feront dans la même bande que celle utilisée par les autres systèmes HRPT, à savoir entre 4,5 et 5,6 MHz. La réception exigera un angle d'élévation d'au moins 5°. Les antennes, du type parabolique, auront un diamètre de 2,4 m à 3 m. Le facteur de qualité devra être de 6,5 dB/K.

2.3.2.4 L'installation de traitement des données à faible débit (LRD, *low rate data*)

Le premier satellite du Système national de satellites sur orbite polaire pour l'étude de l'environnement (NPOESS, *national polar-orbiting operational environmental satellite system*), attendu pour 2013, exploitera l'application LRD dans une bande de 6 MHz, remplaçant ainsi le service APT assuré actuellement par les satellites NOAA. Ce service fonctionnera dans la bande 1 698-1 710 MHz.

2.3.3 Les systèmes de collecte de données (DCS, *data collection system*) MetSat non OSG

Les DCS des satellites MetSat non OSG procurent 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. Cela comprend aussi l'observation du mouvement d'animaux. L'intérêt commercial de ces mesures est limité, quoique l'on surveille aussi l'état des oléoducs dans le but de protéger l'environnement. Certains émetteurs sont également utilisés pour alerter et informer sur les situations d'urgence et aident à déceler les dangers ou les catastrophes. ARGOS et le DCS du Brésil font partie des systèmes de collecte exécutés à partir des satellites météorologiques non OSG. Le système Argos-2 ne se trouve actuellement qu'à bord des satellites à orbite polaire 15, 16, 17 et 18 de la NOAA. La troisième génération du système Argos (Argos-3), déjà opérationnelle sur Metop-A, sera exécutée à partir des satellites NOAA-N', Metop-B et Metop-C, et embarquée également sur le satellite SARAL.

Le système Argos fonctionne dans la bande 401,580-401,690 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. Le système Argos-3 introduira 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 la plate-forme. La plate-forme, appelée PMT (Platform Messaging Transceiver), est interrogée par les satellites dans la bande 460-470 MHz.

La quatrième génération du système Argos (Argos-4) devra probablement bénéficier d'une capacité et d'une bande passante nettement supérieures.

Le DCS du Brésil 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 de la plate-forme de collecte de données. Le DCS du Brésil avec système Argos étant compatible avec les satellites en orbite complémentaires, il s'échangent des données depuis 2001.

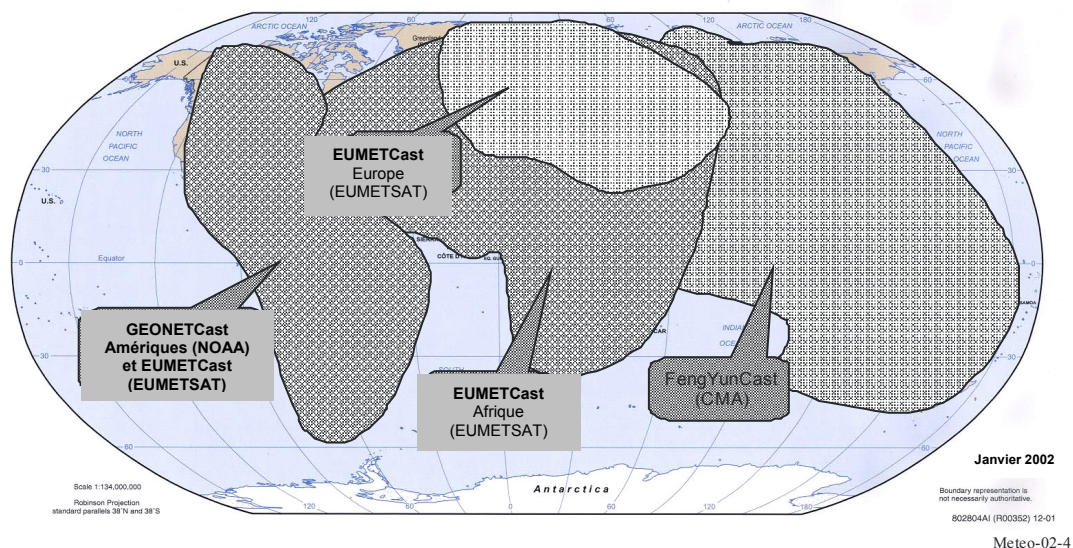
2.4 Les autres systèmes de distribution de données

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. 2-4), 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. Cette couverture mondiale devrait être rendue possible par l'intégration du système FENGYUNCast, du composant américain GEONETCast et du système EUMETCast.

A titre d'exemple, le système EUMETCast est le système de diffusion des données environnementales (Broadcast System for Environmental Data) d'EUMETSAT, à savoir un système de distribution multi-services, basé sur la technologie standard de diffusion vidéo numérique (DVB, *digital video broadcast*). Il exploite des satellites géostationnaires de télécommunication commerciale pour diffuser des fichiers (données et produits) à une vaste communauté d'utilisateurs située dans les zones de couverture géographique des satellites de télécommunication commerciale, à savoir l'Europe, l'Afrique et le continent américain.

Utilisé au départ pour la distribution des images et produits dérivés des satellites Meteosat et Metop, EUMETCast donne désormais également accès aux données et services de fournisseurs de données externes, parmi lesquels les services météorologiques nationaux et les opérateurs MetSat.

FIGURE 2-4
Couverture mondiale de GEONETCast



CHAPITRE 3

LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE

| | | <i>Page</i> |
|-------|--|-------------|
| 3 | Introduction..... | 18 |
| 3.1 | Les bandes de fréquences..... | 18 |
| 3.2 | Les applications en météorologie du service MetAids..... | 19 |
| 3.3 | Quelques systèmes de détection du service MetAids..... | 20 |
| 3.3.1 | Les radiosondes..... | 20 |
| 3.3.2 | Parasonde | 22 |
| 3.3.3 | Sonde-fusée..... | 22 |
| 3.4 | Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids | 24 |
| 3.4.1 | Antenne-récepteur au sol..... | 24 |
| 3.4.2 | Installation de traitement au sol | 25 |
| 3.4.3 | Blocs de détection non récupérables | 25 |
| 3.5 | Caractéristiques des observations météorologiques fournies par le service MetAids..... | 26 |
| 3.6 | Les variations nationales dans l'exploitation du service MetAids..... | 29 |
| 3.6.1 | Technologie accessible | 29 |
| 3.6.2 | Vents en altitude..... | 29 |
| 3.6.3 | Densité des réseaux | 30 |
| 3.6.4 | Utilisation de la bande 401-406 MHz | 30 |
| 3.6.5 | Utilisation de la bande 1 688,4-1 700 MHz | 30 |
| 3.6.6 | Conservation des deux bandes de fréquences | 31 |
| 3.7 | Les tendances futures | 31 |

3 Introduction

Le service des auxiliaires de la météorologie (MetAids) est défini de la manière suivante dans le numéro 1.50 du RR: «Service de radiocommunication destiné aux observations et aux sondages utilisés pour la météorologie, y compris l'hydrologie».

Concrètement, ce service 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.

3.1 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 | Usage |
|----------------------|-------------------|
| 400,15-401 MHz | MetAids |
| 401-402 MHz | MetAids |
| 402-403 MHz | MetAids |
| 403-406 MHz | MetAids |
| 1 668,4-1 670 MHz | MetAids MetSat |
| 1 670-1 675 MHz | MetAids MetSat |
| 1 675-1 690 MHz | MetAids MetSat |
| 1 690-1 700 MHz | MetAids MetSat |
| 35,2-36 GHz | MetAids SETS |

Cette liste comprend aussi les services primaires dans les bandes utilisées pour le service MetAids. L'attribution de fréquences à d'autres services crée de fortes contraintes. 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 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 fréquences dans ces bandes actuellement attribuées, consultez l'Article 5 du Règlement des radiocommunications.

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.

On a cessé par la suite les radiosondages courants dans la bande 27,5-28 MHz, à cause de problèmes de brouillage avec d'autres services. Une étude consacrée à l'utilisation du service MetAids a révélé que les radiosondes vendues dans le commerce fonctionnaient à des fréquences de 400,15 MHz à 406 MHz et 1 668,4 MHz à 1 700 MHz dans le réseau 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.

3.2 Les applications en météorologie du service MetAids

La météorologie d'exploitation a absolument besoin de mesures précises de la température de l'air, de 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. 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. Il 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. La hauteur à laquelle doivent être effectuées les observations régulières dépend en partie de l'application prévue et de l'emplacement géographique. 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 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. 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 |

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 sert de norme quand on étudie le spectre nécessaire au service des 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.

3.3 Quelques systèmes de détection du service MetAids

3.3.1 Les radiosondes

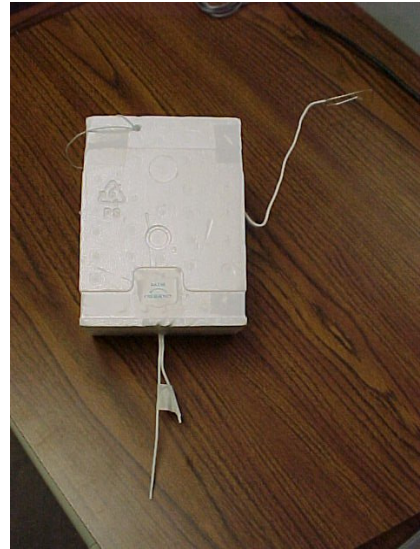
Plus de 800 000 radiosondes sont emportées par des ballons chaque année dans le monde (voir les Fig. 3-1 et 3-2). 400 000 lancements supplémentaires sont également effectués pour d'autres applications. Les stations de base sont généralement équipées de manière à pouvoir effectuer des lancements par tous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



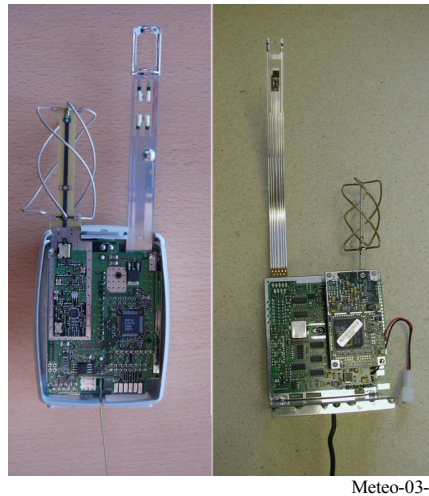
Meteo-03-1

FIGURE 3-2
Les radiosondes



Meteo-03-2

FIGURE 3-3

Équipement électronique des radiosondes modernes

Meteo-03-3

Une radiosonde classique renferme plusieurs éléments: un émetteur, une pile, un bloc de détection et un récepteur NAVAJD/GPS (en général) d'aide à la navigation (voir la Fig. 3-3). L'émetteur envoie les données à la station de réception. L'alimentation est généralement assurée par des piles activées par eau, fabriquées spécialement pour cet usage car les piles alcalines du commerce ne pourraient supporter 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, l'ozone ou le rayonnement ionisant. Les valeurs relevées sont codées afin de pouvoir être transmises au sol.

Les radiosondes n'exploitant pas d'applications NAVAJD/GPS utilisent un radar de poursuite au moyen d'un réflecteur fixé sous le ballon. Si la mesure des vents se fait grâce aux signaux NAVAJD/GPS, la radiosonde est dotée d'un récepteur spécial. Les radiosondes NAVAJD/GPS captent les signaux système mondial de radiorepérage (GPS), LORAN et VLF.

Le coût moyen d'une radiosonde se ventile comme suit: 20 à 30% pour l'émetteur, 45 à 60% pour le bloc de détection, 20 à 50% pour le récepteur NAVAJD (le cas échéant) et 15 à 25% pour la pile. Les caractéristiques de certains émetteurs sont plutôt mauvaises par rapport à celles des appareils employés dans beaucoup d'autres services. Leur piètre stabilité et la grande largeur de bande des transmissions s'expliquent par leur coût relativement faible. Tout comme on restreint la puissance de traitement, on évite d'employer des émetteurs nettement plus stables tant que la technologie ne sera pas offerte à un prix raisonnable. Néanmoins, les conditions de fonctionnement de certains réseaux nationaux exigent déjà l'utilisation d'émetteurs de grande stabilité à bande étroite.

3.3.2 Parasonde

Leurs composants sont semblables à ceux des radiosondes, mais l'assemblage est modifié parce que ces appareils sont parachutés d'un aéronef et établissent 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 NAVAJD/GPS. 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 douze appareils. Cela exige des émetteurs de grande stabilité à bande étroite, comme dans la partie la plus dense du réseau de radiosondage.

3.3.3 Sonde-fusée

Il s'agit d'un système MetAids plus spécialisé que les précédents. 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 NAVD/GPS. 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 3-4

Parasonde

Meteo-03-4

FIGURE 3-5

Sonde-fusée

Meteo-03-5

3.4 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids

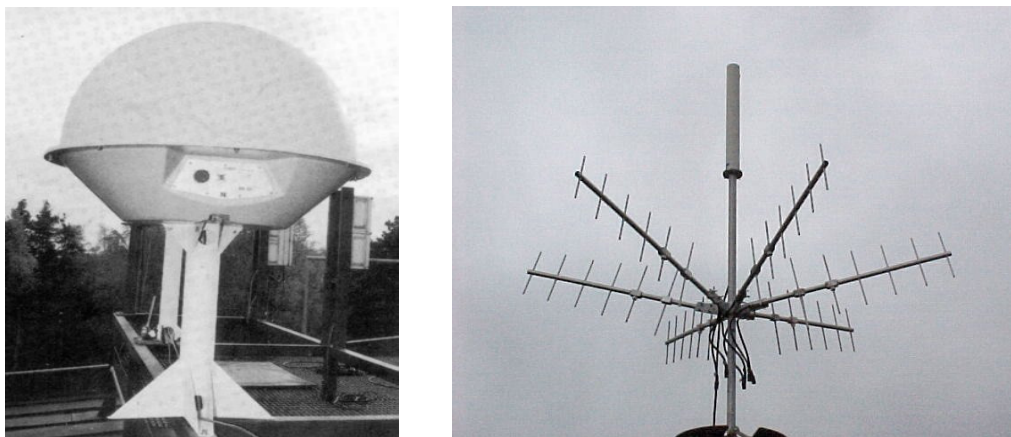
Les systèmes du service des auxiliaires de la météorologie comprennent plusieurs éléments de base dont, au sol, un ensemble antenne-récepteur et une installation de traitement des signaux. La Recommandation UIT-R RS.1165 – Caractéristiques techniques et critères de qualité de fonctionnement des radiosondes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

3.4.1 Antenne-récepteur au sol

Une liaison radioélectrique assure la transmission des 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 401-406 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 401-406 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 dans la bande 1 668,4-1 700 MHz. 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
Antennes de poursuite (1 668,4-1 700 MHz)



Meteo-03-7

3.4.2 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. Peu d'appareils MetAids fournissent à la station de réception les valeurs météorologiques en tant que telles (pression, température, humidité, ozone, etc.). Les caractéristiques électroniques du capteur capacitif ou résistif sont acheminées afin de réduire le traitement au niveau de l'appareil lui-même. Ces valeurs, complétées par les valeurs d'étalonnage du capteur, sont ensuite appliquées à un polynôme afin d'obtenir les paramètres météorologiques. Dans toute la mesure possible, le traitement des signaux NAVAJD/GPS est également confié à l'installation au sol pour les systèmes qui mesurent les vents de cette manière. Certains appareils MetAids se contentent de capter les signaux NAVAJD/GPS et de les renvoyer. La transmission des données brutes à la station exige un débit de transfert par liaison radioélectrique supérieur à celui qui serait nécessaire si le traitement était exécuté par l'appareil. On ne peut l'éviter car il ne serait pas rentable de doter chacun de ces dispositifs non récupérables de la puissance de traitement voulue.

3.4.3 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. 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. L'utilisation de circuits intégrés à application spécifique (ASIC, *application specific integrated circuits*) du type commercial se répand peu à peu, ceux-ci supportant davantage à présent 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. Il est bon de savoir qu'aucun incident de ce type n'a jamais été signalé. 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 ralentit la descente, mais un objet lourd pourrait créer des dégâts. La plupart des appareils utilisés de nos jours pèsent nettement moins d'un kilogramme. 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° à -90° C, air très sec ou très humide (condensation 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 télémétrique, afin d'améliorer le rendement énergétique. Elle varie en général, sur les radiosondes, de 100 mW à 400 mW et la marge du bilan 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.

3.5 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.

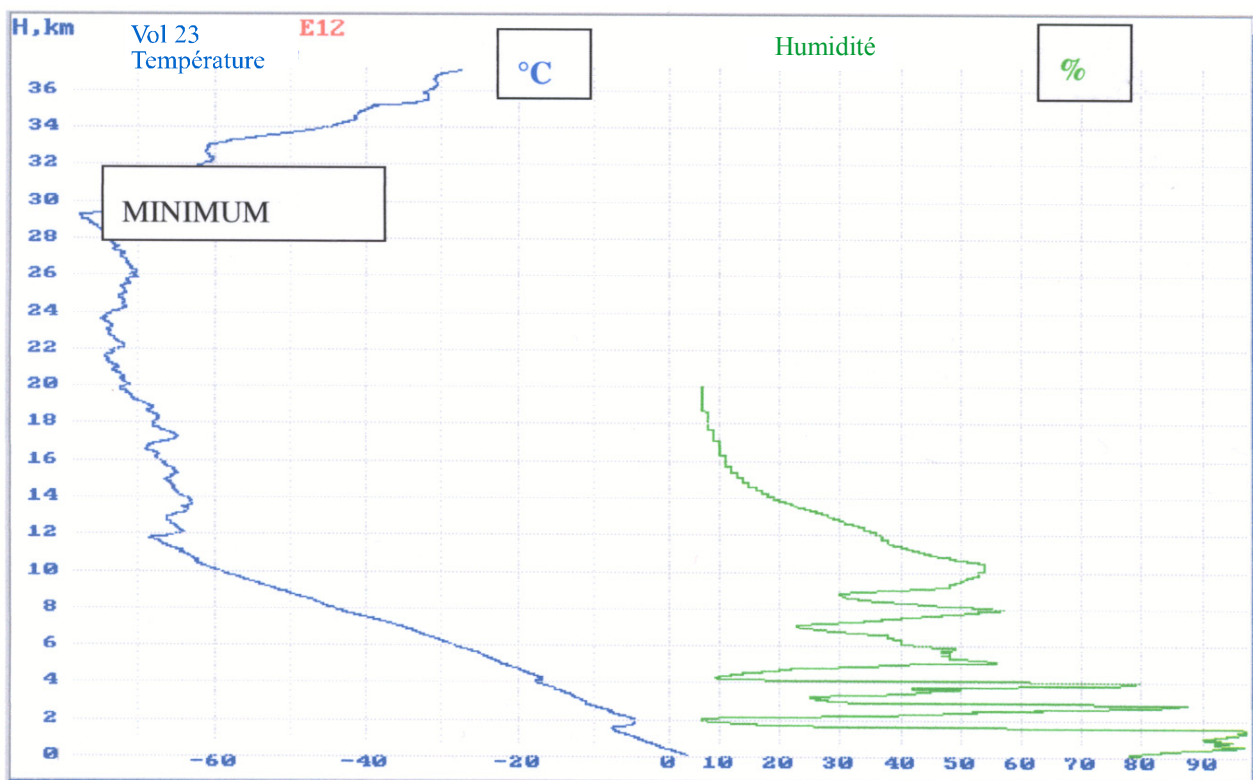
La Fig. 3-8 montre les mesures de la température et de l'humidité relative en fonction de l'altitude obtenues le 23 janvier 2000 à une station de surveillance du climat située à 60° N au Royaume-Uni (Lerwick, îles Shetland). Les valeurs de la température, qui comportent de faibles erreurs (moins de 0,5° 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 éclater le plus haut possible après une ascension à 300 m/min. Tout problème de réception en début de vol, ne serait-ce que pendant 10 s, compromet la capacité de résoudre les changements dans la température et l'humidité relative 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 que les erreurs dans la 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 résoudre complètement les changements rapides de valeur. La performance des capteurs d'humidité relative est nettement meilleure depuis les années 80. 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.

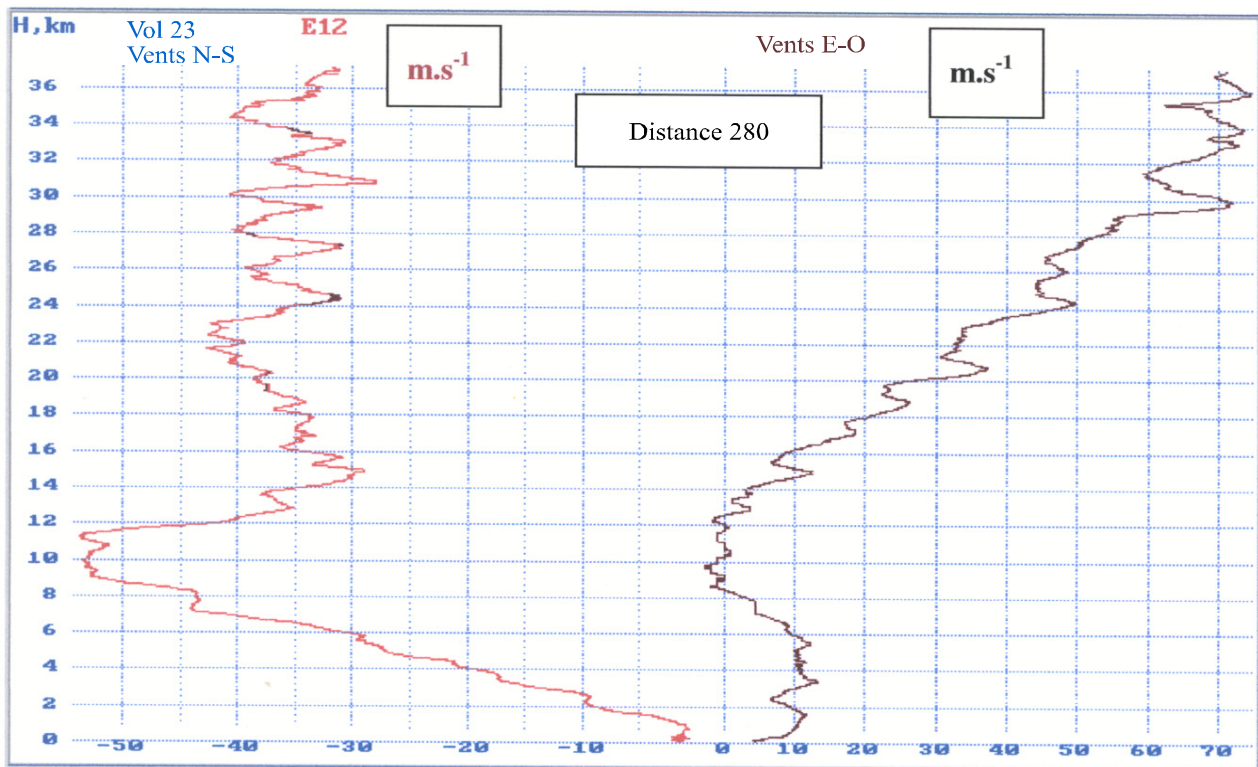
FIGURE 3-8
Mesure de la température et de l'humidité par radiosondage



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. À 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 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



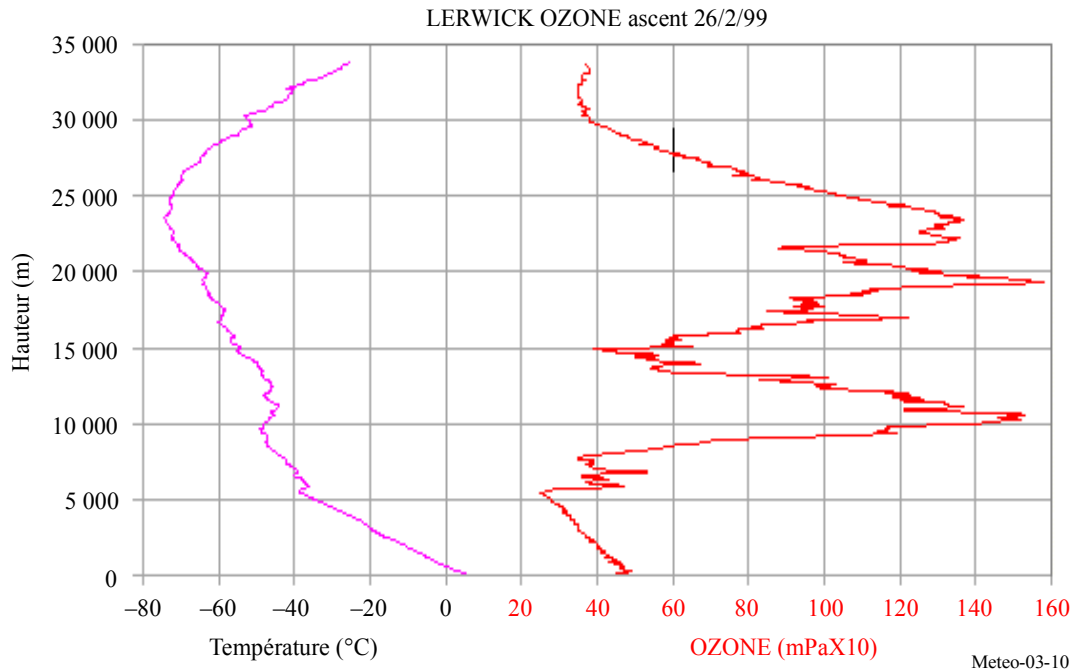
Meteo-03-9

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

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

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. 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 ou à l'appauvrissement de la couche sous l'effet de la pollution chimique.

FIGURE 3-10
Mesure de la répartition verticale de l'ozone par radiosondage



3.6 Les variations nationales dans l'exploitation du service MetAids

3.6.1 Technologie accessible

La plupart des systèmes de radiosondage proviennent d'un petit nombre de fournisseurs internationaux, mais la situation économique 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. Cela devrait être effectif d'ici à 2012.

3.6.2 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 Loran-C ou GPS 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 grande hauteur et à faible distance dans certains pays, tandis qu'ailleurs il faudra la suivre jusqu'à moins de 5° au-dessus de l'horizon et à plus de 200 km de distance.

Quand les ballons restent en hauteur (élévation rarement inférieure à 15°), 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 NAVAIID/GPS. 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 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 NAVAIID/GPS qui fonctionnent dans la bande 401-406 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 401-406 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.

3.6.3 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 ou d'employer des émetteurs à bande étroite de grande stabilité.

3.6.4 Utilisation de la bande 401-406 MHz

Certains Etats 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 401-406 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 401-406 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 ne permettrait pas de mener les activités courantes de radiosondage.

3.6.5 Utilisation de la bande 1 688,4-1 700 MHz

La situation dans la bande 1 688,4-1 700 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 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.

3.6.6 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 par un des systèmes de radionavigation (GPS ou LORAN-C), 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. 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/GPS, qui ne sont pas toujours disponibles.

3.7 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 télémétrique 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 commencé à nécessiter également l'amélioration des caractéristiques d'utilisation du spectre radioélectrique.

L'utilisation du GPS pour mesurer les vents avec des radiosondes améliore de beaucoup l'efficacité spectrale des appareils NAVAIID/GPS. Elle se traduit, dans la plupart des pays, par une exactitude beaucoup plus grande des mesures en altitude. Dans un tel système, un grand volume de données GPS devrait être transmis par l'appareil vers le sol, ce qui exigerait un débit plus élevé et, en conséquence, augmenterait la largeur de bande de l'émetteur et la consommation électrique, par rapport aux autres radiosondes. L'appareil ne pourrait peut-être pas traiter intégralement les données GPS, car les erreurs imputables aux conditions de propagation et à d'autres facteurs nécessitent une correction différentielle qui ne peut être apportée qu'à la station de réception.

Bibliographie

OMM Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, N° 8.

CHAPITRE 4

LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES

| | <i>Page</i> |
|---|-------------|
| 4.1 Introduction..... | 34 |
| 4.1.1 Les différents types de radars météorologiques..... | 34 |
| 4.1.2 Equation radar..... | 35 |
| 4.2 Les radars météorologiques..... | 36 |
| 4.2.1 Applications..... | 36 |
| 4.2.2 Réseaux de radars météorologiques..... | 36 |
| 4.2.3 Aspects opérationnels de la réflectivité..... | 38 |
| 4.2.4 Systèmes d'émission et stratégies de balayage des radars météorologiques..... | 39 |
| 4.2.4.1 Systèmes d'émission..... | 39 |
| 4.2.4.2 Etalonnage du bruit..... | 40 |
| 4.2.4.3 Stratégies de balayage..... | 41 |
| 4.2.4.4 Suppression des échos fixes..... | 41 |
| 4.2.5 Les radars Doppler..... | 41 |
| 4.2.6 Radars à double polarisation..... | 42 |
| 4.2.7 Données de base obtenues avec un radar météorologique conventionnel..... | 43 |
| 4.2.7.1 Réflectivité à la base..... | 44 |
| 4.2.7.2 Vitesse radiale moyenne..... | 44 |
| 4.2.7.3 Largeur du spectre..... | 45 |
| 4.2.7.4 Produits de radars météorologiques à double polarisation..... | 46 |
| 4.2.7.5 Données dérivées..... | 47 |
| 4.2.8 Besoins actuels et futurs de spectre..... | 47 |
| 4.2.9 Risques de brouillage des radars météorologiques..... | 48 |
| 4.2.9.1 Types de brouillage possibles..... | 48 |
| 4.2.9.2 Impact d'un brouillage constant..... | 48 |
| 4.2.9.3 Impact d'un brouillage par impulsion..... | 50 |
| 4.2.9.4 Brouillage causé par les parcs éoliens..... | 51 |
| 4.2.10 Vulnérabilités des systèmes partageant leur bande avec d'autres radars météorologiques ... | 54 |
| 4.3 Les radars profileurs de vent..... | 54 |
| 4.3.1 Applications..... | 55 |
| 4.3.2 Aspects relatifs au fonctionnement et aux fréquences..... | 56 |
| 4.3.3 Besoins actuels et futurs de spectre..... | 57 |
| 4.3.4 Partage du spectre..... | 58 |

4.1 Introduction

Le service de radiolocalisation exploite des radars météorologiques au sol pour la météorologie d'exploitation, les prévisions météorologiques, la recherche atmosphérique et l'aide à la navigation aéronautique et maritime. 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. Le radar moderne permet aussi de suivre le déplacement des tempêtes de toute ampleur et informe sur l'intensité des précipitations, facilitant la prévision des crues éclair. Il fournit en outre des informations indispensables sur les vents violents et les risques de foudre.

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 |
|---|-----------------|
| 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 second type de radar météorologique. Il procure des données sur un volume plus ou moins conique, juste au-dessus de l'appareil. Utilisé couramment depuis quelques années seulement, il établit la vitesse et la direction des vents en fonction de l'altitude. S'il est bien équipé, il peut aussi mesurer la température de l'air (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.

Tous les radars émettent des signaux radioélectriques qui sont ensuite réfléchis par une cible (véhicule, 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 qu'il doit d'abord franchir deux fois le même trajet, du radar à la cible et de la cible au radar. La faiblesse du signal de retour est encore plus marquée pour les radars météorologiques du fait que la cible (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 constituent pas des réflecteurs efficaces. La force 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:

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

où:

- $\overline{P_r}$: puissance moyenne reçue en retour (W)
- P_t : puissance de sortie de l'émetteur (W)
- G : gain d'antenne (adimensionnel)
- K : indice de réfraction complexe (adimensionnel)
- λ : longueur d'onde radar (m)
- c : vitesse de la lumière (m/s)
- θ : largeur de faisceau (rad) d'antenne à demi-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.

$$\overline{P_r} = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln 2} \cdot \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \theta^2 \cdot L}{\lambda^2} \cdot |K|^2 \cdot \frac{Z}{R^2} \quad (4-2)$$

↑
↑
↑

Constantes Facteurs radar Facteurs de cible

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 Zrnic, 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 la largeur du faisceau d'antenne, la durée d'impulsion, le gain de conversion du récepteur et l'affaiblissement du système et des sites.

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 sont donc plus sensibles au brouillage.

4.2 Les radars météorologiques

4.2.1 Applications

Les météorologistes utilisent des radars météorologiques d'une part pour détecter, localiser et mesurer le volume des précipitations contenues dans les nuages ou s'en échappant et d'autre part pour déterminer la vitesse 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 le vide et autres facteurs atmosphériques d'affaiblissement mais également par le fait que, à mesure que la distance du radar croît, le faisceau du radar s'éloigne du sol et s'élargit. (Cela est dû à la courbe de la Terre et à l'angle d'élévation du faisceau.) (Voir la Fig. 4-1.)

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

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 par jour 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 et C, a été déployé en Europe occidentale (voir la Fig. 4-2).

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. La vitesse est indiquée en nœuds.

FIGURE 4-1

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

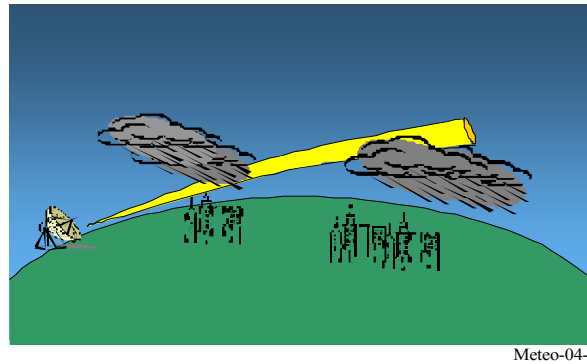
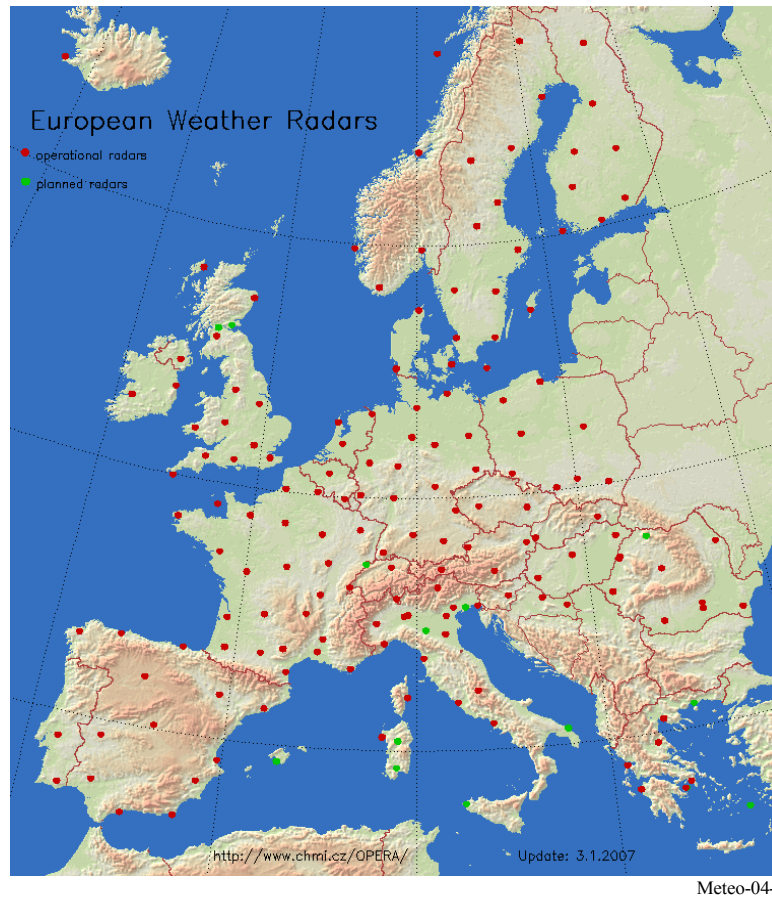


FIGURE 4-2

Exemple de réseau de radars météorologiques



Parmi les autres méthodes employées pour compenser cette contrainte figure également le déploiement de petits radars en bande X économiques et peu puissants, qui collectent des données complémentaires de celles des réseaux de radars météorologiques existants. Le réseau (CASA²) en est un exemple. Il devrait optimiser de manière significative l'efficacité des opérations de détection près de la surface de la Terre au moyen d'un procédé appelé DCAS (*distributive collaborative adaptive sensing*). Ce procédé consiste à assimiler en temps réel les données de plusieurs radars en bande X nécessaires aux algorithmes de détection, aux

prévisions météorologiques numériques et aux modèles de transport. Compte tenu des avantages spécifiques de ces réseaux de radars, des améliorations devraient bientôt être apportées aux fonctions d'analyse et de prévision des conditions météorologiques de surface de ce système.

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 inconnue (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 et stratégies de balayage des radars météorologiques

4.2.4.1 Systèmes d'émission

Afin de garantir le traitement de balayage en volume, dans ce qu'on appelle les «stratégies de balayage» (généralement dans une plage de 10-15 min), les radars météorologiques utilisent une variété de systèmes d'émission différents à différentes élévations, à l'aide d'ensembles de différentes largeurs d'impulsion, FRI et vitesses de rotation. Il n'existe pas de système type, ces derniers variant selon un nombre de facteurs tels que les capacités et l'environnement du radar, ainsi que les produits météorologiques requis.

Par exemple, une enquête récente portant sur les radars météorologiques en bandes C en Europe a révélé les plages suivantes de différents paramètres de système d'émissions:

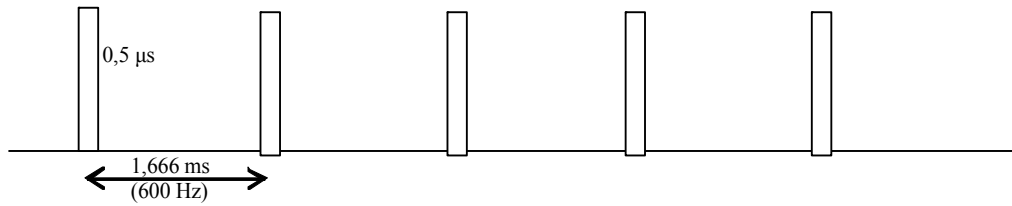
- Une élévation opérationnelle variant entre 0° et 90°
- Une largeur d'impulsion variant entre 0,5 et 2,5 μs (pour les radars opérationnels)
- Une fréquence de répétition des impulsions (FRI) variant entre 250 et 1 200 Hz
- Une vitesse de rotation variant entre 1 et 6 tr/min
- L'utilisation de radars donnés de différents systèmes d'émission mélangeant différentes largeurs d'impulsion et FRI, et en particulier l'utilisation de FRI fixes, étagées ou entrelacées (c'est-à-dire différentes FRI pour un même système).

Un exemple de différents systèmes d'émission est proposé à la Fig. 4-3.

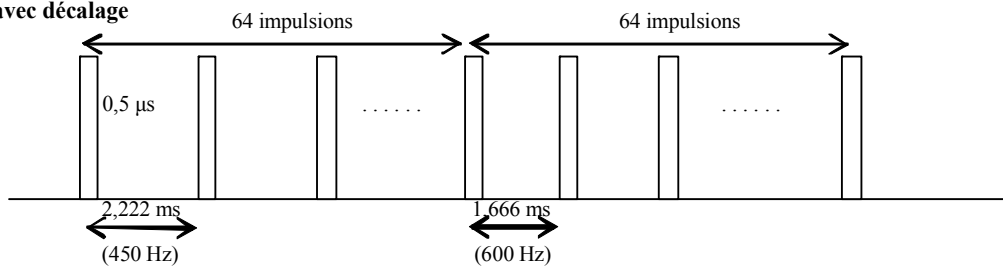
FIGURE 4-3

Types de systèmes d'émission des radars météorologiques

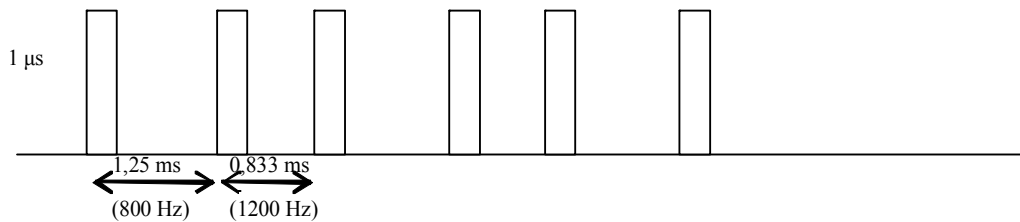
FRI fixe



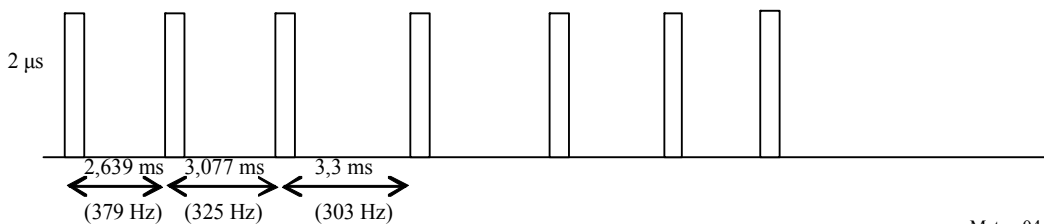
FRI avec décalage



Double FRI entrelacée (double FRI)



Triple FRI entrelacée (triple FRI)



Meteo-04-3

4.2.4.2 Etalonnage du bruit

Etant donné la faiblesse du signal de retour vers les radars météorologiques, le niveau de bruit doit être extrait du signal afin d'obtenir les mesures les plus précises possibles pour déterminer les produits météorologiques pertinents.

Si l'on note N , le niveau de bruit et S le signal utile (c'est-à-dire le retour de signal météorologique), les radars météorologiques réalisent les processus suivants:

- 1) Pour chaque porte, le radar mesure le signal de retour correspondant au signal utile (S) et le bruit (N), c'est-à-dire $N + S$.
- 2) Pour obtenir S , le radar extrait de $N + S$, le niveau de bruit N .

- 3) Ensuite, à partir de S , le radar peut déterminer tous les produits météorologiques, comme les précipitations (dBz) ou la vitesse des vents par analyse Doppler.

Le signal S doit être aussi juste que possible pour obtenir les produits météorologiques les plus précis, ce qui signifie que le calibrage de bruit du radar est une question essentielle.

Ce calibrage de bruit, aussi appelé «**vérification du zéro**», est par conséquent réalisé régulièrement, soit pendant des émissions de radar ordinaires (par estimation) ou pendant des périodes spécifiques de mesure (voir la stratégie de balayage en exemple ci-dessous).

Il faut noter que, pour plusieurs radars, cette mesure de bruit est réalisée sans aucune émission de radar, ce qui signifie qu'il peut y avoir un impact sur la conception de certains systèmes radioélectriques visant à détecter le signal radar pour réduire les interférences ou, dans le cas d'interférences pendant le calibrage, qu'un impact est possible sur toutes les mesures radar faisant suite à ce calibrage, et probablement sur la stratégie complète de balayage. En particulier, cette interférence entraînerait probablement la présentation de mesures d'intensité de précipitations plus basses que le niveau réel, avec des conséquences évidentes sur les processus opérationnels et les processus d'alertes.

4.2.4.3 Stratégies de balayage

Les différents systèmes d'émission décrits ci-dessus sont utilisés sur plusieurs radars dans leur stratégie de balayage, durant laquelle, à différentes élévations et vitesses de rotation, un système d'émission est transmis. Ici encore, il n'existe aucune stratégie de balayage type, celles-ci variant selon plusieurs paramètres, y compris les exigences météorologiques de base, l'environnement du radar, les conditions météorologiques spécifiques, etc.

Un exemple de stratégie de balayage est donné aux Fig. 4-4 et 4-5.

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 (dus à la végétation qui ondule sous le vent). Ceux dus à d'autres cibles que les précipitations, appelés échos de sol, doivent être éliminés. On a recours à différentes méthodes de suppression des échos de sol avec les radars actuels.

- Utilisation d'un filtre Doppler passe-haut pour réduire les échos 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 des échos 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 des échos 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 réfléchissantes 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 les échos de sol est importante. Les progrès récents dans ce domaine font appel à des émetteurs cohérents, comme les klystrons ou les tubes à ondes progressives (TOP). Dans le radar classique, la pureté de phase du spectre est actuellement limitée par la technologie du magnétron. Toutefois, les magnétrons peuvent produire de manière économique une puissance moyenne élevée qui permet d'accroître le rapport signal/bruit.

4.2.6 Radars à double polarisation

La technologie radar polarimétrique ou à double polarisation permet de déterminer la nature des diffuseurs par télédétection de leur forme. Le radar météorologique polarimétrique permet une meilleure détection des hydrométéores en améliorant la fiabilité et la précision des mesures de l'intensité des précipitations, pour les applications hydrologiques. En fait, les gouttes de pluie ont tendance à s'aplatir dans leur chute (sphères obsoletes), phénomène qui augmente avec la taille des gouttes dans le sens horizontal. En combinant les mesures de la réflectivité et des phases au moyen de deux polarisations, horizontale (h) et verticale (v), il est possible de mieux évaluer les coefficients a et b de la relation $Z-R$.

Des algorithmes récemment mis au point, basés sur le rapport de réflectivité différentielle Z_h/Z_v et sur la phase différentielle $\phi_h - \phi_v$, compte tenu également de l'atténuation différentielle, sont jugés très prometteurs pour une évaluation exacte des précipitations.

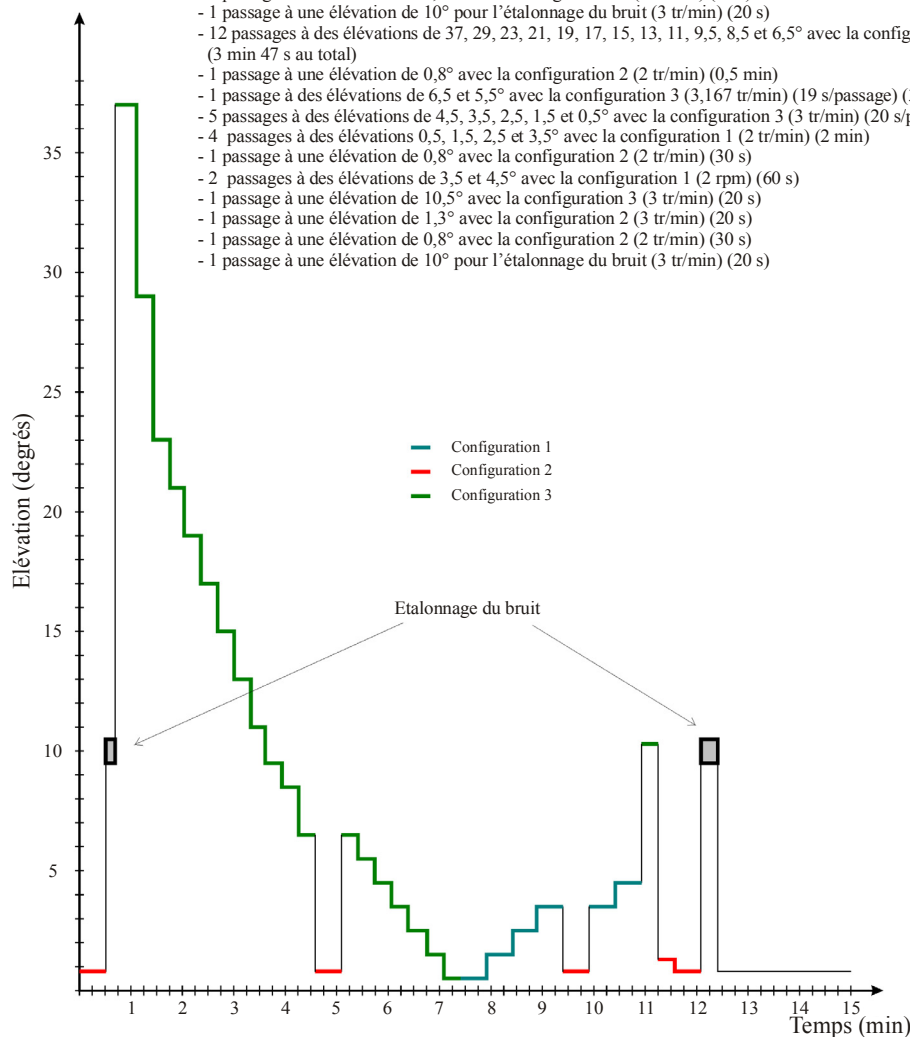
Outre leur forme, les hydrométéores se distinguent par leurs constantes diélectriques, facteur déterminant dans le calcul des sections de diffusion et d'atténuation. Les propriétés diélectriques des hydrométéores varient selon la fréquence radar, l'eau liquide et la glace réagissant de manière très différente.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

FIGURE 4-4

Description d'une stratégie de balayage de 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) (3 min 47 s au total)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (0,5 min)
- 1 passage 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 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 rpm) (60 s)
- 1 passage à une élévation de 10,5° avec la configuration 3 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 1,3° avec la configuration 2 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 1 passage à une élévation de 10° pour l'étalonnage du bruit (3 tr/min) (20 s)



4.2.7 Données de base obtenues avec un radar météorologique conventionnel

Un radar météorologique Doppler fournit trois catégories de données de base à partir des signaux de retour: la réflectivité à la base, la vitesse radiale moyenne et la largeur du spectre. Toutes les autres données sont des dérivés de ces trois données de base. La précision des données de base est souvent le principal critère de performance qui guide la conception d'un radar. Si le degré de précision attendu à ce premier niveau n'est pas atteint, comme indiqué au Tableau 4-2, on ne peut garantir la précision des données qui en seront dérivées.

FIGURE 4-5

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

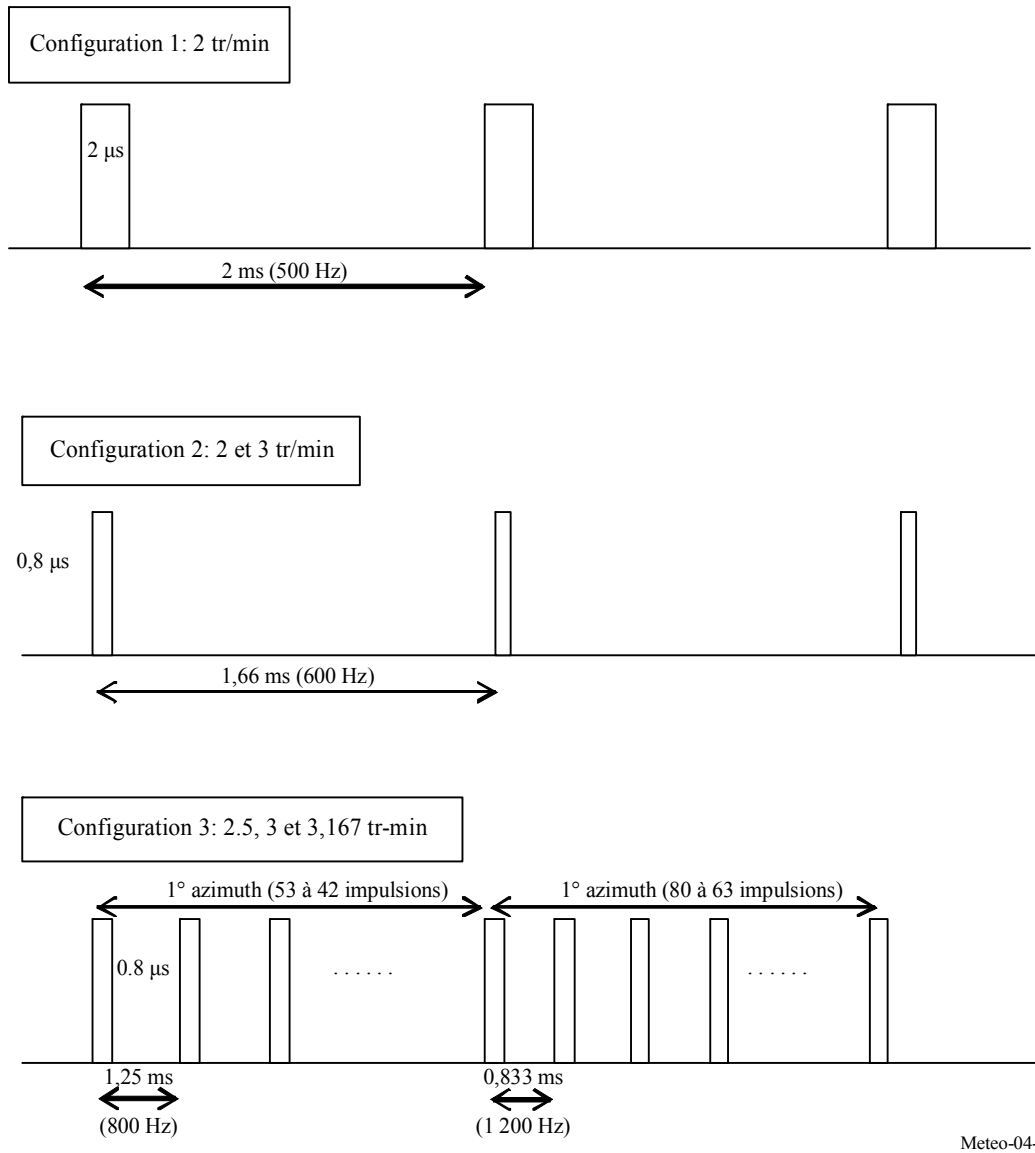


TABLEAU 4-2

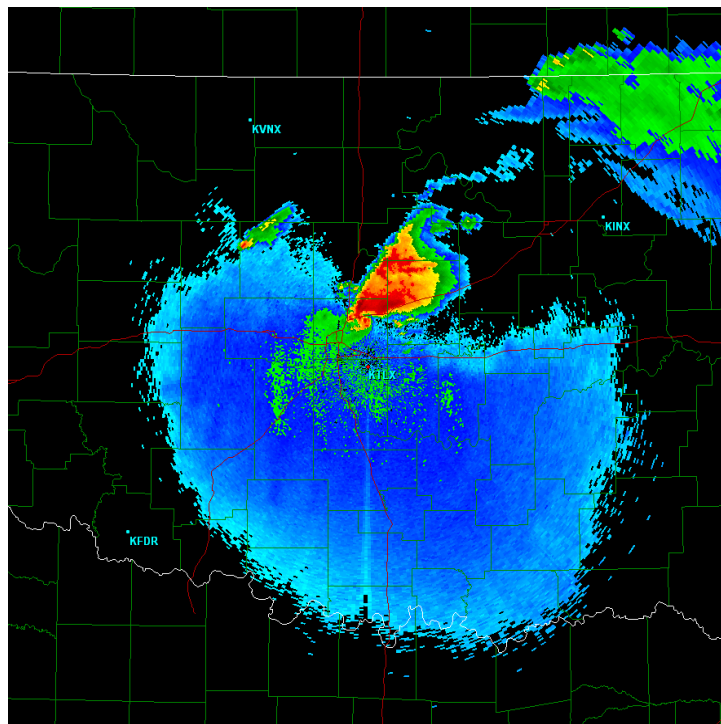
Illustration des exigences de précision des données de base attendues d'un radar

| Donnée de base | Exigence de précision de conception |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Réflectivité à la base | < 1 dB |
| Vitesse radiale moyenne | < 1 m/s |
| Largeur du spectre | < 1 m/s |

4.2.7.1 Réflectivité à la base

La réflectivité à la base est une valeur que l'on retrouve dans de nombreuses applications de radar météo, la plus importante étant l'estimation de l'intensité des précipitations. La réflectivité à la base désigne l'intensité des impulsions de retour et est calculée à partir d'une moyenne linéaire de la puissance de retour. Toute interférence subie par le radar renforce la puissance de l'impulsion de retour et biaise les valeurs de réflectivité. Les mesures de réflectivité seront erronées si ce biais dépasse les exigences de précision des données à la base.

FIGURE 4-6
Représentation typique de la réflectivité

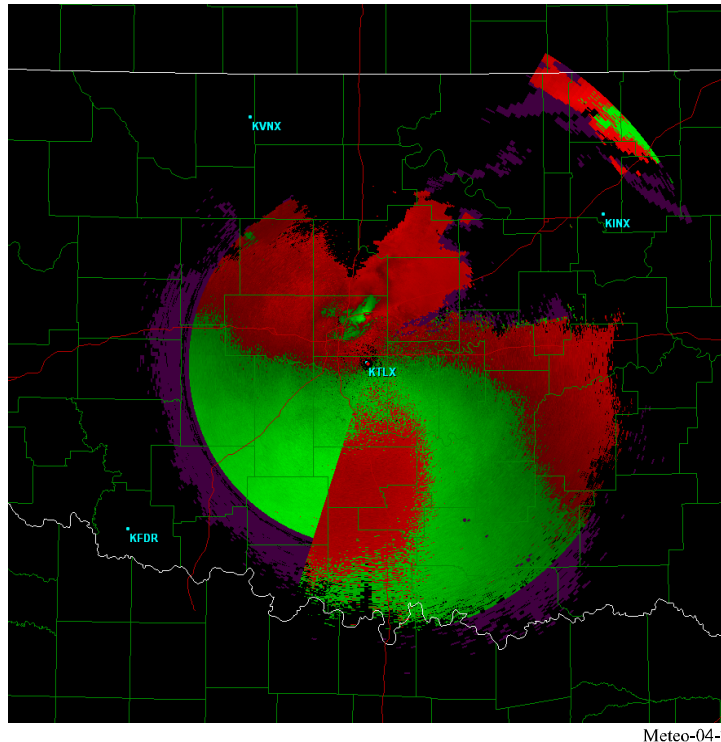


Meteo-04-6

4.2.7.2 Vitesse radiale moyenne

La vitesse radiale moyenne, également appelée vitesse Doppler moyenne, représente la vitesse moyenne des cibles pondérée selon la réflectivité, au sein du volume étudié. La vitesse radiale moyenne se réfère à la densité spectrale du moment d'ordre 1; autrement dit, la vitesse radiale à la base. On utilise un grand nombre d'impulsions successives pour la déterminer et elle se calcule à partir de l'argument de variance complexe avec décalage simple. L'argument de covariance complexe donne une estimation du déplacement angulaire du vecteur du signal Doppler entre deux impulsions radar. La vitesse angulaire du vecteur Doppler est égale au déplacement divisé par l'intervalle de temps entre deux impulsions. Le spectre Doppler révèle la distribution des vitesses, pondérée selon la réflectivité et selon la sensibilité du radar, au sein du volume radar.

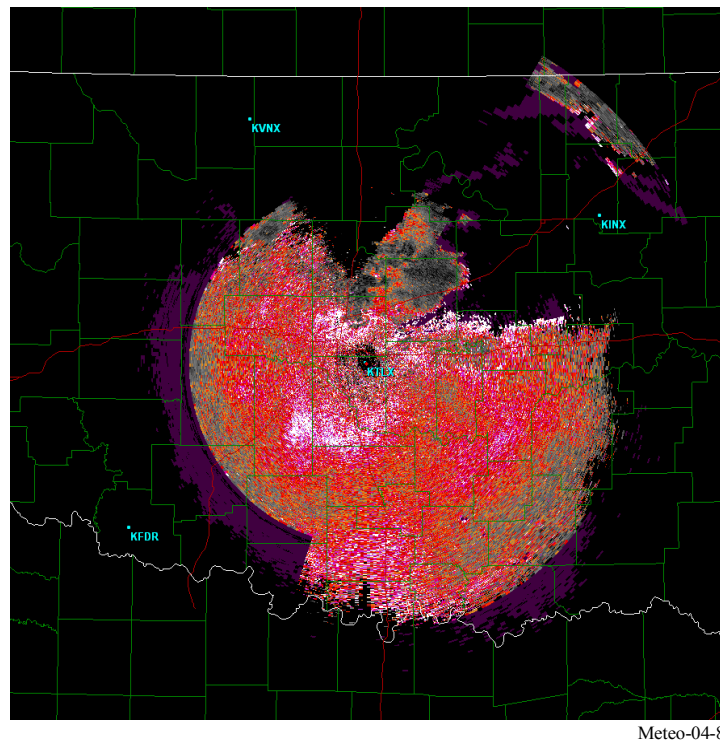
FIGURE 4-7
Représentation typique de la vitesse radiale



4.2.7.3 Largeur du spectre

Avec un radar de conception conforme, la largeur du spectre est calculée à partir de la corrélation avec décalage simple, en prenant comme hypothèse une densité spectrale gaussienne. C'est une mesure de la dispersion des vitesses au sein du volume radar étudié, et l'écart-type du spectre de vitesse. La largeur spectrale dépend des gradients de réflectivité et de vitesse à l'échelle du volume d'impulsions et des turbulences au sein du volume d'impulsions [Doviak et Zrníc 1984]. On ne fait pas la moyenne des échantillons utilisés pour les calculs de largeur du spectre. On procède, par contre, à l'accumulation des composantes réelles et imaginaires des séries d'échantillons, autrement dit les échantillons pris sur la radiale.

FIGURE 4-8
Représentation typique de largeur de spectre



Meteo-04-8

4.2.7.4 Produits de radars météorologiques à double polarisation

4.2.7.4.1 Réflectivité différentielle

La réflectivité différentielle est un produit des radars météorologiques polarimétriques. C'est le rapport de la puissance de retour réfléchi horizontale et verticale. C'est un bon indicateur de la forme des gouttes, laquelle permet d'estimer la taille moyenne des gouttes.

4.2.7.4.2 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est un produit des radars météorologiques polarimétriques. C'est une corrélation statistique entre la puissance de retour réfléchi horizontale et verticale. Ce coefficient décrit les similarités des caractéristiques de rétrodiffusion des échos polarisés horizontalement et verticalement. C'est un bon indicateur des régions présentant plusieurs types de précipitations, comme la pluie et la neige.

4.2.7.4.3 Rapport de dépolarisation linéaire

Le rapport de dépolarisation linéaire est un autre produit des radars météorologiques polarimétriques. C'est le rapport d'un retour de puissance vertical d'une impulsion horizontale ou d'un retour de puissance horizontal d'une impulsion verticale. C'est également un bon indicateur des régions présentant plusieurs types de précipitations.

4.2.7.4.4 Phase différentielle spécifique

La phase différentielle spécifique est un autre produit des radars météorologiques polarimétriques. C'est une comparaison de la différence de phase de retour entre les impulsions horizontales et verticales. Cette différence de phase est le résultat de la différence du nombre de cycles d'onde (ou longueurs d'onde) le long du trajet de propagation des ondes polarisées horizontalement et verticalement. A ne pas confondre avec le déplacement de fréquence Doppler, lequel est causé par le mouvement des particules de nuage et de précipitation. Contrairement à la réflectivité différentielle, au coefficient de corrélation et au rapport de dépolarisation linéaire, tous dépendants de la puissance réfléchi, la phase différentielle spécifique est un «effet de propagation». C'est également une très bonne estimation de l'intensité des précipitations.

4.2.7.5 Données dérivées

L'ordinateur central traite les données de base pour fournir à l'utilisateur du radar des données dérivées exploitables. Nous ne traitons pas ici de ces données dérivées car elles varient grandement en type et en nombre selon le radar utilisé. La précision des données dérivées exige bien entendu que la précision des données de base soit gérée et maintenue avec soin.

4.2.8 Besoins actuels et futurs de spectre

A l'instar de nombreux systèmes radioélectriques, 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'atténuation de la pluie, qui baisse à mesure que λ augmente et devient négligeable aux longueurs d'onde décimétriques, la précision des données et le coût. 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, 10 cm) quand on veut déceler les fortes pluies à de très longues distances (jusqu'à 300 km) sous les climats tropicaux et tempérés.

La bande C (5 600-5 650 MHz, avec une longueur d'onde de 5,4 cm) est généralement préférée sous les climats tempérés car elle représente un bon compromis entre les paramètres susmentionnés, permettant 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 étant 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 une atténuation plus forte, ils servent uniquement pour l'observation météorologique à très faibles distances (environ 50 km). Ces radars servent aux études du développement 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. 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 vitesse non ambiguë maximale pouvant être mesurée est déterminée par la fréquence de répétition des impulsions (FRI). 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.

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 § 4.2.4).

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.

Les valeurs dont données pour deux types de technologies (magnétrons et klystrons ou 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.

4.2.9 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 ne faut pas oublier 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.

4.2.9.1 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, ou de localiser et suivre les ouragans, les typhons, les tornades, les coups de vent et autres phénomènes typiques des tempêtes. Selon 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 les Recommandations ITU-R appropriées, avec plus particulièrement $I/N = -10$ dB maximum pour le brouillage constant.

4.2.9.2 Impact d'un brouillage constant

4.2.9.2.1 Couverture géographique

Un brouillage constant peut limiter la portée du radar et donc la zone géographique couverte du fait de l'intensification du bruit correspondant. La couverture des radars météorologiques atteint actuellement environ 200 km. Le Tableau 4-3 indique les pertes de portée et de couverture à mesure que le brouillage (le bruit) augmente.

4.2.9.2.2 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.

TABLEAU 4-3
Pertes de portée et de couverture

| Augmentation du bruit (dB) | <i>I/N</i> (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% |

TABLEAU 4-4
Augmentation de l'intensité des précipitations

| Augmentation du bruit (dB) | <i>I/N</i> (dB) correspondant | Augm. intensité des stratiformes (%) | Augm. intensité des convections (%) | Augm. intensité de la neige (%) | Augm. intensité des grêlons (%) |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 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 |

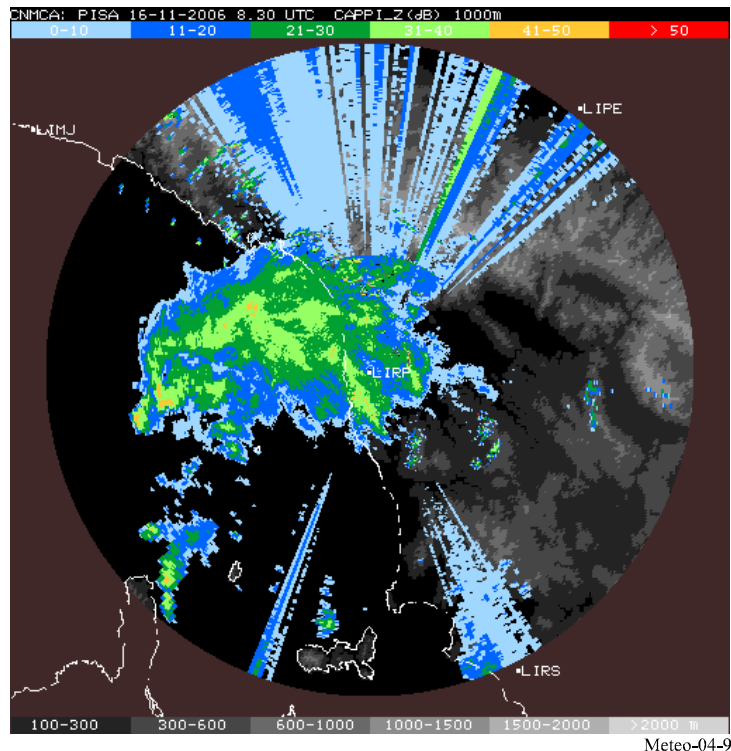
Sachez que l'augmentation du brouillage ne modifiera en rien la capacité des radars à détecter les foyers pluvieux (autrement dit, une mesure d'autre chose qu'un foyer pluvieux ne pourra pas être considérée comme telle) mais bien la mesure de l'intensité des précipitations.

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. 4-9 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 4-9

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



4.2.9.2.3 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.

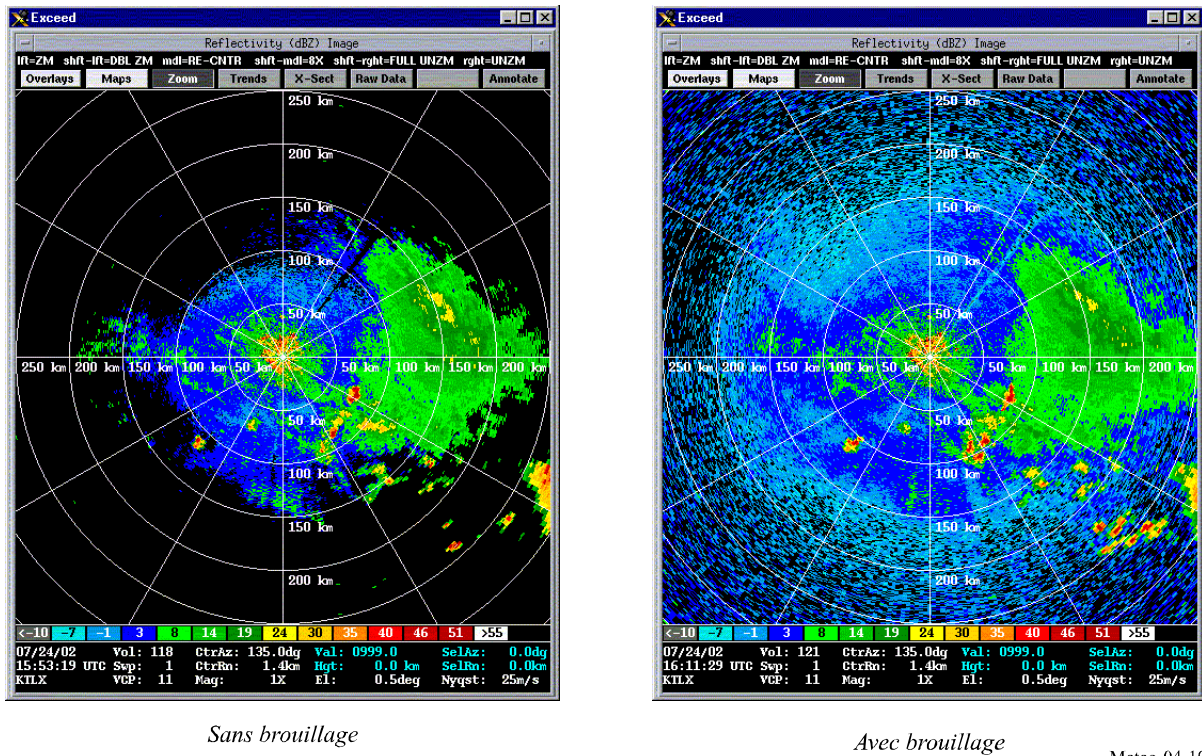
De plus, on peut également estimer que lorsque le niveau de brouillage est nettement inférieur au signal attendu, la phase de ce dernier ne sera pas modifiée tandis que, au contraire, si le signal de brouillage est nettement supérieur, alors la phase détectée par le radar sera la phase du signal de brouillage.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

4.2.9.3 Impact d'un brouillage par impulsion

Le brouillage par impulsion peut modifier grandement les données de réflectivité utilisées pour prévoir les phénomènes météorologiques extrêmes. Parfois, le brouillage par impulsion donne 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. 4-10.

FIGURE 4-10

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



Meteo-04-10

4.2.9.4 Brouillage causé par les parcs éoliens

Ces dernières années, des éoliennes toujours plus imposantes sont fabriquées pour profiter de champs de vent plus élevés et favorables, pour disposer de génératrices toujours plus performantes, etc. Bien entendu, l'intérêt économique en est le principal moteur et des analyses ont montré qu'il était judicieux de construire de plus grandes éoliennes. Normalement, une éolienne se compose d'une tour, d'une nacelle, d'un rotor et de trois pâles. Une centrale de production d'électricité, ou parc éolien, se compose de nombreuses génératrices d'énergie éolienne. 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 potentiel 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. Selon la sensibilité des radars météorologiques, leur performance peut être grandement détériorée par les éoliennes, si elles se trouvent dans la ligne de visée d'un radar. Les trois mécanismes qui peuvent contribuer à la dégradation de performance sont le masquage, l'écho et la rétrodiffusion.

4.2.9.4.1 Masquage

Toute caractéristique géographique ou structure qui se trouve entre le radar et la cible va créer un effet d'ombre ou de masquage. Selon leur taille, les éoliennes peuvent provoquer des effets d'ombre. De tels effets peuvent tout à fait varier en fonction des dimensions de l'éolienne, du type du radar émetteur et de l'aspect de l'éolienne par rapport au radar.

4.2.9.4.2 Echo

Un radar peut recevoir des signaux de toute surface réfléchissante d'onde radar. Dans certaines zones géographiques, ou dans des conditions météorologiques particulières, la performance des radars peut être altérée par des retours indésirables, qui risquent de masquer les signaux attendus. De tels retours indésirables sont appelés échos parasites. La proximité d'une ou de plusieurs éoliennes peut poser des problèmes opérationnels à celui qui exploite un radar météorologique en vue de prévoir le temps.

Les signaux des échos de sol ont une forte réflectivité, un déplacement de fréquence Doppler proche de zéro, une petite largeur de spectre et leur position reste cohérente. Par rapport à ces échos de sol (GC, *ground clutter*), le brouillage des éoliennes pose un problème bien plus épineux. Les réflexions proviennent directement de la tour (stationnaire) et des pâles (non stationnaires). Comme pour les GC, le signal de l'écho de l'éolienne (WTC, *wind turbine clutter*) conserve une très forte réflectivité, avec une possible modulation du fait de la rotation des pâles qui entraîne un écart systématique dans la surface équivalente radar.

Le déplacement de fréquence Doppler est sensible à plusieurs facteurs, dont la vitesse de rotation des pâles et l'orientation du rotor par rapport au faisceau radar. Les vitesses Doppler devraient être maximum quand le rotor est orienté à 90° par rapport à la ligne de visée du radar et proches de zéro quand le rotor fait face ou dos au radar. Comme il est probable que le volume de résolution du radar englobe toute la structure de l'éolienne, la largeur de spectre risque d'être considérablement agrandie. Ceci s'explique par la rotation des pâles vers le radar et dans la direction opposée. L'effet sera encore plus fort en présence de plusieurs éoliennes dans un seul volume de résolution.

4.2.9.4.3 Rétrodiffusion d'énergie du fait de turbulences

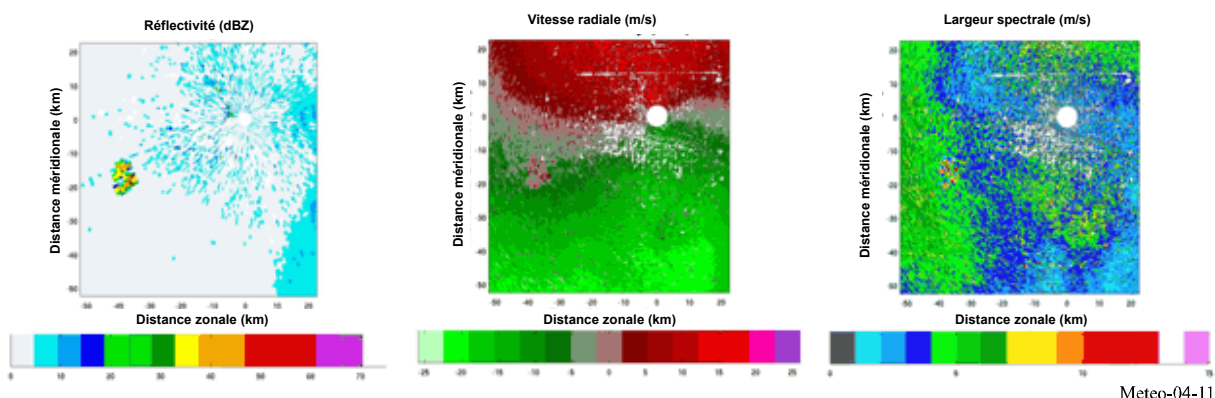
En plus des signaux WTC provenant de réflexions d'éoliennes, il arrive que l'énergie de turbulences dans le sillage d'un parc éolien soit rétrodiffusée. Ces échos devraient avoir des caractéristiques similaires à celles de rétrodiffusion par temps clair liées aux variations turbulentes de l'indice de réfraction de l'air à l'échelle de Bragg du radar. Ces échos de sillage vont dériver avec le champ de vent et leur réflectivité sera probablement moindre que celle des réflexions directes des éoliennes. Toutefois, ils peuvent élargir considérablement la zone de couverture radar touchée par les WTC et venir donc compliquer encore le problème.

4.2.9.4.4 Exemples d'échos d'éoliennes, WTC

Deux exemples distincts de brouillage causé par les parcs éoliens⁵ sont donnés à la Fig. 4-11 [Palmer et Isom, 2006] on s'y attendait, 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.

FIGURE 4-11

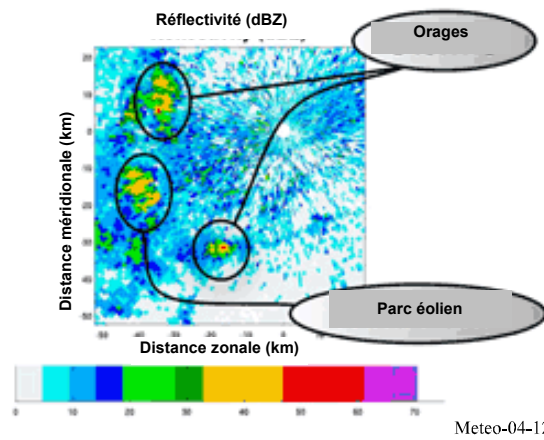
Exemples de brouillage de radar météo causé par un parc éolien en conditions de ciel clair



La Fig. 4-12 illustre le même parc éolien lors d'un orage.

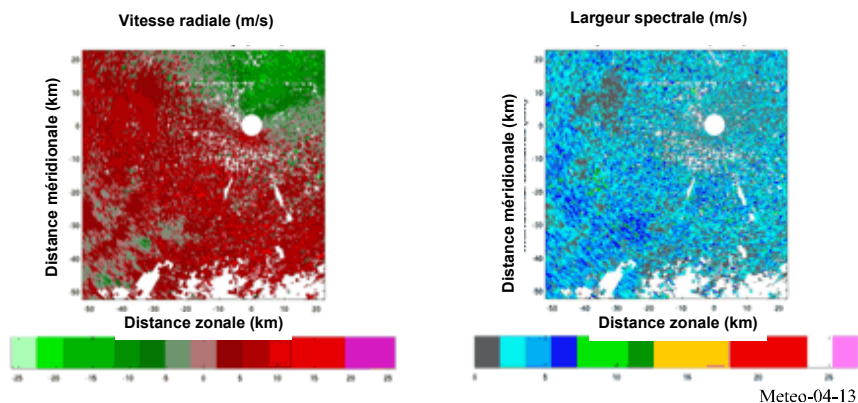
⁵ Les parcs éoliens sont des champs d'éoliennes qui servent à produire de l'électricité.

FIGURE 4-12
Exemple de brouillage causé par un parc éolien et de son impact sur la réflectivité en situation d'orage isolé



Sans connaissance préalable, il aurait été extrêmement difficile de distinguer les WTC et les orages. Comme la rotation des pâles va vers le radar et dans la direction opposée, on aurait pu s'attendre à une vitesse Doppler moyenne proche de zéro. Bien entendu, les grandes largeurs de spectre nuisent à la précision des estimations de vitesses Doppler comme illustré à la Fig. 4-13 où on constate de légers écarts du zéro.

FIGURE 4-13
Exemple d'estimations de vitesses Doppler lors d'un orage



4.2.9.4.5 Impact des WTC sur le fonctionnement des radars météorologiques et sur la précision des prévisions

De récentes études sur le terrain illustrent l'impact des WTC 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 l'écho produit par une éolienne se propage sur un vaste secteur (plusieurs dizaines de degrés) dans le sens 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.

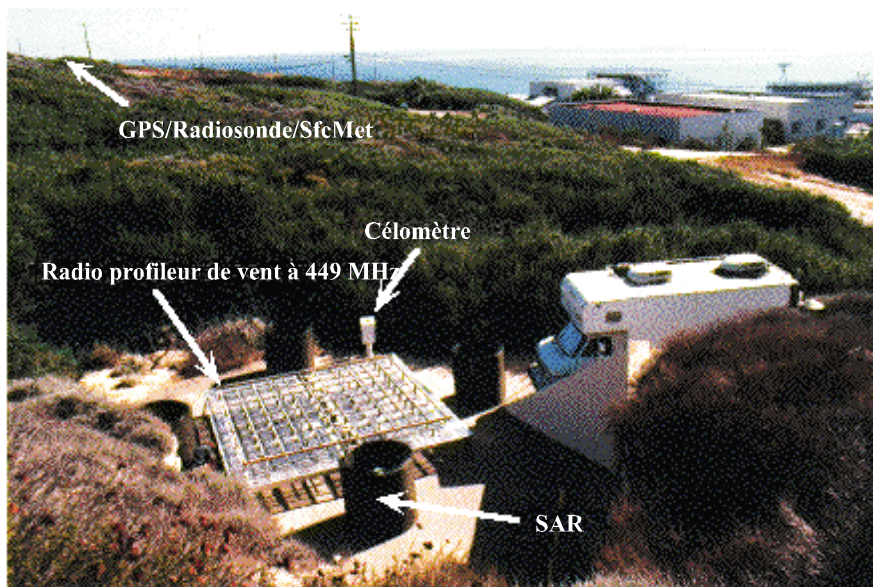
4.2.10 Vulnérabilités des systèmes partageant leur bande avec d'autres radars météorologiques

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.

4.3 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 4-14 est une photographie d'une installation classique de radar profileur de vent.

FIGURE 4-14
Photographie d'une installation de radar profileur de vent



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 les dérèglements importants dans le champ de vitesse vertical (ondes de gravité et ascendances de convection), mesurer l'intensité de turbulences ou encore la stabilité atmosphérique. Ils peuvent également donner des informations détaillées sur la température virtuelle de l'air par l'ajout d'un système de sondage radio-acoustique (RASS, *radar acoustic sounding system*).⁶

4.3.1 Applications

L'équation suivante, reformulée 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 (degrees)
- 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 la structure (adimensionnel).

Dans cette équation, le paramètre de la structure est indépendant de la fréquence mais est nettement fonction de la hauteur. Presque toute la dépendance vis-à-vis de la fréquence est liée au facteur longueur d'onde, mais la température de bruit d'un récepteur radar bien conçu comprend un apport notable de bruit cosmique à basse fréquence. Cette équation n'est valide que dans la sous-gamme inertielle de la turbulence atmosphérique, ce qui restreint à une plage d'environ 10 à 0,2 m (30 MHz à 1500 MHz) le choix de longueurs d'onde du profileur de vent. Soulignons que la turbulence se dissipe rapidement sous forme de chaleur par viscosité hors de la sous-gamme inertielle et à de courtes longueurs d'onde.

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;

⁶ 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. 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.

- 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 porte 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 de la sous-gamme inertielle 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 quand le courant-jet est 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 ne constituent pas des moyens intéressants d'accroître la performance.

S'agissant des ouvertures d'antenne, toutefois, un autre facteur détermine une taille minimale. Pour relever les données, les profileurs multifaisceaux projettent successivement le faisceau principal vers deux ou quatre azimuts orthogonaux, à des angles d'environ 75° et souvent à la verticale. La largeur du faisceau doit être assez faible pour délimiter ces deux, quatre ou cinq 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 250 m à basse altitude et de 1 000 m à haute altitude, au moyen d'antennes présentant un gain de 32 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.

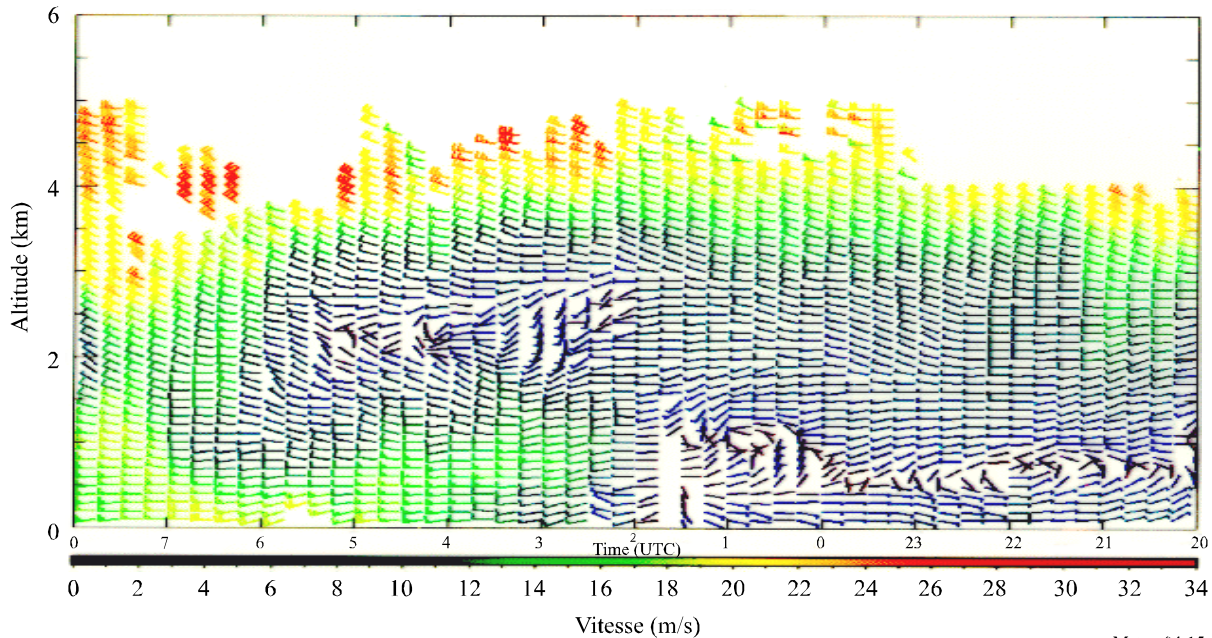
Un troisième mode, à très basse altitude, permettrait de faire passer la porte distance inférieure de 0,5 km à 0,25 km et d'amener peut-être la résolution verticale à 150 m ou 200 m, tout en restant dans la largeur de bande de 2 MHz.

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 de 8 MHz ou plus.

On voit à la Fig. 4-15 un graphique vitesse des vents/altitude produit par un profileur mobile fonctionnant à 924 MHz. 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 4-15

Vitesse des vents en fonction de l'altitude



Meteo-04-15

4.3.3 Besoins actuels et futurs de spectre

Les 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, de 8 MHz ou 10 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 œuvre les radars profileurs de vent en tant que systèmes du service de radiolocalisation dans les bandes suivantes, en tenant dûment compte de l'incompatibilité possible avec d'autres services et des assignations aux stations de ces services, et donc du principe de l'espacement géographique, en particulier pour les pays voisins, et ayant à l'esprit la catégorie de chacun de ces services:

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

«... qu'au cas où la compatibilité entre les radars profileurs de vent et les autres systèmes radioélectriques fonctionnant dans la bande 440-450 MHz ou 470-494 MHz ne pourrait pas être assurée, on pourrait envisager d'utiliser la bande 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) 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. Par exemple, un poste mobile d'amateur syntonisé sur la fréquence centrale du radar a pu détecter un signal sonore de profileur jusqu'à 3 km de distance, sur une plaine herbeuse.

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 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° 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.

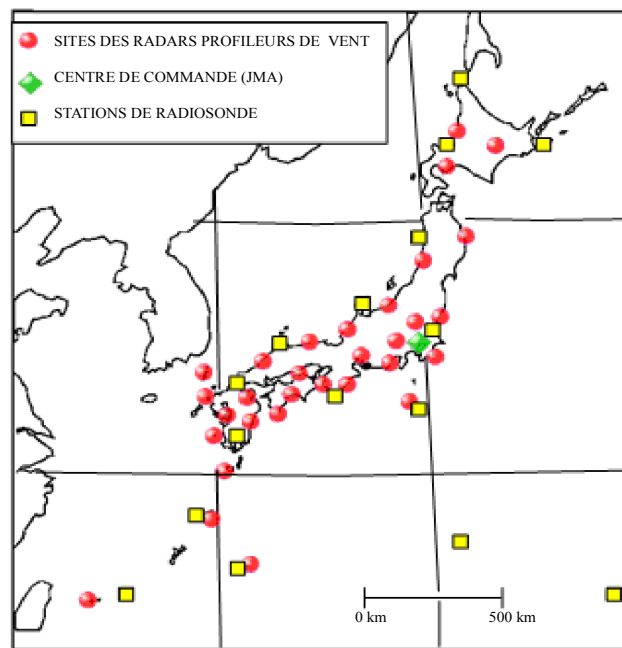
La Résolution 217 (CMR-97) désigne le spectre à utiliser par les radars profileurs de vent. Il est déconseillé de recourir à d'autres bandes, par exemple 400,15-406 MHz. Les techniques servant à atténuer le brouillage des satellites dans cette bande conviennent aussi aux autres bandes.

Autre exemple de partage avec les 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 Electroniques. 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-et-un profileurs de vent de 1,3 GHz installés partout au Japon et qui communiquent avec un centre de contrôle situé au siège du JMA à Tokyo (Fig. 4-16).

FIGURE 4-16

Exemple d'un réseau de radars profileurs de vent



Les données de ce système sont utilisées comme valeurs initiales pour l'établissement de tous les modèles de prévisions météorologiques numériques du JMA depuis juin 2001, en vue de faciliter la prévision des phénomènes extrêmes. Ces données sont recoupées avec celles de radars Doppler et d'aéronefs commerciaux pour obtenir une analyse complète d'observation des vents en altitude. Ces analyses sont ensuite diffusées dans le monde entier, via le Système mondial de télécommunications (SMT). Elles sont également disponibles sur le site Web du JMA (www.jma.go.jp/jp/windpro/).

Références

- DOVIK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1984] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- GOSSARD, E. E. et STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*. Elsevier, New York, Etats-Unis d'Amérique, 280 pages.
- PALMER, R. et ISOM, B. [February 2006] Mitigation of Wind Turbine Clutter on the WSD88D Network. School of Meteorology. University of Oklahoma, Radar Operations Center Presentation.

Textes de l'UIT-R

- Recommandation UIT-R M.1464-1 – Characteristics of radiolocation radars, and characteristics and protection criteria for sharing studies for aeronautical Radionavigation and meteorological radars in the radiodetermination service operating in the frequency band 2 700-2 900 MHz (2002).

Bibliographie

- DIBBERN, J., MONNA, W., NASH, J. and PETERS, G. (Ed.) [March 2000] COST Action 76. Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Final Report. European Commission, Directorate-General Science, Research and Development.
- DOVIK, R. J. and ZRNIC, D. S. [1993] *Doppler radar and weather observations*. Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- DOVIK, R., ZRNIC, D. and SIRMANS, D. [November 1979] Doppler Weather Radar. *Proc. IEEE*, Vol. 67, 11.
- Intercomparison of Techniques to Correct for Attenuation of C-Band Weather Radar Signals. *J. Applied Meteorology*: Vol. 37, 8, p. 845–853.
- LAW, D. *et al.* [March 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, NTIA Report 93-301, 63 pages. National Telecommunications and Information Administration.
- 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. and COLOM, J. [January 2005] Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteor. Society.
- SESSIONS, W. B. [December 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.
- Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, OMM-N° 8, Organisation météorologique mondiale.

CHAPITRE 5

LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE PASSIVE ET ACTIVE POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES

| | | <i>Page</i> |
|---------|--|-------------|
| 5 | Introduction..... | 62 |
| 5.1 | La radiométrie passive à hyperfréquences | 63 |
| 5.1.1 | Besoins de spectre | 64 |
| 5.1.2 | Observation des paramètres à la surface de la Terre..... | 66 |
| 5.1.2.1 | Observation des mesures sur les surfaces océaniques..... | 66 |
| 5.1.2.2 | Observation des mesures sur les terres émergées..... | 67 |
| 5.1.2.3 | Paramètres auxiliaires pour d'autres instruments de télédétection | 68 |
| 5.1.3 | Caractéristiques techniques..... | 68 |
| 5.1.3.1 | Sensibilité radiométrique | 68 |
| 5.1.3.2 | Seuil ΔP du radiomètre | 69 |
| 5.1.3.3 | Résolution géométrique | 69 |
| 5.1.3.4 | Temps d'intégration..... | 69 |
| 5.1.4 | Conditions d'exploitation types des capteurs passifs..... | 69 |
| 5.1.4.1 | Satellites en basse orbite | 69 |
| 5.1.4.2 | Satellites géostationnaires | 69 |
| 5.1.5 | Principales caractéristiques techniques | 70 |
| 5.1.6 | Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage..... | 71 |
| 5.1.7 | Mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques..... | 71 |
| 5.1.7.1 | Sondeurs atmosphériques verticaux passifs à hyperfréquences | 72 |
| 5.1.7.2 | Mécanisme des sondages atmosphériques verticaux | 73 |
| 5.1.7.3 | Applications des sondages atmosphériques verticaux | 75 |
| 5.1.7.4 | Caractéristiques des capteurs passifs à visée du nadir au voisinage de 60 GHz..... | 76 |
| 5.1.7.5 | Limbo-sondeurs passifs hyperfréquences..... | 77 |
| 5.1.7.6 | Sensibilité des sondeurs passifs hyperfréquences au brouillage | 79 |
| 5.2 | Les capteurs actifs..... | 79 |
| 5.2.1 | Introduction..... | 79 |
| 5.2.2 | Radars à ouverture synthétique (SAR, <i>synthetic aperture radars</i>) | 80 |
| 5.2.3 | Altimètres..... | 82 |
| 5.2.4 | Diffusiomètres..... | 83 |
| 5.2.5 | Radars de précipitations | 85 |
| 5.2.6 | Radars de profil des nuages..... | 85 |
| 5.2.7 | Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs | 86 |
| 5.2.8 | Niveaux de puissance surfacique (PFD, <i>power flux density</i>)..... | 87 |

5 Introduction

Les satellites météorologiques sont connus dans la plupart des régions du monde et les images qu'ils produisent apparaissent régulièrement à la télévision et dans la presse populaire. On a donc 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 mais toujours avec un vif intérêt, 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*.

Tous ces phénomènes sont générés essentiellement depuis les données enregistrées à l'aide de capteurs fonctionnant dans le visible et l'infrarouge, que de nombreux profanes considèrent comme de la «lumière» et non de la «radio». Toutefois, quantité de ces produits et autres produits que le public ne rencontre pas régulièrement sont développés à l'aide d'une grande variété d'hyperfréquences, parfois combinées à d'autres mesures.

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 observations spatiales et à leur assimilation dans des modèles numériques.

Les systèmes de télédétection spatiale les plus employés appartiennent à deux catégories: les systèmes **passifs** et **actifs**, utilisés par le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS).

Dans la **télédétection passive**, on n'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. Le choix des bandes de fréquences appropriées se fonde essentiellement sur des propriétés physiques précises (par exemple la résonance moléculaire) qui ne peuvent être ni modifiées, ni ignorées, ni dupliquées dans d'autres bandes. 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. Ses applications vont de la mesure des caractéristiques de la surface de la mer, notamment la hauteur des vagues et les vents, à 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 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 qui ont une large empreinte, présentent une sensibilité particulière parce qu'ils sont soumis à l'accumulation de rayonnement produit par la multitude

d'émetteurs au sol, dans la bande et en-dehors. Si un seul émetteur de Terre ne risque pas de causer de brouillage, l'effet conjugué d'un grand nombre d'entre eux peut entraîner une accumulation de signaux et venir fausser les mesures effectuées dans ces conditions. C'est ce qui motive les préoccupations actuelles concernant 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 vient de la densité spatiale de ces émetteurs et non de leurs caractéristiques individuelles. La situation tend à devenir de plus en plus critique du fait de la densité croissante de ces systèmes de détection actifs au sol; des cas notables de brouillage ont d'ailleurs déjà été signalés.

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, aux propriétés uniques. 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 interférences susceptibles d'avoir un impact sur une quelconque bande de fréquences «passive» pourront avoir un impact sur les mesures globales d'un composant atmosphérique donné.

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 interférences est attribuable à la nature indéterminée du signal naturel qu'il doit recevoir et à la très faible intensité du rayonnement naturel.

De très faibles niveaux d'interférences 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 peuvent ainsi souvent passer inaperçues et ne pas être corrigées. L'intégrité des données repose donc sur la prévention du brouillage et la seule solution semble être l'imposition de restrictions strictes en matière de brouillage et de limites de puissance à l'échelle mondiale. On peut noter qu'un certain nombre de dispositions du Règlement des radiocommunications évoque l'application de ces limites de puissance aux émetteurs actifs pour protéger les capteurs passifs contre le brouillage au sein et en dehors de la bande.

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 35 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 plateformes spatiales.

5.1 La radiométrie passive à hyperfréquences

La radiométrie passive à hyperfréquences est fondamentale pour l'observation de la Terre. Celle-ci repose sur l'emploi de 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 radiatif et chimique (l'ozone, l'oxyde nitreux et le chlore par exemple).

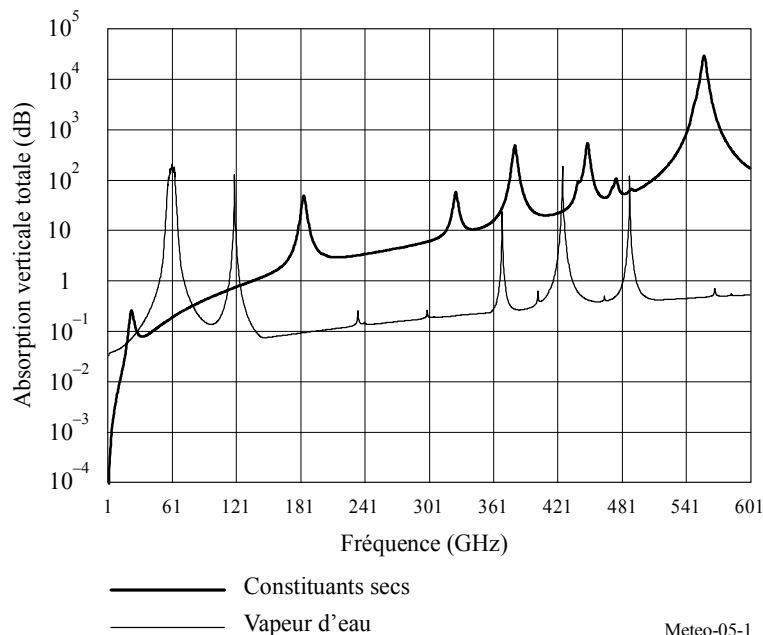
Les techniques à hyperfréquences permettent d'observer la surface de la Terre et l'atmosphère à partir d'une orbite basse, même en présence de nuages car ces derniers sont presque transparents à moins de 100 GHz. Cela présente un intérêt considérable pour l'observation de la Terre car plus de 60% du 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.

5.1.1 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

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



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 inférieures à 1 000 GHz utilisées pour la télédétection passive par satellite*

| Bande de fréquences (GHz) | Largeur de bande requise (MHz)⁽³⁾ | Principales mesures |
|----------------------------------|---|--|
| 1,4-1,427 | 100 (27) | Humidité du sol, salinité, température à la surface de l'océan, indice de végétation |
| 2,69-2,7 | 60 (10) | Salinité, humidité du sol |
| 4,2-4,4 | 200 | Température à la surface de l'océan |
| 6,7-7,1 | 400 | Température à la surface de l'océan (aucune attribution) |
| 10,6-10,7 | 100 | Pluie, neige, glace, état de la mer, vent océanique, température à la surface de l'océan, humidité du sol |
| 15,35-15,4 | 200 (50) | Vapeur d'eau, pluie |
| 18,6-18,8 | 200 | Pluie, état de la mer, glace océanique, vapeur d'eau, neige |
| 21,2-21,4 | 200 | Vapeur d'eau, eau liquide de nuage |
| 22,21-22,5 | 300 (290) | Vapeur d'eau, eau liquide de nuage |
| 23,6-24 | 400 | Vapeur d'eau, eau liquide de nuage |
| 31,3-31,8 | 500 | Canal fenêtre associé aux mesures de la température |
| 36-37 | 1 000 | Pluie, neige, glace océanique, vapeur d'eau, eau liquide de nuage, vent océanique, humidité du sol |
| 50,2-50,4 | 200 | O ₂ (profils de la température) |
| 52,6-59,3 | 6 700 ⁽¹⁾ | O ₂ (profils de la température) |
| 86-92 | 6 000 | Nuages, glace, neige, pluie |
| 100-102 | 2 000 | N ₂ O |
| 109,5-111,8 | 2 300 | O ₃ |
| 114,25-122,25 | 8 000 ⁽¹⁾ | O ₂ (profils de la température), CO |
| 148,5-151,5 | 3 000 | Canal fenêtre |
| 155,5-158,5 | 3 000 | Canal fenêtre (l'attribution se terminera le 1 ^{er} janvier 2018 en vertu du numéro 5.562F du RR) |
| 164-167 | 3 000 | Canal fenêtre |
| 174,8-191,8 | 17 000 ⁽¹⁾ | H ₂ O (profils de l'humidité), nuage, glace, neige, N ₂ O, O ₃ |
| 200-209 | 9 000 ⁽²⁾ | H ₂ O, O ₃ , N ₂ O |
| 226-232 | 6 000 ⁽²⁾ (5 500) | Nuages, CO |
| 235-238 | 3 000 ⁽²⁾ | O ₃ |
| 250-252 | 2 000 ⁽²⁾ | N ₂ O |
| 275-277 | 2 000 ⁽²⁾ | N ₂ O |
| 294-306 | 12 000 ⁽²⁾ | N ₂ O, O ₃ , O ₂ , HNO ₃ , HOCl |
| 316-334 | 10 000 ⁽²⁾ | Profils de la vapeur d'eau, O ₃ , HOCl, H ₂ O, glace de nuage |
| 342-349 | 7 000 ⁽²⁾ | CO, HNO ₃ , CH ₃ Cl, O ₃ , O ₂ , HOCl, H ₂ O, canal fenêtre, glace de nuage et cirrus |
| 363-365 | 2 000 ⁽²⁾ | O ₃ |
| 371-389 | 18 000 ⁽²⁾ | Profils de la vapeur d'eau |
| 416-434 | 18 000 ⁽²⁾ | Profils de la température |

TABLEAU 5-1 (fin)

| Bande de fréquences (GHz) | Largeur de bande requise (MHz) ⁽³⁾ | Principales mesures |
|---------------------------|---|---|
| 442-444 | 2 000 ⁽²⁾ | Vapeur d'eau, glace de nuage et cirrus |
| 496-506 | 9 000 ⁽²⁾ | O ₃ , CH ₃ Cl, N ₂ O, BrO, ClO |
| 546-568 | 22 000 ⁽²⁾ | Profils de la température |
| 624-629 | 5 000 ⁽²⁾ | BrO, O ₃ , HCl, SO ₂ , H ₂ O ₂ , HOCl, HNO ₃ |
| 634-654 | 20 000 ⁽²⁾ | CH ₃ Cl, HOCl, ClO, H ₂ O, N ₂ O, BrO, O ₃ , HO ₂ , HNO ₃ |
| 659-661 | 2 000 ⁽²⁾ | BrO |
| 684-692 | 8 000 ⁽²⁾ | ClO, CO, CH ₃ Cl |
| 730-732 | 2 000 ⁽²⁾ | O ₂ , HNO ₃ |
| 851-853 | 2 000 ⁽²⁾ | NO |
| 951-956 | 5 000 ⁽²⁾ | O ₂ , NO, 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.

(3) Dans certains cas, la bande désirée excède celle attribuée. Le cas échéant, la bande attribuée est indiquée entre parenthèses.

5.1.2 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.

5.1.2.1 Observation des mesures sur les surfaces océaniques

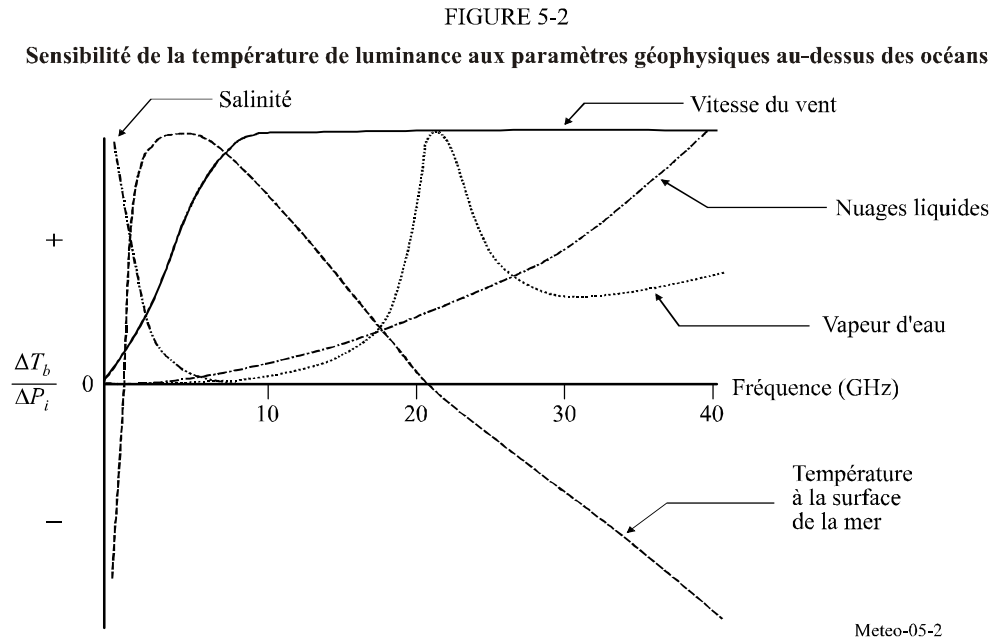
La télédétection sur les surfaces océaniques permet de mesurer quantité des paramètres également mesurés sur les terres (ex. vapeur d'eau, vitesse du vent, intensité des précipitations), ainsi que des paramètres fournissant des informations sur l'état de l'océan (ex. température de surface de la mer,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



5.1.2.2 Observation des mesures sur les terres émergées

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

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

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

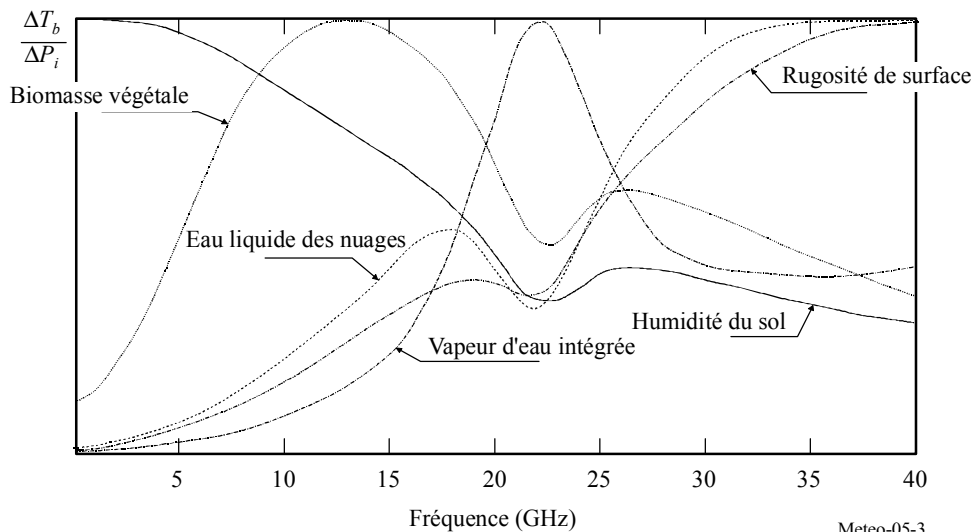
Une fréquence de 85 GHz ou 90 GHz est utile pour surveiller les pluies, mais uniquement lorsque tous les autres facteurs peuvent être évalués à des fréquences plus basses.

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

Il est important de surveiller les zones recouvertes de neige et, là encore, l'emploi de plusieurs fréquences est crucial. 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



5.1.2.3 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 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.

5.1.3 Caractéristiques techniques

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

5.1.3.1 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).

5.1.3.2 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:

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

ΔP est calculé en utilisant ΔT_e . A l'avenir, T_s diminuera ainsi que ΔT_e (voir l'équation (5-1)). Il faut donc 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.

5.1.3.3 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.

5.1.3.4 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.

5.1.4 Conditions d'exploitation types des capteurs passifs

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

5.1.4.1 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.

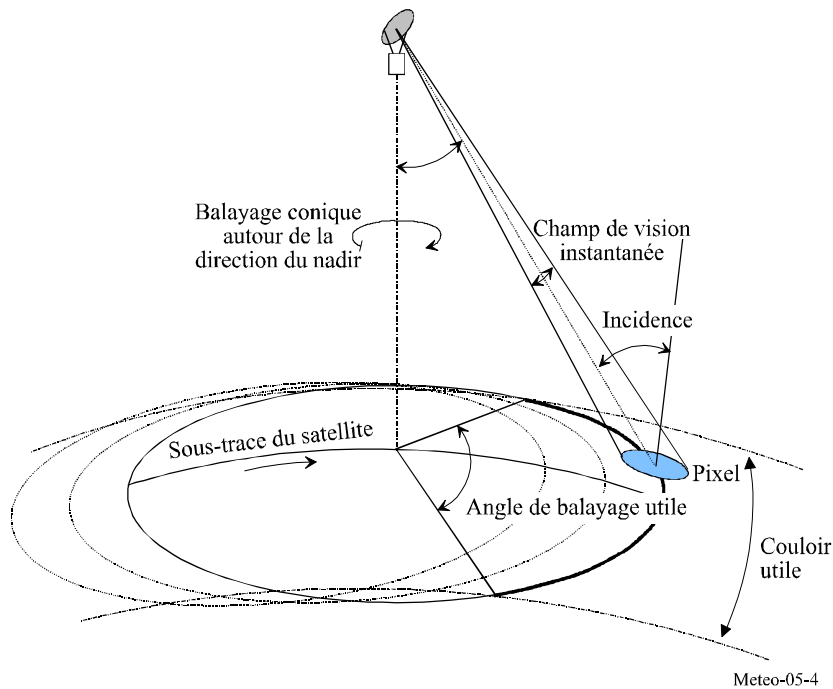
5.1.4.2 Satellites géostationnaires

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.

5.1.5 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 $46,7^\circ$ 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.

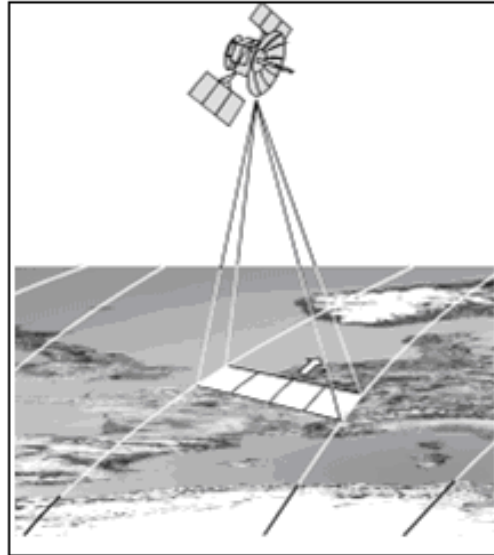
On peut aussi employer des instruments non balayeurs à visée du nadir pour fournir des données auxiliaires à des applications particulières, en éliminant les effets atmosphériques des mesures des altimètres radar. Des techniques interférométriques sont développées afin de faciliter leur mise en place 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 (le long de la trace) 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

5.1.6 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage

Les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage pour les capteurs spatiaux passifs utilisés par le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) sont respectivement décrits dans les Recommandations ITU-R RS.1028 et RS.1029.

5.1.7 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):

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

où:

I : 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

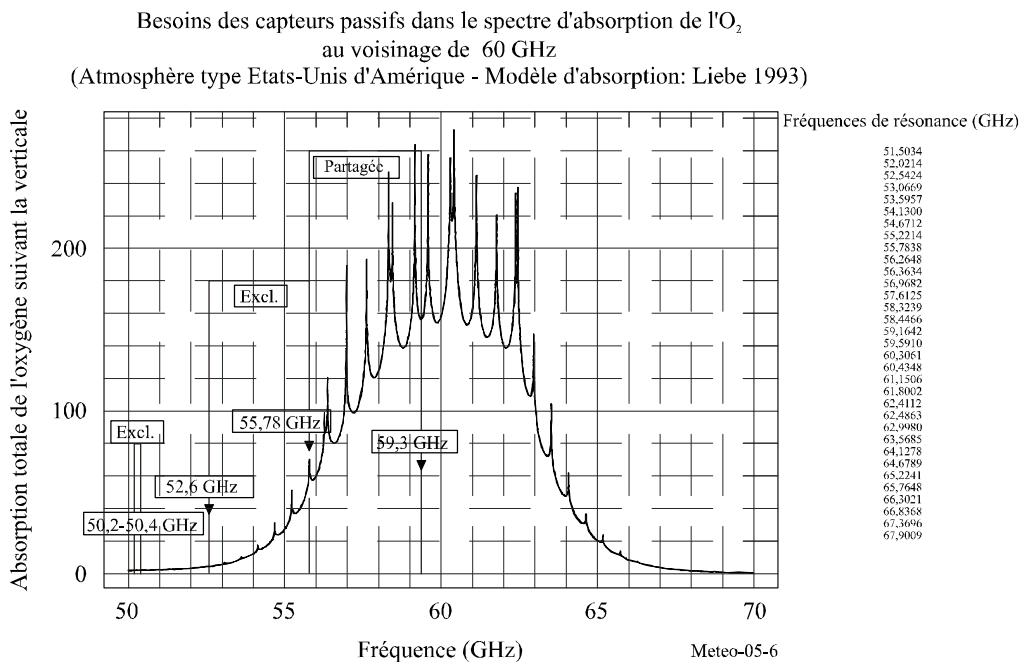
d'obtenir des profils de la température atmosphérique à partir de mesures radiométriques effectuées à diverses fréquences dans les bandes d'absorption voulues (généralement dans l'infrarouge aux environs de 15 μm pour le CO_2 et en hyperfréquence aux alentours de 60 GHz et de 118,75 GHz pour l' O_2).

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

5.1.7.1 Sondes atmosphériques verticales 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 sondes atmosphériques verticales (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)

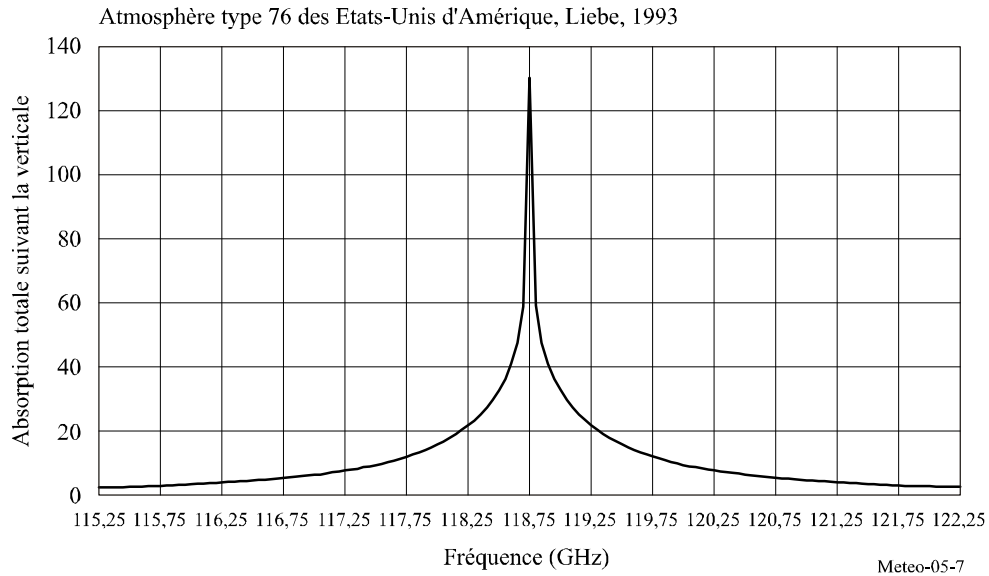
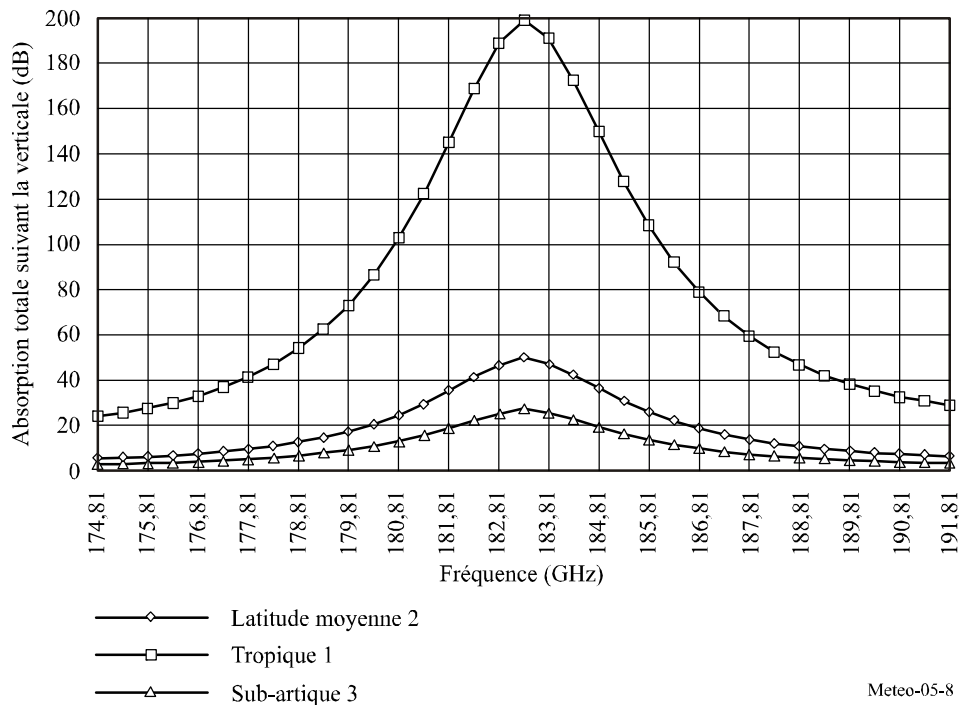


FIGURE 5-8
 Spectre d'absorption de la vapeur d'eau suivant la verticale au voisinage de 183,31 GHz



5.1.7.2 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.

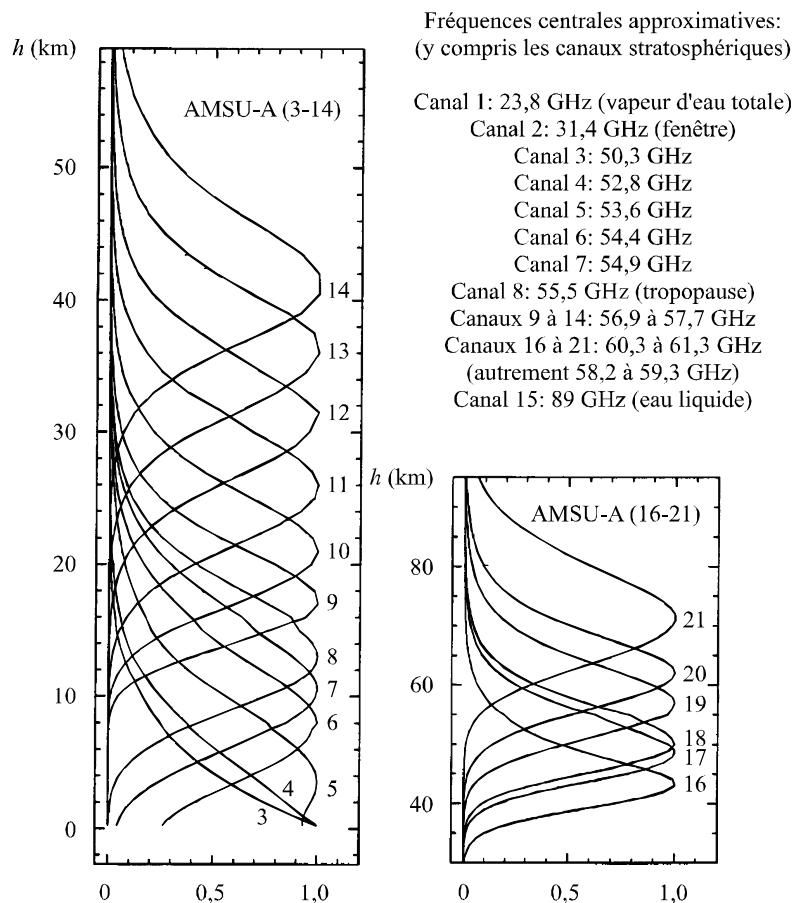
Chaque couche (caractérisée par son altitude) émet un niveau d'énergie proportionnel à sa température locale et à son coefficient d'absorption. L'énergie ascendante (vers le radiomètre) est en partie absorbée par les couches supérieures qui, à leur tour, absorbent en partie les émissions ascendantes 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 survient 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). 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. On peut constater ceci dans la Fig. 5-9:

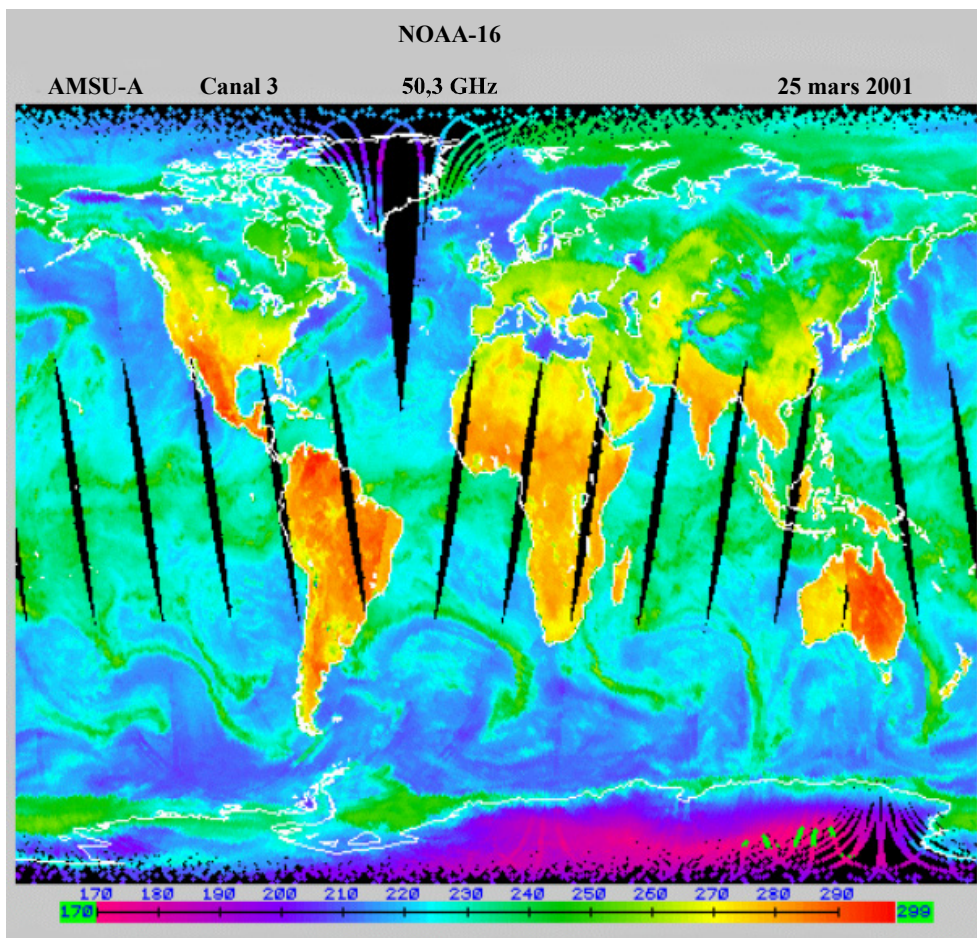
- Le Canal 1 se trouve près d'une crête d'absorption de l'eau. Il sert à extraire la teneur totale en vapeur d'eau le long de la ligne de visée et à déterminer les corrections nécessaires dans les autres canaux.

- 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.

5.1.7.3 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 de 50 km. Par ailleurs, on note une augmentation du nombre de modèles régionaux/locaux destinés à des prévisions plus précises (10 km ou moins), 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



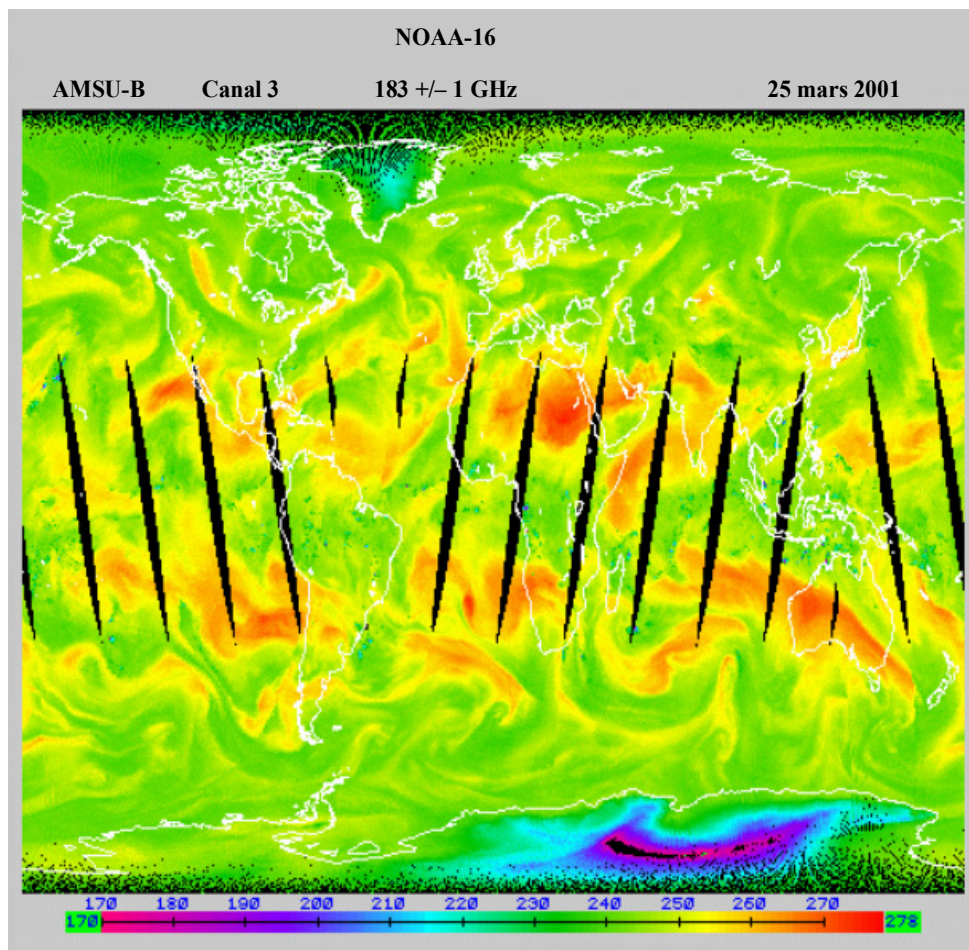
Meteo-05-10

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 luminosité (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 des informations toutes les trois heures.

5.1.7.4 Caractéristiques des capteurs passifs à visée du nadir au voisinage de 60 GHz

La plupart des capteurs passifs à hyperfréquences qui mesurent les paramètres troposphériques et stratosphériques sont des instruments à visée du nadir. Ils emploient une configuration de balayage mécanique croisé (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 croisé (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 |

5.1.7.5 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 les mesures des émissions;
- les limbomesures sont extrêmement sensibles au brouillage causé par les liaisons intersatellite.

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)

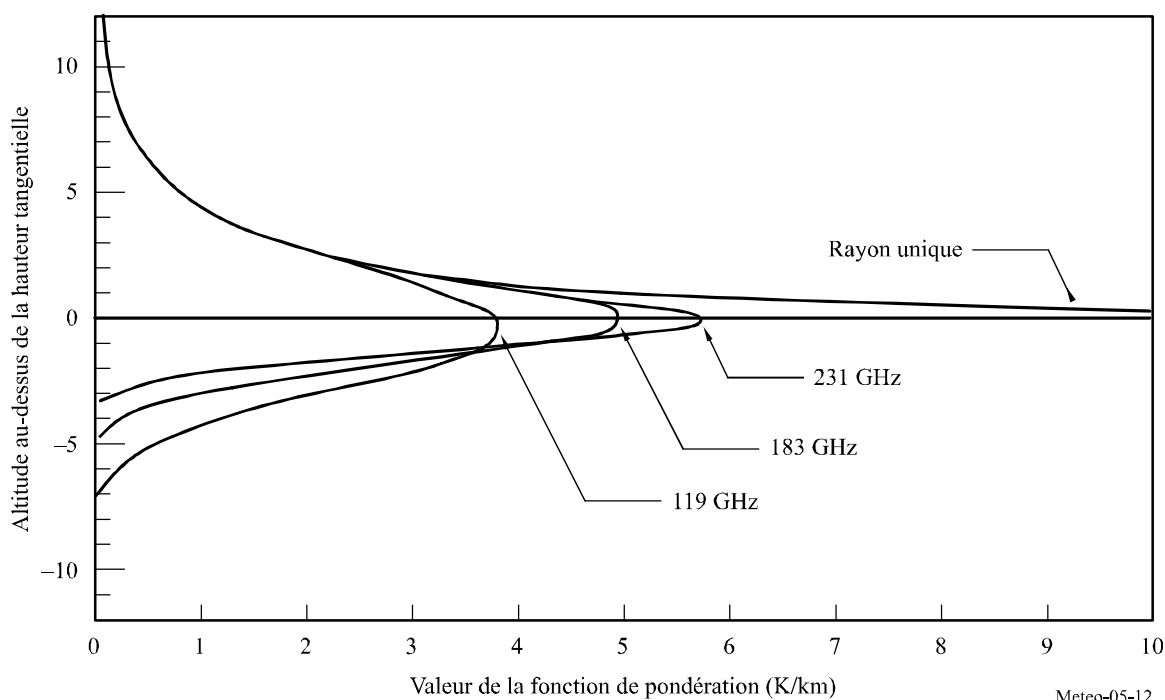


TABLEAU 5-3

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 | | 80-110 | 0,3-1 m gauss (10 s) |
| H ₂ O | | 183 | 15-90 |
| ClO | 205 | 20-40 | 2×10^{-10} v/v (10 s) |
| O ₃ | | 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.

5.1.7.6 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 de détection actifs au sol; des cas notables de brouillage ont d'ailleurs déjà été signalés.

Les 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% 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 rendre impossible la reconnaissance de systèmes météorologiques en formation et faire omettre des indications cruciales sur des tempêtes potentiellement violentes qui se développent rapidement;
- si le brouillage n'est pas détecté, 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.

Les Recommandations UIT-R-RS.1028 et UIT-R-RS.1029 définissent la qualité de fonctionnement radiométrique requise et le niveau de brouillage admissible.

5.2 Les capteurs actifs

5.2.1 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 orientés sur un côté de la trace 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.

Type 3: les diffusiomètres – capteurs observant divers éléments sur les côtés de la trace 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 océanique.

Type 4: les radars de précipitations – capteurs à balayage perpendiculaire par rapport à la trace 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

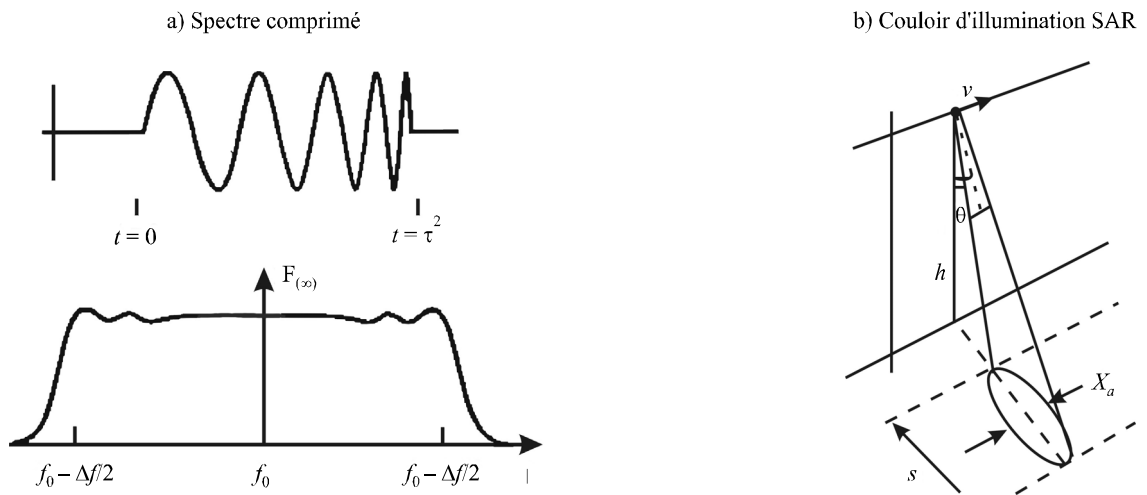
| Caractéristiques | Types de capteurs | | | | |
|---------------------------------|---|-------------------------|--|--|-----------------------------|
| | SAR | Altimètre | Diffusiomètre | Radars de précipitations | Radars de profil des nuages |
| Géométrie de visée | Balayage latéral à 10°-55° par rapport au nadir | Visée du nadir | – Six faisceaux éventail à l'azimut – Deux faisceaux à balayage conique | Visée du nadir | Visée du nadir |
| Empreinte/dynamique | – Fixe sur un côté – ScanSAR | Fixe au nadir | – Fixe à l'azimut – Balayage | Balayage en travers de la trace 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 | Impulsions courtes | Impulsions courtes |
| Largeur de bande | 20-300 MHz | 320 MHz | 5-80 kHz | 14 MHz | 300 kHz |
| Facteur d'utilisation (%) | 1-5 | 46 | 31 | 0,9 | 1-14 |
| Service | Terres/côtes/océans | Océans/glacé | Océans/glacé/terres | Terres/océans | Terres/océans |

5.2.2 Radars à ouverture synthétique (SAR, *synthetic aperture radars*)

Les SAR 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. 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

Spectre comprimé et couloir d'illumination SAR



Meteo-05-13

FIGURE 5-14

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



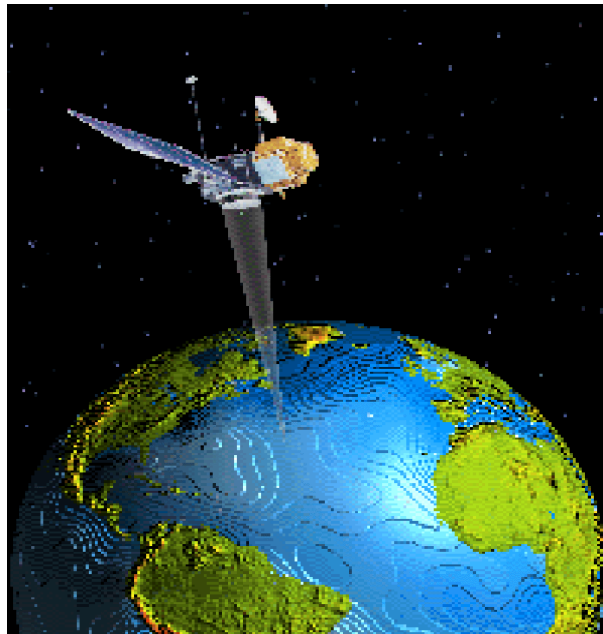
Meteo-05-14

5.2.3 Altimètres

Les altimètres donnent 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 sa précision. 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.

FIGURE 5-15

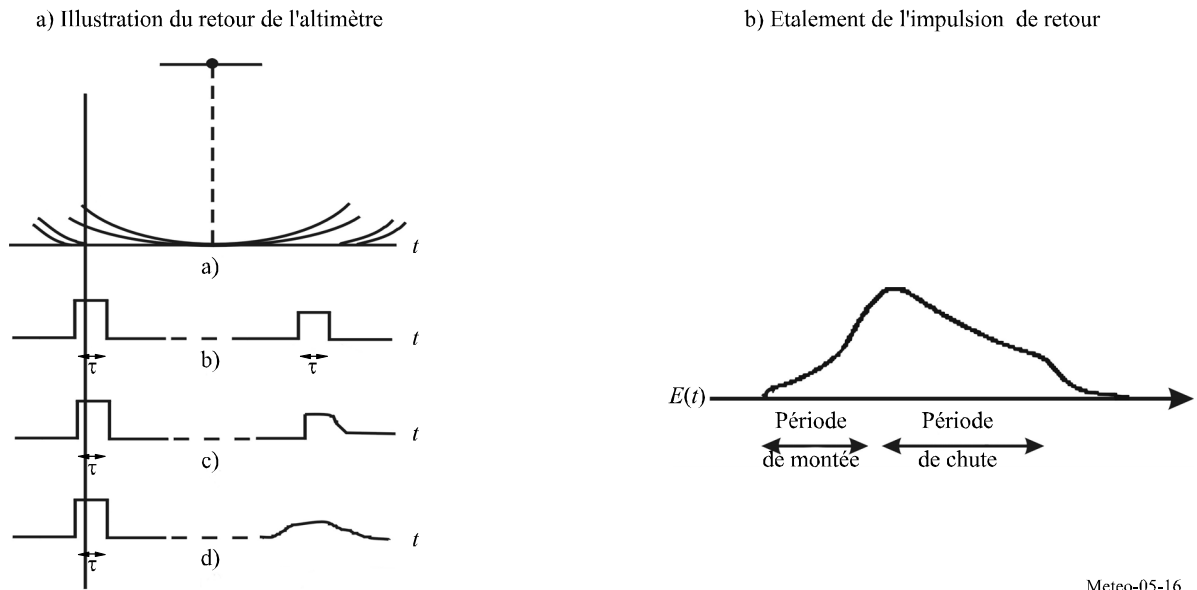
Altimètre à hyperfréquences embarqué à bord d'un satellite



Meteo-05-15

FIGURE 5-16

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

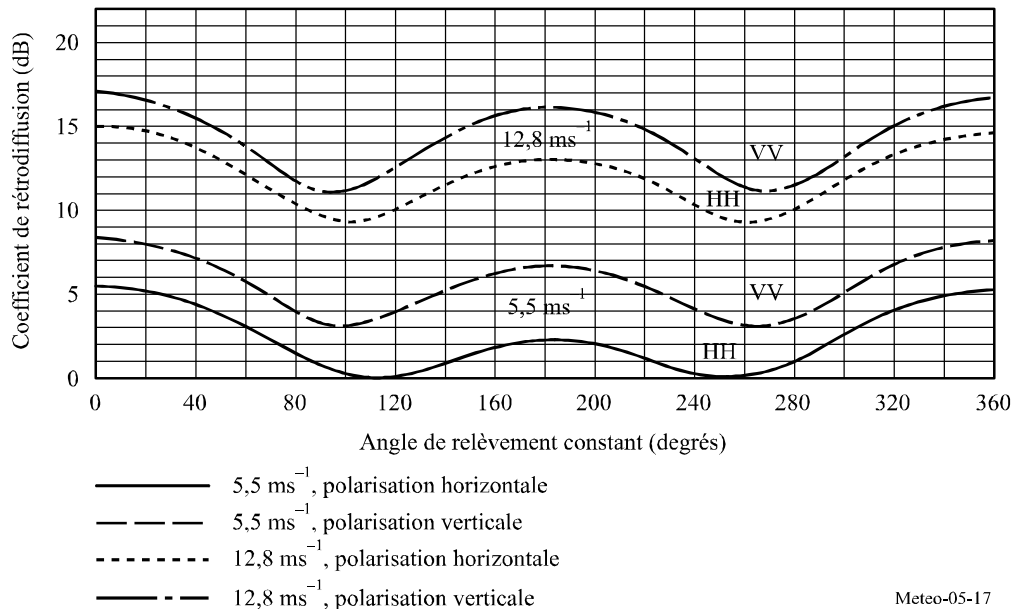


5.2.4 Diffusiomètres

Ils donnent la direction et la vitesse des vents au-dessus de la surface des océans. 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° 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

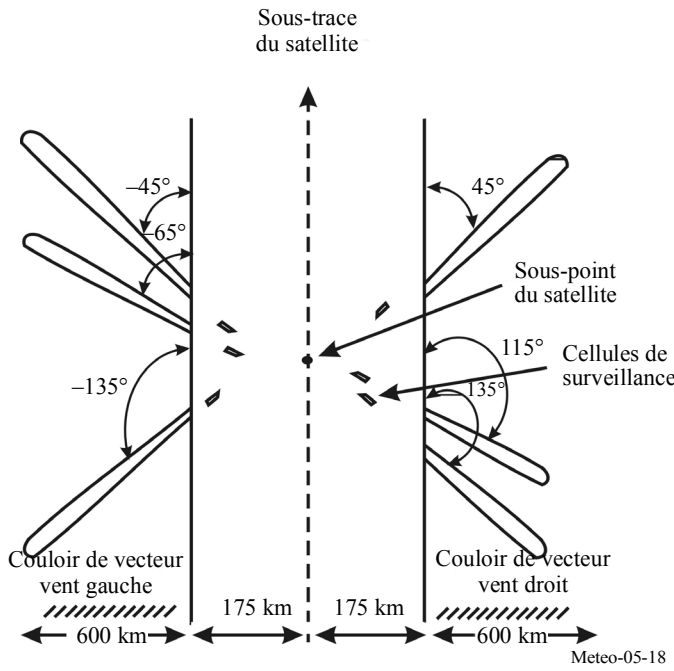
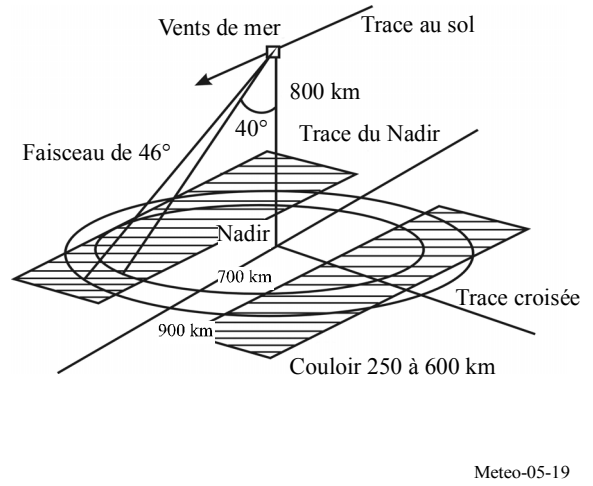
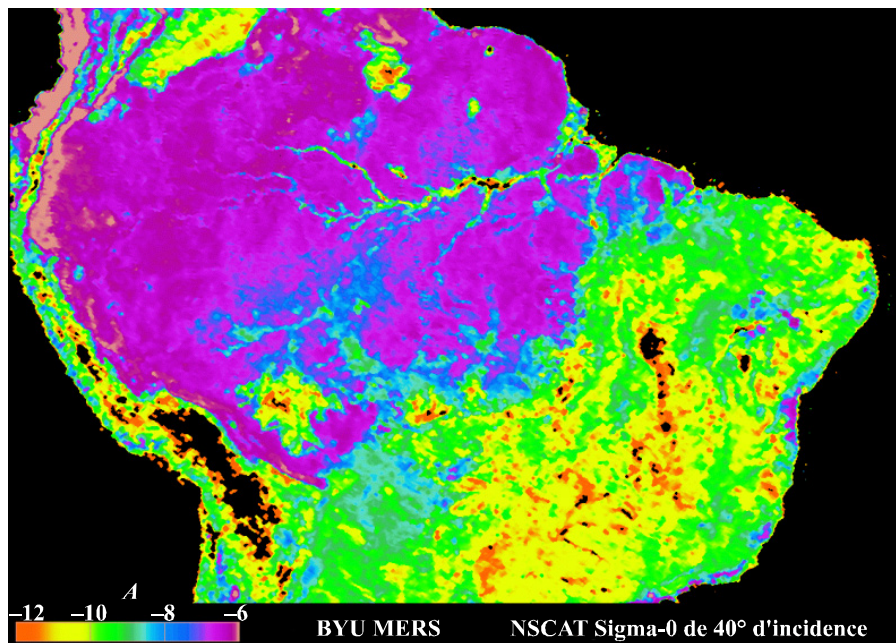


FIGURE 5-19
Balayage du faisceau-crayon du diffusiomètre



La Fig. 5-20 montre une image radar de la forêt ombrophile amazonienne en Amérique du Sud prise par le NSCAT.

FIGURE 5-20
Image radar NSCAT de la forêt ombrophile amazonienne en Amérique du Sud



5.2.5 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:

$|K_W|$: 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)

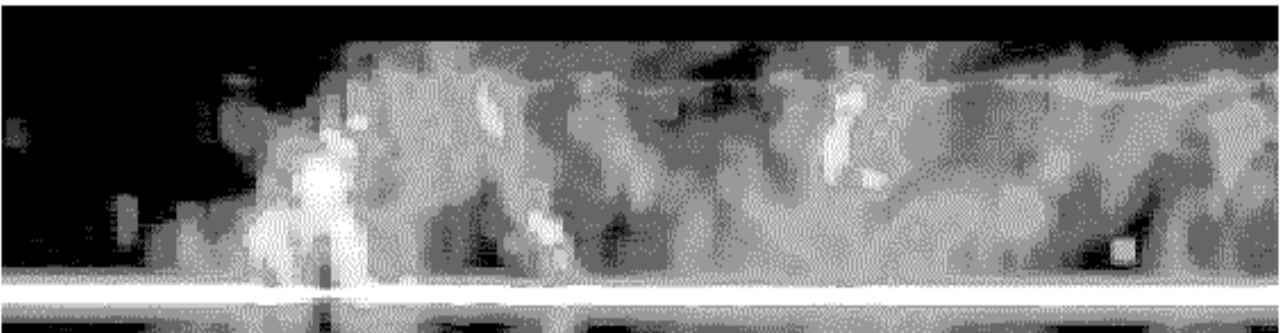
Z : facteur de réflectivité du radar.

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

Réflectivité synthétisée selon les mesures de réflectivité des précipitations



Meteo-05-21

5.2.6 Radars de profil des nuages

Les radars de profil des nuages fournissent un profil tridimensionnel de la réflectivité des nuages au-dessus de la surface de la Terre. La Fig. 5-22 montre un exemple type de réflectivité 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:

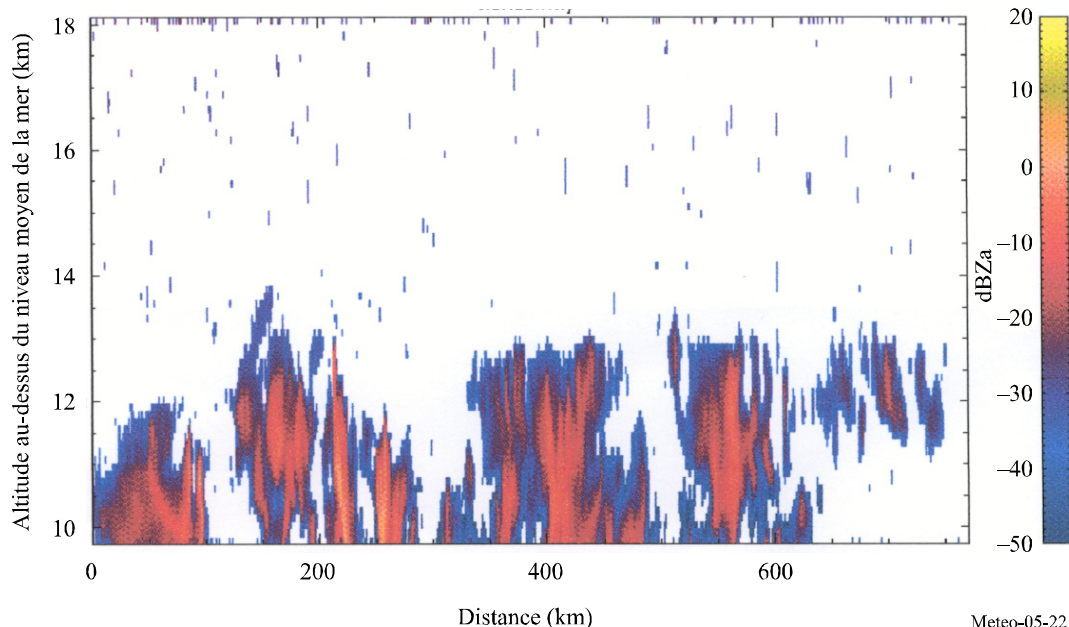
- \tilde{P} : puissance de retour des nuages (mW)
- P_r : puissance d'émission radar (W)
- G : gain d'antenne (numérique)
- t : durée de l'impulsion (μ s)
- θ_r : largeur de faisceau d'antenne 3 dB (degrés)
- K_W : facteur diélectrique de la teneur en eau des nuages
- Z_r : facteur de réflectivité des 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

Cirrus tropical observé lors du passage de Hawaï à la Nouvelle-Zélande



Meteo-05-22

5.2.7 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs

Les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage pour les différentes catégories de capteurs spatiaux actifs sont décrits dans la Recommandation ITU-R RS.1166.

5.2.8 Niveaux de puissance surfacique (PFD, *power flux density*)

Les caractéristiques des divers types de capteurs spatiaux actifs données dans le Tableau 5-5 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 |

Bibliographie

ELACHI, DR. C. *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Press, New York, États-Unis d'Amérique.

BROOKNER, E. ed. [1988] *Aspects of Modern Radar*, Artech House, Boston, États-Unis d'Amérique.

Textes de l'UIT-R

Recommandation UIT-R RS.515 – Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées pour la télédétection passive par satellite.

Recommandation ITU-R RS.577 – Bandes de fréquences et largeurs de bande utilisées par les capteurs actifs spatiaux des services d'exploration de la Terre par satellite (actifs) et de recherche spatiale (actifs).

Recommandation ITU-R RS.1028 – Critères de qualité applicables à la télédétection passive par satellite.

Recommandation ITU-R RS.1029 – Critères de brouillage applicables à la télédétection passive par satellite.

Recommandation ITU-R RS.1166 – Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage applicables aux capteurs spatiaux actifs.

CHAPITRE 6

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

| | <i>Page</i> |
|--|-------------|
| 6 Introduction..... | 90 |
| 6.1 Les systèmes de radiodiffusion..... | 90 |
| 6.2 Les systèmes hydrologiques..... | 90 |
| 6.3 La radiocommunication appliquée aux systèmes météorologiques et environnementaux distants | 91 |
| 6.4 Les applications météorologiques des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS)..... | 92 |
| 6.5 Les systèmes de détection des éclairs | 93 |
| 6.6 La télédétection au sol..... | 95 |
| 6.7 Les systèmes aériens inhabités (UAS, <i>Unmanned Aircraft Systems</i>) | 95 |

6 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 de MetSat et MetAids décrits dans les premiers chapitres.

Il est par ailleurs primordial que les météorologistes diffusent, dans les délais les plus courts, de l'information et des avis aux clients, à la fois dans les zones fortement peuplées et les lieux reculés. Les services météorologiques procurent une assistance aux activités maritimes et à la navigation aérienne dans le monde entier. Les systèmes de diffusion et de radiodiffusion des produits météorologiques ont aussi recours à un large éventail de services de radiocommunication.

6.1 Les systèmes de radiodiffusion

La diffusion des prévisions est aussi importante que la collecte et l'archivage des données météorologiques et la préparation des prévisions. Ce n'est qu'en mettant celles-ci à la disposition du public qu'il est possible de sauver des vies, car il faut être au courant de ce qui va survenir pour prendre les mesures assurant la protection des personnes et des biens.

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.

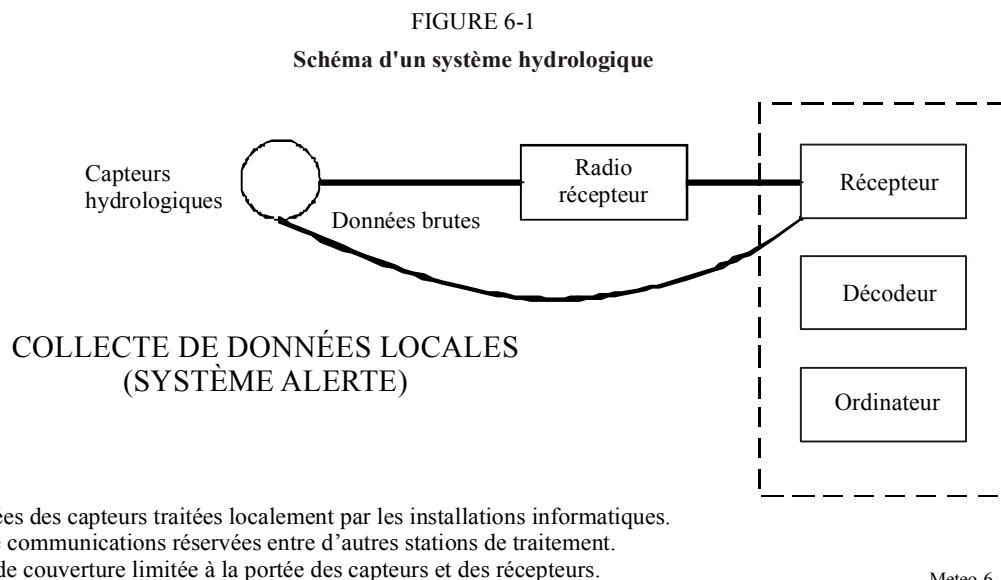
Enfin, il convient de noter que les systèmes de service fixe par satellite (SFS), via les charges utiles commerciales en bande C (3 400-4 200 MHz) et en bande Ku (10 700-11 700 MHz), sont utilisés partout dans le monde pour communiquer des informations météorologiques, hydrologiques et climatiques, notamment des avis de risque de sinistre, aux organismes météorologiques et communautés d'usagers. 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.

6.2 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. On se sert des systèmes hydrologiques pour mesurer notamment 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 de dollars, 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.



6.3 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.

6.4 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.

6.5 Les systèmes de détection des éclairs

Les besoins des météorologistes d'exploitation en matière de télédétection de la foudre augmentent rapidement. 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.

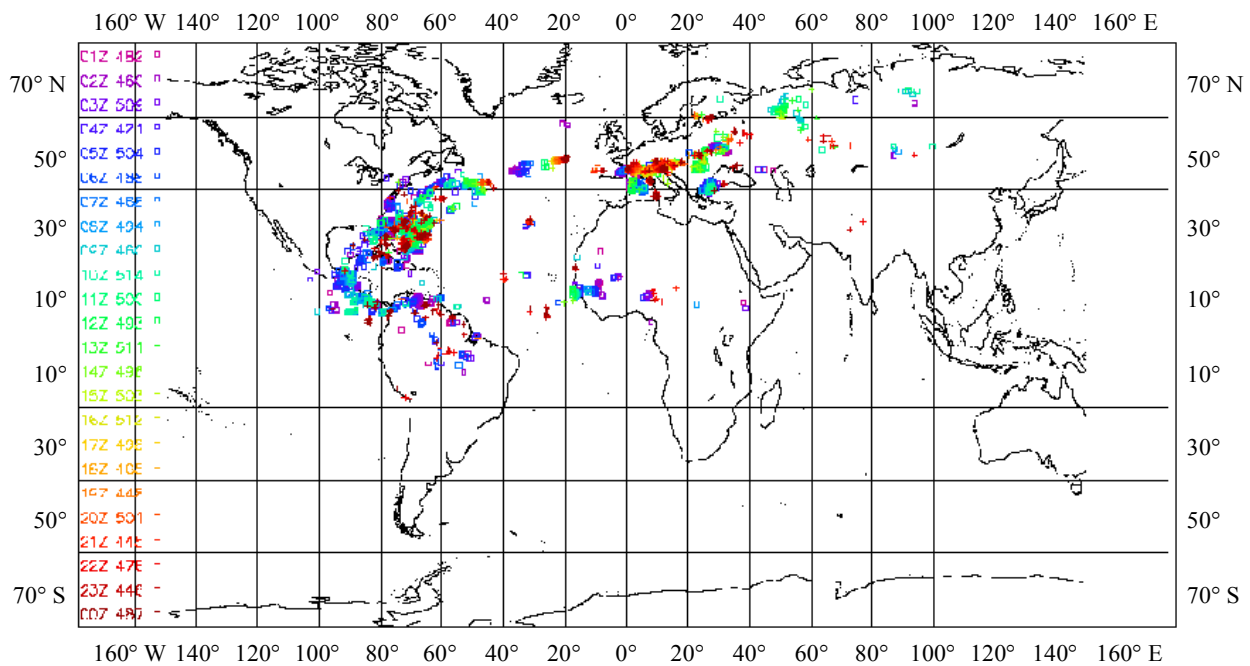
Dans les systèmes opérationnels actuels, la position de l'éclair est déterminée en mesurant la direction d'arrivée de la sphère associée (onde atmosphérique), son temps d'arrivée, ou la combinaison des deux.

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). Dans ce système, les parasites atmosphériques sont reçus à des stations éloignées situées autour de l'Europe 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.

FIGURE 6-2

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



11 581 records d'orages sur une période de 24 heures.

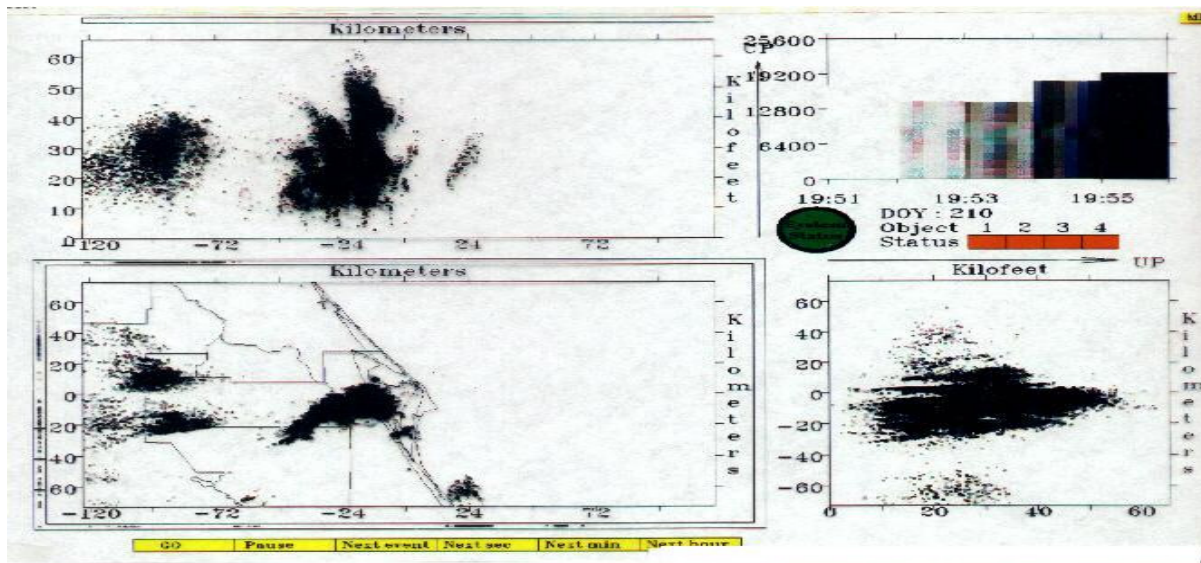
Meteo-6-2

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 km 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°. 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

6.6 La télédétection au sol

Les sondages atmosphériques verticaux par télédétection passive satellitale ont été abondamment traités 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. Il existe maintenant dans le commerce des radiomètres pouvant satisfaire ce besoin. Ceux-ci 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 doivent 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. Les mesures de la vapeur d'eau devraient bénéficier à l'avenir d'autres observations dans les limites inférieures de la bande d'absorption de la vapeur d'eau à 183 GHz.

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 ne sont pas identiques à ceux employés par les satellites. A certaines fréquences, la télédétection par satellite peut partager la bande en toute sécurité avec les services de Terre, mais les radiomètres au sol ont besoin d'être protégés. Le nombre de ces appareils en service est encore réduit, mais si les tendances actuelles se poursuivent, celui-ci devrait beaucoup augmenter dans l'avenir. 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.

6.7 Les systèmes aériens inhabités (UAS, *Unmanned Aircraft Systems*)

Les 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. 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 nous permet de mieux comprendre notre 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

- 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.
- 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, États-Unis d'Amérique, p. 68.

Bibliographie

- 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., NASA Conf. Pub. 3106, Vol. II, p. 89-1-89-10.
- 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.

ANNEXE 1

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS COURANTS
EN MÉTÉOROLOGIE

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

| C (suite) | | C (suite) | |
|------------------|---|------------------|--|
| CCSDS | Consultative Committee for Space Data Systems | COI | Commission océanographique intergouvernementale |
| CDAS | Station de télécommande et d'acquisition des données | CONUS | Zone continentale des Etats-Unis d'Amérique |
| CEM | Compatibilité électromagnétique | COP | Conférence des Parties |
| CEPMMT | Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme | COPUOS | Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique |
| CERES | Système d'étude du bilan radiatif de la Terre et des nuages | CORSSAC | Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee |
| CGMS | Groupe de coordination pour les satellites météorologiques | COSPAS | Système russe de recherche et sauve-tage par satellite. Voir SARSAT |
| CHy | Commission d'hydrologie (OMM) | CPCSA | Coordination du Programme climatologique et activités d'appui |
| CIEM | Conseil international pour l'exploration de la mer | CPR | Radiomètre pour la physique des nuages |
| CIESIN | Consortium for International Earth Science Information Networks | CRC | Code de redondance cyclique |
| CIMO | Commission des instruments et des méthodes d'observation | CrMIS | Sondeur-imageur hyperfréquence à balayage croisé (NPOESS) |
| CIMSS | Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies | CrIS | Sondeur infrarouge à balayage croisé (NPOESS) |
| CIUS | Conseil international des unions scientifiques | CRT | Tube cathodique |
| CLICOM | Application de l'informatique à la climatologie | CS&C | Commutation et commande des communications (partie TAD du système GMACS) |
| CLINO | Normales climatologiques | CSA | Commission des sciences de l'atmosphère |
| CLIPS | Services d'information et de prévision climatologiques | CSB | Commission des systèmes de base |
| CLIVAR | Etude de la variabilité et de la prévisibilité du climat | CSIS | Système centralisé d'information sur les tempêtes |
| CMA | Administration météorologique de la Chine | CSIRO | Organisation de la recherche scienti-fique et industrielle du Commonwealth |
| CMAé | Commission de météorologie aéronautique | CSM | Comité scientifique mixte |
| CMAg | Commission de météorologie agricole | CSMA/CD | Accès multiple par détection de porteuse et détection de collision |
| CMD | Centre mondial de données | CSOT | Comité sur les satellites d'observation de la Terre |
| CMIS | Sondeur-imageur hyperfréquences à balayage conique (NPOESS) | CST | Comité scientifique et technique |
| CMM | Centre météorologique mondial | CSTM | Comité scientifique et technique mixte |
| CMM | Commission de météorologie maritime | CSTR | Council for Scientific and Technical Research |
| CMN | Centre météorologique national | CTCS | Système TAD de télémétrie et de télécommande (partie TAD du système GIMTACS) |
| CMR | Conférence mondiale des radiocommunications | CW | Onde entretenue |
| CNES | Centre national d'études spatiales | CZCS | Balayeur couleur de zone côtière |
| CNIE | Comision Nacional de Investigaciones Espaciales | | |
| COADS | Ensemble de données détaillées océan-atmosphère | | |

D

| | |
|--------|--|
| DAAC | Centre réparti d'archives actives |
| DADS | Système de distribution et d'archivage des données |
| DAPS | Système de traitement automatique de DCS |
| dB | Décibel |
| DB | Diffusion directe |
| DCB | Décimal codé binaire |
| DCPLS | Système de collecte de données et de localisation de plates-formes |
| DCPI | Interrogation de plate-forme de collecte de données |
| DCPR | Réception de plate-forme de collecte de données |
| DCR | Radiomètre différentiel de corrélation |
| DCS | Système de collecte de données |
| DEMUX | Démultiplexeur |
| DIFACS | Fac-similé numérique |
| DIR | Infrarouge diurne |
| DLI | Interface de liaison descendante (DM/PM) |
| DLM | Contrôleur de liaison descendante |
| DLR | Agence spatiale allemande (Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt) |
| DMSP | Programme de satellites météorologiques de défense |
| DOMSAT | Satellite de communications intérieures |
| DPT | Terminal à images numériques |
| DR | Réception directe |
| DRGS | Station terrienne de réception directe |
| DSARS | Système d'archivage et de restitution des satellites DAMUS |
| DSB | Radiobalise de sondage direct |
| DSB | Diffusion directe des données de sondage |
| DSN | Réseau de communications avec l'espace lointain |
| DUS | Système d'utilisation des données |

E

| | |
|-----|-------------------------------------|
| E&M | Exploitation et maintenance |
| EBR | Enregistreur à faisceau d'électrons |

E (suite)

| | |
|----------|---|
| EC/AGE | Groupe consultatif de l'échange de données et produits météorologiques et connexes relevant du Conseil exécutif |
| EDC | Centre de données EROS |
| EDIMS | Système de gestion des données et de l'information sur l'environnement |
| EIRPSD | Densité spectrale de puissance isotrope rayonnée équivalente |
| ELT | Emetteur de localisation d'urgence |
| ELV | Lanceur non récupérable |
| EMI | Brouillage électromagnétique |
| ENSO | <i>El Niño</i> /Oscillation australe |
| ENVISAT | Satellite d'observation de l'environnement |
| EOS | Satellite d'observation de la Terre |
| EPOCS | Etudes climatologiques dans l'océan Pacifique équatorial |
| EPS | Capteur de particules énergétiques |
| ERB | Bilan radiatif de la Terre |
| ERBE | Expérience sur le bilan radiatif de la Terre |
| ERL | Laboratoire de recherche énergétique |
| EROS | Satellite d'exploration des ressources terrestres |
| ERS | Satellite européen de télédétection |
| E/S | Entrée/sortie |
| ESD | Décharge électrostatique |
| ESMR | Radiomètre en hyperfréquences à balayage électrique |
| ETA | Heure d'arrivée prévue |
| ETM | Instrument amélioré de cartographie thématique |
| ETM | Modèle d'essais techniques |
| ETS | Satellite d'essais techniques |
| EUMETSAT | Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques |
| EUV | Ultraviolet extrême |
| F | |
| FAX | Fac-similé |
| FC | Fausse couleur |
| FCC | Composition fausse couleur |
| FCC | Federal Communications Commission |

F (suite)

| | |
|------|---|
| FFT | Transformation de Fourier rapide |
| FI | Fréquence intermédiaire |
| FIFO | Premier entré-premier sorti |
| FM | Modulation de fréquence |
| FOV | Champ |
| fps | Images par seconde |
| FRI | Fréquence de répétition des impulsions |
| FSK | Modulation par déplacement de fréquence |
| FSS | Logiciel d'établissement des plans de vol |
| FTM | Fonction de transfert de modulation |

G

| | |
|---------|--|
| GAME | Expérience GEWEX sur la mousson d'Asie |
| GARP | Programme de recherches sur l'atmosphère globale |
| GARS | Système d'archivage et de restitution des satellites GOES |
| GCIP | Projet international d'échelle continentale (GEWEX) |
| GDTA | Groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale |
| GEO | Orbite géostationnaire terrestre |
| GEWEX | Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau |
| GHz | Gigahertz |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| GIMGSP | Projet de système au sol GOES I-M |
| GIMTACS | Système de télémessure et de télécommande GOES I/M |
| GMACS | Système de surveillance et de contrôle GOES (remplacé par GIMTACS) |
| GMS | Satellite météorologique géostationnaire |
| GOES | Satellite géostationnaire d'exploitation pour l'étude de l'environnement |
| GOMS | Satellite météorologique d'exploitation géostationnaire |
| GOOS | Système mondial d'observation de l'océan |
| GOSSP | Groupe d'experts de la composante spatiale des systèmes mondiaux d'observation |

G (suite)

| | |
|------------|--|
| GPCP | Projet mondial de climatologie des précipitations |
| GPS | Système mondial de radiorepérage, Système de positionnement global |
| GPSOS | Capteur d'occultation GPS |
| GRC | Glenn Research Center, ancien Lewis Research Center (LeRC) |
| GRT | GOES temps réel (base de données) |
| GSFC | Centre des vols spatiaux Goddard |
| GSN | Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC |
| GSTDN | Ground Spaceflight Tracking and Data Network |
| <i>G/T</i> | Rapport gain d'antenne/température de bruit du système (dB/K) |
| GTOS | Système mondial d'observation de l'environnement terrestre |
| GUAN | Réseau de stations d'observation en altitude du SMOC |
| GVAR | Données GOES |
| H | |
| HEPAD | Détecteur de particules alpha et de protons à haute énergie |
| HiRID | Données d'imageur à haute résolution |
| HIRS | Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution (TIROS) |
| HR | Humidité relative |
| HRIS | Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution ou interféromètre de sondage à haute résolution |
| HRPT | Transmission des images à haute résolution |
| Hz | Hertz (remplace cycles par seconde) |
| I | |
| IASI | Interféromètre de sondage atmosphérique dans l'infrarouge |
| ICSAR | International Committee for Search and Rescue |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IFOV | Champ de vision instantanée |
| IFRB | Comité international d'enregistrement des fréquences (voir BR) |
| IGBP | Programme international géosphère-biosphère |
| IGF | Générateur d'images |

I (suite)

| | |
|--------|--|
| 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 |
| ISETAP | Intergovernmental Science Engineer-ing & Technology Advisory Panel |
| ISO | Organisation internationale de normalisation |
| ITOS | Satellite d'exploitation TIROS amélioré |
| ITPR | Radiomètre à infrarouge pour la mesure du profil de température |

J

| | |
|-------|---|
| JDIMP | Groupe d'experts de la gestion des données et de l'information SMOC/GOOS/GTOS |
| JERS | Satellite japonais d'exploration des ressources terrestres |
| JMA | Service météorologique japonais |
| JPL | Laboratoire de recherche sur la propulsion |

K

| | |
|--------|------------------------|
| K | Kelvin |
| kb | Kilobit |
| ko | Kiloctet |
| 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 |

L (suite)

| | |
|--------|--|
| 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 |
| MetSat | Satellite météorologique |

| M (suite) | | N (suite) | |
|------------------|---|------------------|---|
| 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 | | |
| MODIS | Spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (NASA) | NRCT | Conseil national de recherches thaïlandais |
| MOPITT | Mesure de la pollution dans la troposphère (NASA) | NROSS | Navy Remote Ocean Sensing System |
| MOS | Satellite d'observation de la mer (Japon) | NRSA | National Remote Sensing Agency |
| mrad | Milliradian | NRZ | Sans retour au zéro |
| MRF | Multiplexage par répartition en fréquence | NRZ-L | Sans retour au niveau zéro |
| MSFC | Centre des vols spatiaux Marshall | NSI | Navigation et superposition d'images |
| MSI | Imagerie multispectrale | NSSFC | National Severe Storms Forecast Center |
| MSS | Radiomètre multispectral | NSSL | National Severe Storms Laboratory |
| MSU | Sondeur à hyperfréquences | nT | Nanotesla |
| MTBF | Temps moyen entre deux pannes | | |
| MUX | Multiplexeur | O | |
| MW | Volant d'inertie, onde moyenne ou mégawatt | OAD | Détermination d'attitude et d'orbite |
| | | OAR | Bureau de la recherche océanique et atmosphérique |
| N | | OCTS | Scanner de la couleur et de la température de l'océan |
| N-S | Nord-sud | OMI | Ozonomètre |
| NASA | Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace | OMM | Organisation météorologique mondiale |
| NASCOM | Réseau de télécommunications de la NASA | OMPS | Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS) |
| NASDA | Agence nationale de développement spatial | OOPC | Groupe sur les observations océaniques pour l'étude du climat |
| NCDC | Centre national de données climatologiques | OQPSK | Modulation par déplacement de phase à quatre états non équilibrée |
| ND | Nœud descendant | P | |
| NE-delta-N | Différence de luminance énergétique équivalente au bruit | p.-p. | Crête à crête |
| NE-delta-T | Différence de température équivalente au bruit | PA | Amplificateur de puissance |
| NERC | Conseil national de la recherche sur l'environnement | PCD | Plate-forme de collecte de données |
| NESDIS | Service national d'information, de données et de satellites pour l'étude de l'environnement | PCM | Programme climatologique mondial |
| | | PCV | Programme de coopération volontaire |

| P (suite) | | Q | |
|------------------|--|----------|---|
| PDL | Charge de données au processeur | QC | Contrôle de la qualité |
| PDR | Retransmission des données traitées (liaison radioélectrique GVAR) | QPSK | Modulation par déplacement de phase à quatre états |
| PE | Equation primitive | R | |
| PEP | Puissance de crête | R | Rayleigh |
| PEP | Protection contre les erreurs polynomiales (NASA) | RA | Altimètre radar |
| PFD | Puissance surfacique | R/Y | Roulis-lacet |
| PHI | Programme hydrologique international | R&D | Recherche et développement |
| PHO | Programme d'hydrologie opérationnelle | RSBR | Réseau synoptique de base régional |
| p.i.r.e. | Puissance isotrope rayonnée équivalente | RCS | Système de commande par réaction |
| Pixel | Elément d'image | RF | Fréquence radioélectrique |
| PKM | Moteur de périégée | RFI | Brouillage radioélectrique |
| PLL | Boucle à verrouillage de phase | RHCP | Polarisation circulaire droite |
| PM | Modulation de phase | RLS | Radiobalise de localisation des sinistres |
| PMASC | Programme mondial des applications et des services climatologiques | RMS | Moyenne quadratique |
| PMDC | Programme mondial des données climatologiques | ROS | Rapport d'onde stationnaire |
| PMDSC | Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat | RP | Radar de précipitations |
| PMRC | Programme mondial de recherche sur le climat | RRTDM | Réseau régional de transmission de données météorologiques |
| PMRPT | Programme mondial de recherche sur la prévision du temps | RS | Réseau spatial |
| PN | Pseudo-bruit | RSS | Résultante quadratique |
| PNT | Prévision numérique du temps | RSU | Groupe de la télédétection |
| PNUE | Programme des Nations Unies pour l'environnement | RVB | Rouge/vert/bleu |
| POES | Satellite à défilement pour l'étude de l'environnement | RVL | Radar aéroporté à visée latérale |
| ppm | Parties par million | RW | Volant de réaction |
| PROFS | Program for Regional Observing and Forecasting Service | RWA | Bloc volant de réaction |
| PROMET | Groupe de travail de la fourniture des informations météorologiques requises par l'aviation civile | S | |
| PSK | Modulation par déplacement de phase | s | Seconde |
| PTT | Poursuite, télémessure et télécommande | S/C | Véhicule spatial |
| PWM | Modulation d'impulsions en durée | S/DA | Sondeur/données auxiliaires |
| | | S/N0 | Rapport signal-densité de bruit |
| | | S/N | Rapport signal-bruit |
| | | S-VAS | Sondeur atmosphérique/radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue |
| | | S-VISSR | Radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue |
| | | SAD | Système d'accès direct |
| | | SAD | Système d'acquisition des données |
| | | SABD | Système d'administration de base de données |

| S (suite) | | S (suite) | |
|------------------|--|------------------|--|
| SAGE | Expérience sur les aérosols et les composants gazeux mineurs de l'atmosphère | SIRS | Spectromètre satellitaire infrarouge |
| SAR | Radar à ouverture synthétique ou recherche et sauvetage | SIT | Equipe de mise en œuvre stratégique du CSOT |
| SARSAT | Satellite de recherche et de sauvetage-poursuite assistée; voir COSPAS | SIUPM | Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer |
| SATCOM | Télécommunications par satellite | SMDSM | Système mondial de détresse et de sécurité en mer |
| SBUV | Rayonnement ultraviolet solaire rétrodiffusé | SMISO | Système mondial intégré de services océaniques |
| SC/OMS | Sous-comité chargé des satellites météorologiques d'exploitation | SMN | Service météorologique ou hydrométéorologique national |
| SC/OES | Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement | SMN | Service météorologique national |
| SC/N0 | Rapport sous-porteuse-densité de bruit | SMO | Système mondial d'observation |
| SCHOTI | Conférence permanente des directeurs des établissements de formation professionnelle relevant des Services météorologiques nationaux | SMOC | Système mondial d'observation du climat |
| SCIAMACHY | Spectromètre d'absorption d'imagerie à balayage pour cartographie atmosphérique | SMS | Service mobile par satellite |
| SCO | Oscillateur de sous-porteuse | SMT | Système mondial de télécommunications |
| SCSMEX | Expérience sur la mousson de la mer de Chine méridionale | SNR | Rapport signal-bruit |
| SDUS | Station secondaire d'utilisation des données | SOCC | Spacecraft Operations Control Center |
| SeaWiFS | Capteur à large champ d'observation de la mer | SOES | Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement |
| SEM | Appareil d'étude du milieu spatial | SOLAS | Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer |
| SET | Satellite d'exploration de la Terre | SPM | Capteur de protons solaires |
| SETS | Service d'exploration de la Terre par satellite | SPOT | Satellite probatoire d'observation de la Terre |
| SEU | Perturbation isolée | SQPSK | Modulation par déplacement de phase à quatre états alternée |
| SFS | Service fixe par satellite | SPREP | Programme régional pour l'environnement du Pacifique Sud |
| SGBD | Système de gestion de base de données | sr | Stéradian |
| SGLS | Système de liaison espace-sol | SR | Radiomètre à balayage |
| SHN | Service hydrologique national | SR-IR | Radiomètre à balayage-canal dans l'infrarouge |
| SHOFM | Système hydrologique opérationnel à fins multiples | SR-VIS | Radiomètre à balayage-canal dans le visible |
| SI | Sondeur-imageur | SRS | Station de réception au sol |
| SIG | Système d'information géographique | SSM/I | Sondeur-imageur en hyperfréquence spécialisé |
| SIR | Radar imageur de la navette | SSC | Surveillance du système climatique |
| | | SST | Température de surface de la mer |
| | | SSU | Sondeur stratosphérique |
| | | STA | Science and Technology Agency |
| | | SST | Système spatial de transport |

S (suite)

| | |
|------|--|
| SWH | Hauteur significative des vagues |
| SWIR | Infrarouge à courte longueur d'onde |
| SXI | Imageur de rayons X solaires |
| SXT | Télescope de rayons X solaires (mission Solar-A) |

T

| | |
|-------|---|
| T/P | Topex/Poseidon |
| T/V | Vide thermique |
| T&C | Téléométrie et télécommande |
| TAD | Télécommande et acquisition des données |
| TAD | Traitement automatique des données |
| TADW | Station de télécommande et d'acquisition des données (îles Wallops) |
| TBUS | Code de 4 lettres pour message de données d'éphémérides |
| TDRS | Satellite de poursuite et d'acquisition de données |
| TDRSS | Système à satellites de poursuite et d'acquisition de données |
| TEB | Taux d'erreur sur les bits |
| TED | Détecteur d'énergie totale |
| TEMS | Système de surveillance des écosystèmes terrestres |
| TEMSI | Temps significatif |
| TES | Spectromètre d'étude des émissions de la troposphère |
| TIR | Infrarouge thermique |
| TIP | Processeur d'information de TIROS |
| TIROS | Satellite d'observation télévisuelle à infrarouge |
| TM | Instrument de cartographie thématique |
| TMG | Temps moyen de Greenwich |
| TMI | Imageur en hyperfréquence TRMM |
| TMR | Radiomètre hyperfréquence Topex |
| TO | Orbite de transfert |
| TOGA | Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe |
| TOPC | Groupe d'experts des observations terrestres pour l'étude du climat |

T (suite)

| | |
|----------|---|
| TOMS | Spectromètre imageur d'ozone total |
| TOS | Système opérationnel de TIROS |
| TOVS | Sondeur vertical opérationnel de TIROS |
| tr/min | Tours par minute |
| TRMM | Mission pour la mesure des pluies tropicales |
| TRUCE | Expérience sur le climat urbain dans les régions tropicales |
| TV | Vide thermique ou télévision |
| TVM | Mode VAS transparent |
| U | |
| UCT | Unité centrale de traitement |
| UHF | Ondes décimétriques |
| UIT | Union internationale des télécommunications |
| UIT-R | Secteur des radiocommunications de l'UIT (remplace le CCIR) |
| μrad | Microradian |
| μs | Microseconde |
| UTC | Temps universel coordonné |
| UV | Ultraviolet |
| V | |
| VAG | Veille de l'atmosphère globale |
| VAS | Sondeur atmosphérique du VISSR |
| VDB | Base de données du VISSR |
| VDUC | Centre d'utilisation des données VAS |
| VHF | Ondes métriques |
| VIIRS | Radiomètre-imageur dans le visible et l'infrarouge (NPOESS) |
| VIP | Processeur d'images VAS |
| VIRGS | Système de carroyage et de superposition d'images du VISSR |
| VISSR | Radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge |
| VMM | Veille météorologique mondiale |
| VOS | Navire d'observation bénévole |
| VREC | Enregistreur de données de radiomètre à très haute résolution |
| VTPR | Radiomètre du profil vertical de température |

| W | | 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 |



* 3 3 7 3 2 *

Printed in Switzerland
Geneva, 2010
ISBN 92-61-12842-4

Photo credits: © ITU, © WMO