

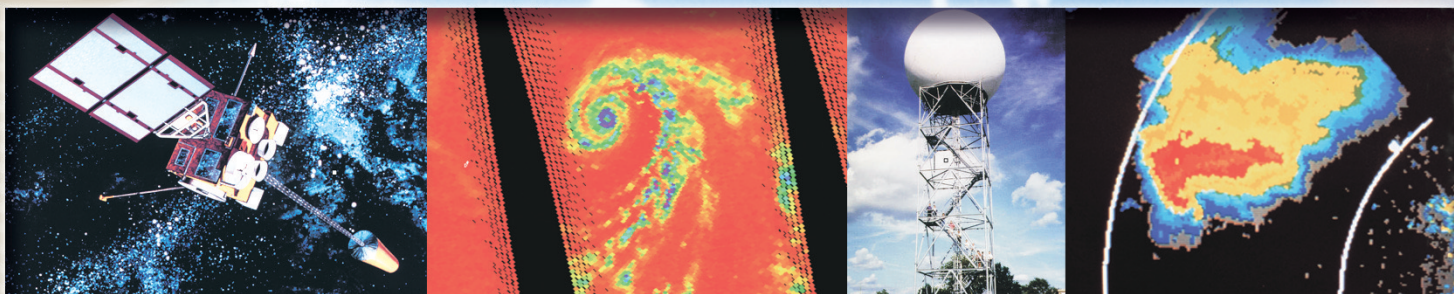


Organisation  
météorologique  
mondiale



Union  
internationale des  
télécommunications

# MANUEL



## Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie

Edition 2002





Organisation  
météorologique  
mondiale



Union  
internationale des  
télécommunications

# MANUEL

## Utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie

Edition 2002

© OMM - UIT 2002

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.

## **PRÉFACE**

Le Manuel sur l'utilisation du spectre radioélectrique pour la météorologie a été rédigé par des experts du Groupe de travail 7C de la Commission d'études 7 des radiocommunications (Services scientifiques), sous la présidence de M. E. Marelli (ESA), Président du Groupe de travail 7C.

En six chapitres, ce Manuel donne des informations techniques complètes 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 utilisateurs, praticiens, techniciens, concepteurs et autres ou membres intéressés de la communauté de la météorologie et des radiocommunications, y compris les institutions publiques et l'industrie.

Robert W. Jones  
Directeur, Bureau des radiocommunications



## TABLE DES MATIÈRES

|   | Page |
|---|------|
| AVANT-PROPOS.....   | vii  |
| ETUDES DE PARTAGE DU SPECTRE.....   | ix   |
| CHAPITRE 1 – LA STRUCTURE DES SYSTÈMES MÉTÉOROLOGIQUES .....  | 1    |
| CHAPITRE 2 – LE SERVICE DE MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE .....   | 7    |
| CHAPITRE 3 – LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE .....  | 15   |
| CHAPITRE 4 – LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES.....  | 33   |
| CHAPITRE 5 – LE SERVICE D’EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE<br>POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES ..... | 49   |
| CHAPITRE 6 – LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION<br>UTILISÉS EN MÉTÉOROLOGIE.....                     | 87   |
| 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. Une bonne partie des travaux de la CE 7 vise à améliorer l'utilisation du spectre radioélectrique en vue d'atteindre des objectifs de nature scientifique.

La CE 7 comprend plusieurs Groupes de Travail des radiocommunications (GT) qui analysent les questions techniques liées aux diverses disciplines relevant des services scientifiques. La météorologie entre 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. La météorologie dépend 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. Les médias s'intéressent notamment en permanence:

- aux satellites météorologiques qui suivent le déplacement des ouragans et des typhons;
- aux radars météorologiques qui surveillent la progression des tornades, des orages, des éruptions volcaniques et des grands incendies de forêt;
- aux systèmes des auxiliaires de la météorologie qui collectent et traitent des données sans lesquelles l'exactitude actuelle et future des prévisions serait gravement compromise; et
- aux services de radiodiffusion et de télévision qui alertent les populations en cas de phénomènes météorologiques violents et qui signalent aux pilotes la présence d'orages ou de turbulences.

La formulation de Recommandations reste la principale activité de la Commission d'études. Toutefois, les experts chargés de ces questions ont amassé une foule d'informations qui seraient utiles à leurs confrères du monde scientifique et autres qui ont impérativement besoin de bonnes méthodes de collecte des données et d'observations météorologiques fiables pour affiner la prévision du temps et du climat.

Il a donc été décidé de rédiger et de publier ce Manuel, en collaboration avec le Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de façon que l'ensemble des utilisateurs des normes correspondantes puisse 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, 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 de précision des prévisions météorologiques et connexes. Par exemple, si les bandes de fréquences actuellement attribuées au service de météorologie étaient attribuées à d'autres services radioélectriques incompatibles avec les systèmes météorologiques, elles pourraient devenir inutilisables pour les prévisions météorologiques.

En ma qualité de Président de la CE 7, j'ai le grand plaisir et l'honneur 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 CE 7. Les Rapporteurs pour les différentes Parties du Manuel ont accompli un travail remarquable. Nous tenons à remercier plus particulièrement M. David Franc (Etats-Unis d'Amérique), M. Jean-Michel Rainer (OMM) et M. Edoardo Marelli (ASE), Président du GT 7C, qui a dirigé le projet. Toute notre reconnaissance va également à M. A. Nalbandian (Bureau des radiocommunications) qui a largement contribué à la parution de cet ouvrage.

R. M. Taylor  
Président de la Commission d'études 7  
des radiocommunications

## ÉTUDES DE PARTAGE DU SPECTRE

Les inévitables conflits ont amené l'Union internationale des télécommunications (UIT) et son Secteur des radiocommunications (UIT-R) à réaliser une foule d'études sur la manière de permettre l'utilisation du spectre à des secteurs dont beaucoup ne relèvent pas de la météorologie. On a soigneusement analysé les besoins ainsi que les questions de compatibilité technique (possibilité, et selon quelles conditions, de partage entre les nouvelles technologies et les systèmes en place). Il est apparu que le partage d'un même canal est irréalisable dans certains cas 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, tous les systèmes en place n'étant pas exploités par des nations riches ou des entreprises privées?
- Une aide financière pourrait-elle être procurée, éventuellement, par les nouvelles technologies qui réalisent des bénéfices?
- 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 GT 7C «Systèmes d'exploration de la Terre par satellite et systèmes météorologiques» de la Commission d'études 7 des radiocommunications et par le Groupe directeur pour la coordination des fréquences radioélectriques de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Il s'agit d'un guide destiné aux usagers, à titre professionnel, des données provenant des systèmes météorologiques basés sur la radiocommunication, aux particuliers et aux gouvernements desservis par ces systèmes et au secteur des télécommunications sans fil. L'ouvrage présente les différents systèmes météorologiques et leurs caractéristiques techniques. 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. Le service de météorologie par satellite
3. Le service des auxiliaires de la météorologie
4. Les radars météorologiques, dont:
  - 4.1 Les radars météorologiques tournants
  - 4.2 Les radars profileurs de vent
5. Le service d'exploration de la Terre par satellite pour les activités météorologiques, dont:
  - 5.1 La radiométrie passive à hyperfréquences
  - 5.2 Les capteurs actifs

6. Les autres systèmes de radiocommunication utilisés en météorologie, dont:
  - 6.1 Les systèmes de diffusion et de radiodiffusion
  - 6.2 Les systèmes hydrologiques de radiocommunication
  - 6.3 Les systèmes distants fixes
  - 6.4 Les systèmes de radionavigation
  - 6.5 Les systèmes de détection et de localisation des éclairs
  - 6.6 Les systèmes de télédétection passive au sol.

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.

Cet ouvrage porte sur les systèmes qui recueillent et qui transmettent des données météorologiques et sur l'utilisation qu'ils font du spectre radioélectrique.

## CHAPITRE 1

### LA STRUCTURE DES SYSTÈMES MÉTÉOROLOGIQUES

|  | Page |
|--|------|
| 1.1 La Veille météorologique mondiale .....                                      | 2    |
| 1.1.1 Le Système mondial d'observation .....                                     | 2    |
| 1.1.1.1 Observations en surface .....  | 3    |
| 1.1.1.2 Observations en altitude .....   | 3    |
| 1.1.1.3 Observations radar .....   | 4    |
| 1.1.1.4 Observations en mer .....  | 4    |
| 1.1.1.5 Observations en vol .....  | 4    |
| 1.1.1.6 Observations satellitaires .....   | 4    |
| 1.1.1.7 Futur programme du SMO .....   | 4    |
| 1.2 Les autres systèmes liés aux 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    |

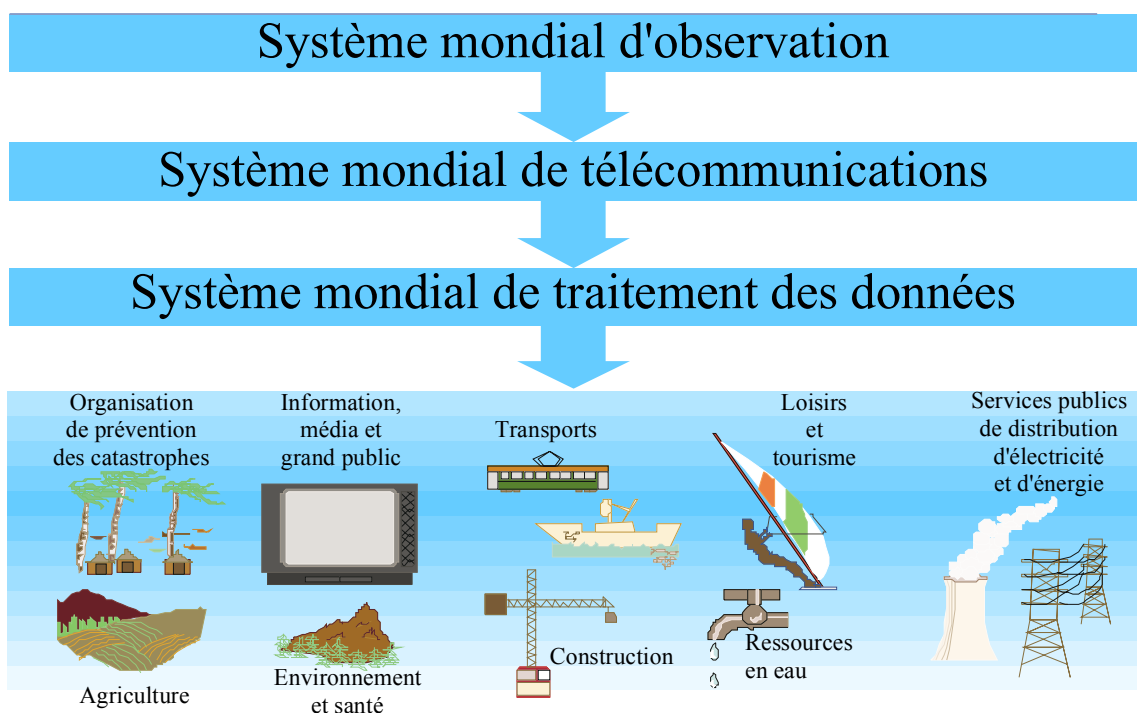
## 1.1 La Veille météorologique mondiale

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) s'est dotée d'un grand programme, la Veille météorologique mondiale (VMM), mis en œuvre et exécuté par ses 185 Membres. La 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 traitement des données (SMTD)** fournit les produits (analyses, avis et prévisions) issus du réseau constitué par les centres météorologiques mondiaux et les centres météorologiques régionaux spécialisés.
- 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.

FIGURE 1-1

### Systèmes de la Veille météorologique mondiale



Meteo-011

### 1.1.1 Le Système mondial d'observation

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). Première source d'information technique sur l'atmosphère du globe, le 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. Ses avantages les plus évidents sont la protection des

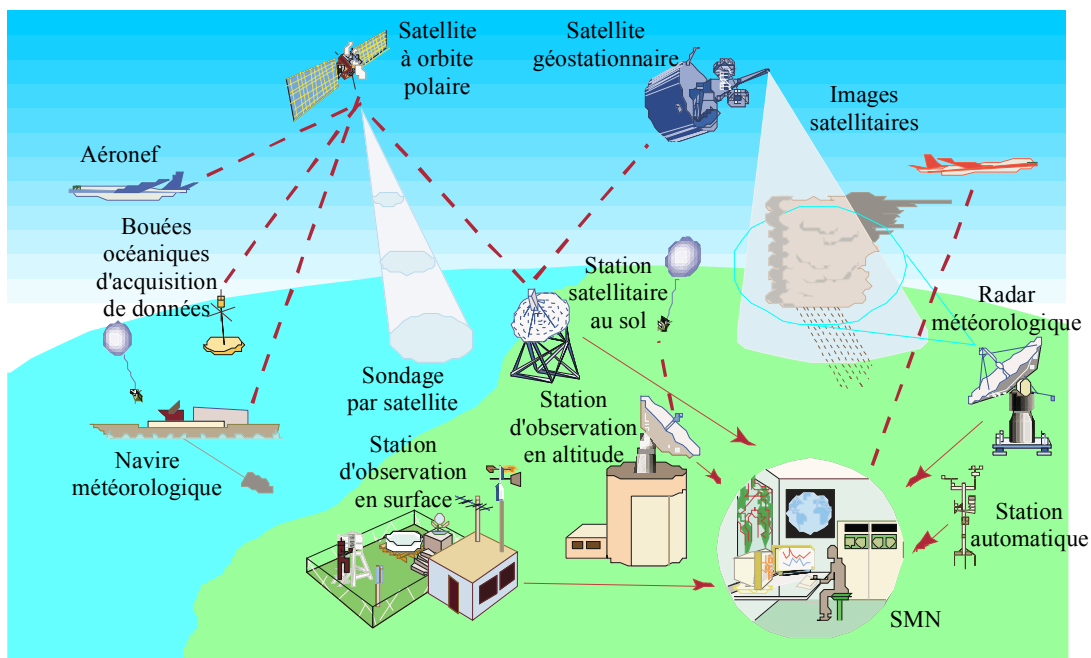
personnes et des biens par la détection, la prévision et l'avis de phénomènes violents tels que les tempêtes locales, les tornades, les ouragans, les cyclones tropicaux et extra-tropicaux. Il procure aussi des données à la météorologie agricole, à la météorologie aéronautique et à la climatologie, notamment pour l'étude du climat et des changements mondiaux. 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. Le SMO appuie également divers programmes relatifs à l'environnement dans le monde entier.

### 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 Système mondial d'observation du climat (SMOC).

FIGURE 1-2

### Système mondial d'observation



### 1.1.1.2 Observations en altitude

A partir d'environ 900 stations aérologiques réparties sur la planète, 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.

### **1.1.1.3 Observations radar**

Les radars Doppler 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 présentent le grand avantage de mesurer les vents et d'estimer le volume des pluies. 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 6 700 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 700 bouées dérivantes produisent chaque jour 3 500 messages d'observation de la température de la mer et de la pression de l'air en surface.

### **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 50 000 par jour, dix fois 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 réseau de satellites météorologiques et de surveillance de l'environnement regroupe des appareils à défilement et des appareils géostationnaires d'étude de l'environnement (voir la Fig. 1-3). Ils sont en principe dotés d'imageurs dans le visible et l'infrarouge, ainsi que de sondeurs à hyperfréquences qui permettent de déduire une multitude de paramètres météorologiques. Plusieurs satellites à orbite polaire ont à leur bord des instruments capables de fournir, en l'absence de nuages, les profils verticaux de la température et de l'humidité. 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 prévision du temps a 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.

### **1.1.1.7 Futur programme du SMO**

Le SMO de la VMM continuera à être un système d'un bon rapport coût-efficacité composé de plates-formes en surface et dans l'espace (satellites). La résolution spatiale et temporelle des observations s'améliorera. Le sous-système de surface fera plus largement appel à de nouveaux

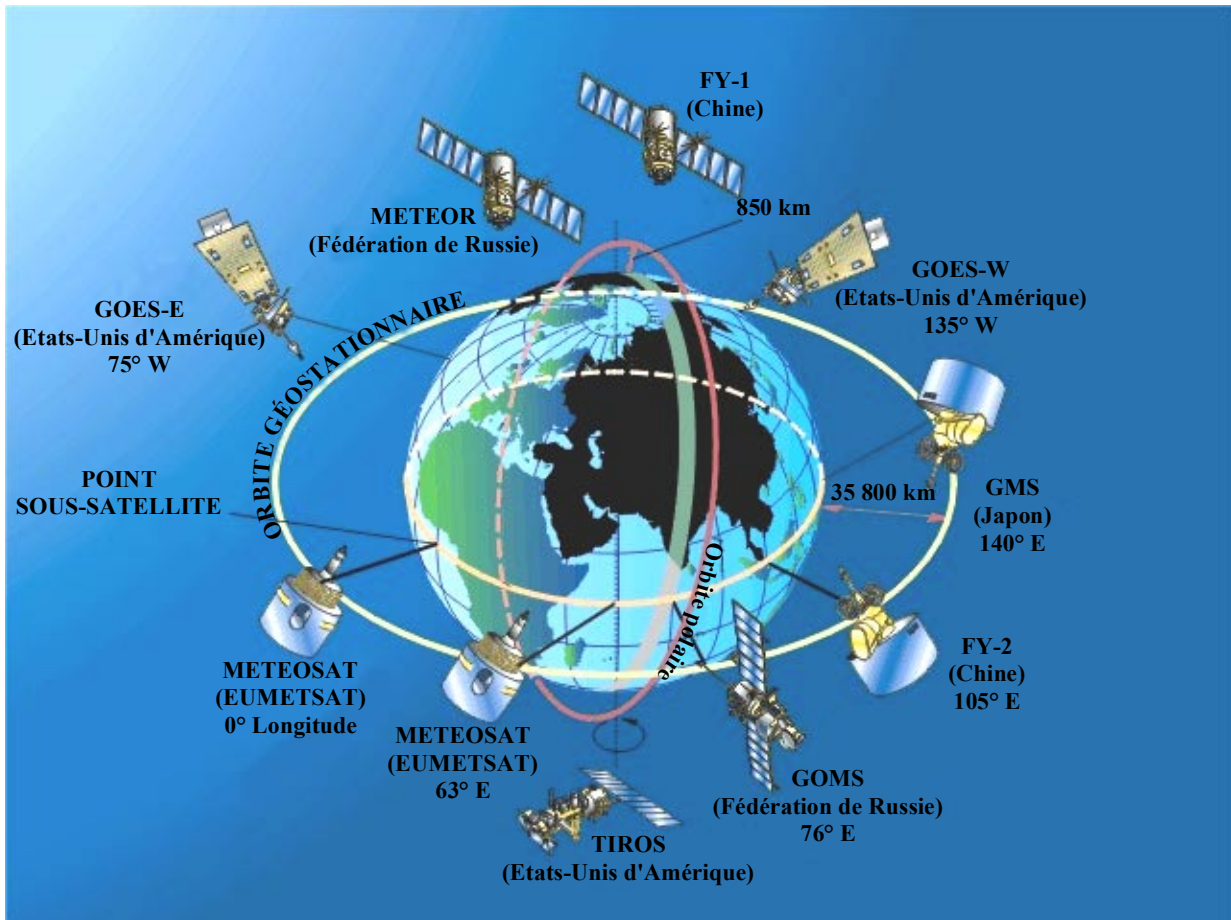


équipements tels que les profileurs de vent, les radars Doppler et décimétriques, les réseaux de détection des éclairs. On utilisera davantage la flotte, en expansion rapide, d'aéronefs munis de dispositifs automatiques d'observation et de transmission pour recueillir des données aux niveaux de croisière et durant les montées et les descentes. Les stations mobiles en mer resteront la source principale d'observations synoptiques en surface dans les régions océaniques.

Le nombre de navires dotés d'équipements de mesure automatique en altitude s'accroîtra et l'entrée en service d'équipements plus efficaces à moindre coût s'accélénera. Des bouées dérivant en dehors des grandes routes maritimes continueront de procurer des données atmosphériques et océanographiques de surface dans les zones où les observations sont rares. Le volume et la qualité des données augmenteront de pair avec l'emploi d'équipements automatiques d'observation et de transmission par satellite. Le sous-système spatial comprendra une nouvelle génération de satellites géostationnaires et à défilement équipés de capteurs plus performants. On procédera à davantage de sondages et de pseudo-sondages à partir de satellites géostationnaires, tandis que les sondeurs des satellites à défilement comporteront un plus grand nombre de canaux et offriront plus de précision.

FIGURE 1-3

### Constellation de satellites météorologiques



## **1.2 Les autres systèmes liés aux 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. Vingt-deux 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 météorologiques de la VAG sont spécialisés dans l'observation du rayonnement solaire, la détection des éclairs et les mesures marégraphiques.

### **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. 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 qui transmet des données hydrologiques et météorologiques en temps quasi-réel en s'appuyant sur un réseau planétaire de stations de référence.

## CHAPITRE 2

### LE SERVICE DE MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE

|  | Page |
|--|------|
| 2.1 Le service de météorologie par satellite et ses fréquences.....            | 8    |
| 2.2 Les systèmes du service MetSat à satellites OSG.....                       | 9    |
| 2.2.1 Transmission des données brutes de capteurs d'images .....               | 9    |
| 2.2.2 Diffusion des données .....  | 9    |
| 2.2.2.1 Distribution des images à haute résolution .....                       | 9    |
| 2.2.2.2 Service S-VISSR.....   | 9    |
| 2.2.2.3 Données des satellites GOES .....                                      | 10   |
| 2.2.2.4 Transmission de cartes météorologiques en fac-similé.....              | 10   |
| 2.2.2.5 Distribution des données météorologiques .....                         | 11   |
| 2.2.2.6 Transmission des informations à faible débit.....                      | 11   |
| 2.2.2.7 Transmission des informations à haut débit.....                        | 11   |
| 2.2.2.8 Satellites météorologiques d'exploitation géostationnaires (GOMS)..... | 12   |
| 2.2.3 Plates-formes de collecte de données.....                                | 12   |
| 2.3 Les systèmes du service MetSat à satellites non OSG.....                   | 13   |
| 2.3.1 Transmission des données brutes de capteurs d'images .....               | 13   |
| 2.3.2 Diffusion des données .....  | 13   |
| 2.3.2.1 Transmission automatique des images.....                               | 13   |
| 2.3.2.2 Transmission des images à faible débit.....                            | 13   |
| 2.3.2.3 Transmission des images à haute résolution .....                       | 13   |
| 2.3.3 Plates-formes de collecte de données.....                                | 14   |

## 2.1 Le service de météorologie par satellite 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». Pour sa part, le service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) 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.

L'UIT-R formule un certain nombre de Recommandations relatives au service de météorologie par satellite. D'autres Commissions d'études examinent les questions de compatibilité entre ce service et ceux dont elles s'occupent. Etant donné l'ampleur des travaux visant le partage du spectre météorologique avec d'autres services et usagers, les Recommandations UIT-R sont sans cesse révisées ou remplacées et de nouvelles s'y ajoutent fréquemment. Le lecteur est renvoyé à la liste des Publications de l'UIT-R pour obtenir les informations à jour.

Les bandes de fréquences radioélectriques actuellement attribuées au service MetSat comprennent:

| <b>Bande (MHz)</b>       | <b>Attribution</b>   |
|--------------------------|--|
| <b>Espace vers Terre</b> |  |
| 137-138                  | Attribution à titre primaire   |
| 400,15-401               | Attribution à titre primaire   |
| 460-470                  | Attribution à titre secondaire   |
| 1 670-1 710              | Attribution à titre primaire   |
| 7 450-7 550              | Attribution à titre primaire, satellites géostationnaires uniquement     |
| 7 750-7 850              | Attribution à titre primaire, satellites non géostationnaires uniquement |
| <b>Terre vers espace</b> |  |
| 401-403                  | Attribution à titre primaire   |
| 8 175-8 215              | Attribution à titre primaire   |

Le service de météorologie pas satellite faisant partie du SETS, ses futures applications pourraient profiter des bandes attribuées à ce dernier (25,5-27 GHz par exemple). De plus, les satellites MetSat utilisent couramment les fréquences réservées à la détection passive. Ils recueillent à l'aide de capteurs internes des données qui produisent des images photographiques à plusieurs longueurs d'onde (voir, au Chapitre 5, les capteurs actifs et passifs). Les satellites de météorologie et

d'exploration de la Terre sont dotés de systèmes (ARGOS, etc.) qui retransmettent les signaux provenant de plates-formes de collecte de données (PCD) situées au sol, à bord d'aéronefs ou sur des navires. La plupart des PCD utilisent la bande 401-403 MHz pour envoyer les données sur des paramètres tels que la température en surface, la vitesse des vents, l'intensité des pluies, la hauteur des courants, les gaz à l'état de trace 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.

En principe, les données brutes sont reçues au sol par l'exploitant, traitées puis transmises à divers services météorologiques, 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. Une fois traitées, les données sont souvent renvoyées au satellite qui les retransmet en radiodiffusion directe vers les stations d'utilisateur, par fac-similé météorologique (WEFAX) ou, plus haut dans la bande, par signaux numériques à débit élevé.

## **2.2 Les systèmes du service MetSat à satellites OSG**

### **2.2.1 Transmission des données brutes de capteurs d'images**

Les données captées par les instruments placés à bord des satellites météorologiques 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)). 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 vont de 2 à 20 MHz, selon les caractéristiques du capteur et les méthodes de modulation employées.

### **2.2.2 Diffusion des données**

#### **2.2.2.1 Distribution des images à haute résolution**

Le service de distribution des images à haute résolution (HRI, *high resolution image*) fonctionne avec un engin METEOSAT. 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, 0°). Environ 500 stations principales HRI reçoivent ce service EUMETSAT. 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 radiodiffusion 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°. Ce service sera remplacé par un service numérique de transmission des informations à haut débit (HRIT, *high rate information transmission*) sur les systèmes MetSat de deuxième génération.

#### **2.2.2.2 Service S-VISSR**

Les systèmes à satellites ci-après exploitent le service étendu de radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge (S-VISSR, *stretched visible infrared spin scan radiometer*):

- GMS (Japon);
- FY-2 (Chine).

Les données relevées par les capteurs du VISSR sont transmises vers les stations principales au sol du système correspondant. 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°.

Quand le satellite MTSAT sera opérationnel, le service S-VISSR lié au système GMS sera remplacé par la version améliorée HiRID, qui sera remplacée à son tour par le service HRIT.

### **2.2.2.3 Données des satellites GOES**

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°W et à 135°W. Ces stations se trouvent en Amérique du Nord et du Sud, mais aussi en Nouvelle-Zélande, en France 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.

Chaque satellite se charge des transmissions S-VISSR et GVAR vers les stations d'utilisateur. Les satellites GMS-5 et FY-2 effectuent couramment les premières, tandis que les secondes ne sont disponibles qu'en Amérique (à partir des satellites GOES, d'où leur nom). Ce sont essentiellement les stations TAD qui devaient, au départ, recevoir les signaux GVAR mais ils sont aujourd'hui captés par une grande variété d'utilisateurs. Outre les principaux usagers que sont les organismes météorologiques nationaux, on retrouve également des sociétés privées de prévision météorologique et des entreprises qui ont besoin de connaître le temps qu'il fait dans des secteurs où les prévisions sont rares, c'est-à-dire sur des terres isolées et sur les océans. Plusieurs fournisseurs proposent au public des récepteurs GVAR et S-VISSR. De plus, il est facile pour quelqu'un qui connaît la technologie employée de monter un récepteur à partir de pièces vendues dans le commerce. Aucune autorisation ni inscription n'étant généralement exigée pour les stations qui fonctionnent seulement en réception, il est impossible de déterminer le nombre et l'emplacement de ces installations.

### **2.2.2.4 Transmission de cartes météorologiques en fac-similé**

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. Le Groupe de coordination des satellites météorologiques (CGMS) a défini les paramètres de ce service, qui est exploité par les systèmes à satellites suivants:

- GOES-E (Etats-Unis d'Amérique)
- GOES-W (Etats-Unis d'Amérique)

- GMS (Japon)
- GOMS (Russie)
- METEOSAT (EUMETSAT)
- FY-2 (Chine).

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 et GMS) 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 *G/T* équivalant à 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. 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.

#### **2.2.2.5 Distribution des données météorologiques**

Seul METEOSAT exploite le service de distribution des données météorologiques (MDD, *meteorological data distribution*), au moyen de quatre canaux de données offrant chacun un débit de 2 400 kbit/s. Les transmissions se font dans la bande 1 695,68 à 1 695,86 MHz. Il existe des centaines de stations d'utilisateur, en Europe et en Afrique surtout, dotées d'antennes de 2,4 m de diamètre, qui exigent un facteur de qualité de 6 dB/K. Un angle d'élévation d'au moins 3° est nécessaire au fonctionnement.

#### **2.2.2.6 Transmission des informations à faible débit**

Ce nouveau service, appelé LRIT, sera fourni par des satellites météorologiques géostationnaires à destination de stations d'utilisateur peu coûteuses. Il remplacera le service WEFAX 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 200 kHz. Les antennes, d'environ 1,8 m de diamètre, fonctionneront avec un angle d'élévation d'au moins 3°. Le facteur de qualité des LRUS sera de 5 à 6 dB/K (GMS: 3 dB/K) selon l'emplacement.

#### **2.2.2.7 Transmission des informations à haut débit**

Le service HRIT, qui doit être introduit sur la deuxième génération de satellites METEOSAT et sur les satellites japonais MTSAT, remplacera les services HRI et S-VISSR actuels. D'autres exploitants de satellites devraient aussi l'adopter pour leurs futurs services de radiodiffusion. On prévoit

que plusieurs centaines de stations d'utilisateur à débit élevé (HRUS, *high rate user stations*) et MDUS seront exploitées dans le monde. Les usagers en seront les grands centres météorologiques et climatologiques, les universités et d'autres utilisateurs qui élaborent des produits numériques.

Le service HRIT fonctionnera dans la sous-bande 1 690-1 698 MHz. Les stations HRUS et MDUS seront équipées d'antennes de 4 m et l'angle d'élévation devra être de 3° ou plus. Le facteur de qualité ira de 12 à 14 dB/K, selon l'emplacement de la station.

#### **2.2.2.8 Satellites météorologiques d'exploitation géostationnaires (GOMS)**

Le système à satellites GOMS de la Russie émet dans la bande 7 450-7 550 MHz, en format direct haute résolution (HRD, *high resolution direct*) des données d'images brutes que peut capter n'importe quel usager. Le signal a une largeur de bande de 5 MHz. La réception est possible avec deux types de stations dotées d'antennes de 3 m ou de 12 m.

#### **2.2.3 Plates-formes de collecte de données**

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, 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 mais on met actuellement à l'essai des vitesses plus élevées (300 et 1 200 bits/s). Les largeurs de bande sont de 1,5 ou 3 kHz. Il existe deux types d'émetteurs, un de 5 W de puissance avec antenne directive et un 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 systèmes à satellites météorologiques géostationnaires suivants exploitent des installations de collecte de données:

- GOES-E (Etats-Unis d'Amérique)
- GOES-W (Etats-Unis d'Amérique)
- METEOSAT (EUMETSAT)
- GOMS (Russie)
- GMS/MTSAT (Japon)
- FY-2 (Chine).

Les PCD liées à des satellites météorologiques géostationnaires utilisent les fréquences situées entre 401,7 et 402,4 MHz, avec 402,0-402,1 MHz pour l'international (33 canaux de 3 kHz de largeur). Les systèmes à satellites GOES (Etats-Unis d'Amérique) assignent leurs propres fréquences entre 401,7 et 402 MHz, tandis que les satellites METEOSAT (Europe) et GMS (Japon) utilisent la gamme 402,1-402,4 MHz et les satellites GOMS (Russie) la bande 401,7-402,4 MHz (en exploitation à compter de 2003). L'emploi de bandes étroites (1,5 kHz dans certains cas) et l'échelonnement des heures de compte rendu permettent de recevoir des données d'un grand nombre de plates-formes. Il existe actuellement un peu plus de 11 000 PCD GOES, chiffre qui devrait plus que doubler pour atteindre 23 000. Une telle augmentation pourrait exiger d'étendre l'utilisation du spectre vers des fréquences supérieures, soit 403 MHz.



## **2.3 Les systèmes du service MetSat à satellites non OSG**

### **2.3.1 Transmission des données brutes de capteurs d'images**

Les données brutes des satellites météorologiques européens à orbite polaire seront transmises dans la bande 7750-7850 MHz vers les stations principales établies aux hautes latitudes. Jusqu'à quatre stations de réception sont en général associées à ces systèmes. Les transmissions se feront par salves lorsque chaque satellite passera au-dessus de sa station de réception, les émetteurs étant arrêtés le reste du temps. Ces systèmes seront exploités par l'Agence spatiale européenne (ASE)/EUMETSAT à partir de 2003. Les largeurs de bande types seront de 100 MHz et la station de réception présentera un facteur de qualité  $G/T$  de 32 dB/K. Les diagrammes d'antenne devront être conformes à l'Appendice 7 du RR.

### **2.3.2 Diffusion des données**

#### **2.3.2.1 Transmission automatique des images**

Le service de transmission automatique des images (APT, *automatic picture transmission*), qui a débuté dans les années 1960 sur un engin spatial américain, est devenu le principal service de radiodiffusion directe du secteur de la météorologie. Il existe des milliers de stations de réception APT 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. Le service APT est exploité par les satellites de la NOAA (Etats-Unis d'Amérique) et par les satellites METEOR, Okean et Resurs-01#4 (Russie).

Les transmissions APT reposent sur un système à modulation analogique. Elles se font dans la bande 137-138 MHz, avec des largeurs de bande types de 40 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 137-137,175 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 Transmission des images à faible débit**

Le service de transmission des images à faible débit (LRPT, *low resolution picture transmission*) devrait remplacer le service APT sur les futures générations de satellites météorologiques non OSG. Basé sur la transmission numérique, il emploiera les mêmes fréquences que le service APT actuel. La largeur de bande pourra là aussi atteindre 175 kHz. La majorité des utilisateurs APT devrait opter pour ce service, ce qui se traduirait par des milliers de stations dans le monde. Le service LRPT sera d'abord mis en œuvre par EUMETSAT sur les satellites METOP/EPS, puis en principe par les Etats-Unis d'Amérique, la Russie et la Chine.

#### **2.3.2.3 Transmission des images à haute résolution**

Le service de transmission des images à haute résolution (HRPT, *high resolution picture transmission*), actuellement assuré par les satellites de la NOAA (Etats-Unis d'Amérique), est destiné à la météorologie. La Russie envisage elle aussi d'offrir ce service. Par ailleurs, les satellites chinois (voir service HRPT chinois plus bas) assurent une diffusion similaire. N'importe quelle installation située dans la zone de réception du satellite peut capter les transmissions, qui se font en

continu. Des centaines de stations HRPT dans le monde sont inscrites auprès de l'OMM. Précisons, là encore, que ce chiffre est approximatif puisque l'enregistrement n'est 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 1 696 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 est de 5°, même si certaines stations fonctionnent sous ce niveau. Le facteur de qualité est de 5 dB/K.

#### **2.3.2.3.1 Service HRPT chinois**

Les caractéristiques fondamentales du service HRPT chinois (CHRPT) sont comparables à celles du HRPT. La grande différence est le débit de transmission, deux fois plus rapide. La largeur de bande correspond à celle du service HRPT. Seuls les satellites FY-1 exploitent ce service.

#### **2.3.2.3.2 Service HRPT évolué**

Il devrait remplacer le service HRPT sur les futurs satellites météorologiques. L'introduction est prévue sur les satellites METOP/EPS d'EUMETSAT et FY3 chinois (également appelés CHHRPT). Les exploitants pourront continuer à offrir le service actuel pendant un certain temps.

Les transmissions se feront entre 1 698 et 1 710 MHz, avec une largeur de bande de 4,5 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. Le service CHHRPT sera exploité à 1 704,5 MHz.

### **2.3.3 Plates-formes de collecte de données**

Les PCD 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 émergées et l'atmosphère liés à des processus physiques, chimiques et biologiques. Cela peut aussi comprendre 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. Des plates-formes d'alerte détectent les situations d'urgence et aident à déceler les dangers ou les catastrophes. ARGOS est le système de collecte exploité à partir des satellites météorologiques non OSG. Il ne se trouve actuellement qu'à bord des satellites à orbite polaire de la NOAA, mais devrait être embarqué sur ADEOS-2 (Japon), sur la nouvelle série de satellites européens à orbite polaire METOP et sur une nouvelle génération de satellites russes à orbite polaire (METEOR-3M).

La Conférence mondiale des radiocommunications (CMR-97) a accordé en 1997 le statut primaire à la bande 401-403 MHz. Le système ARGOS utilise la fréquence centrale 401,65 MHz et des largeurs de bande pouvant pour les PCD atteindre 100 kHz, même si de nombreuses plates-formes (dites stations émettrices de plates-formes) n'ont besoin que de quelques kHz. Il est possible de recevoir les observations de nombreuses plates-formes ARGOS étant donné la nature de l'orbite de ces satellites. On pense que les 3 800 PCD actuelles passeront à 8 700, ce qui exigera l'utilisation d'une nouvelle partie du spectre, peut-être dans les fréquences plus basses, c'est-à-dire vers 401 MHz.

## CHAPITRE 3

### LE SERVICE DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE

|  | Page |
|--|------|
| 3 Introduction .....   | 16   |
| 3.1 Les bandes de fréquences .....   | 16   |
| 3.2 Les applications en météorologie du service MetAids.....                               | 17   |
| 3.3 Quelques systèmes de détection du service MetAids.....                                 | 19   |
| 3.3.1 Les radiosondes .....  | 19   |
| 3.3.2 Les parasondes .....   | 20   |
| 3.3.3 Les sondes-fusées .....  | 21   |
| 3.4 Facteurs ayant une influence sur les caractéristiques des systèmes MetAids .....       | 23   |
| 3.4.1 Antenne-récepteur au sol.....  | 23   |
| 3.4.2 Installation de traitement au sol .....  | 24   |
| 3.4.3 Blocs de détection non récupérables .....  | 24   |
| 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 1 668,4-1 700 MHz .....                                      | 31   |
| 3.6.6 Conservation des deux bandes de fréquences .....                                     | 31   |
| 3.7 Les tendances futures .....  | 32   |
| 3.7.1 Mesure des vents par le système GPS.....   | 32   |
| 3.7.2 Circuits intégrés d'émetteurs de type commercial .....                               | 32   |
| 3.7.3 Augmentation de la densité des réseaux .....   | 32   |

### 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 fréquences radioélectriques attribuées au service MetAids (outre celles régies par les renvois nationaux) sont les suivantes:

| Bande             | Statut                | Autres services primaires dans la bande  |
|-------------------|-----------------------|--|
| 2 025-2 045 kHz   | Secondaire (Région 1) | FIXE, MOBILE   |
| 27,5-28 MHz       | PRIMAIRE              | FIXE, MOBILE   |
| 153-154 MHz       | Secondaire (Région 1) | FIXE, MOBILE   |
| 400,15-401 MHz    | PRIMAIRE              | MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (espace vers Terre)<br>MOBILE PAR SATELLITE (espace vers Terre)<br>RECHERCHE SPATIALE (espace vers Terre)                     |
| 401-402 MHz       | PRIMAIRE              | EXPLOITATION SPATIALE (espace vers Terre)<br>MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (Terre vers espace)<br>EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (Terre vers espace) |
| 402-403 MHz       | PRIMAIRE              | MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (Terre vers espace)<br>EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE (Terre vers espace)  |
| 403-406 MHz       | PRIMAIRE              |  |
| 1 668,4-1 670 MHz | PRIMAIRE              | FIXE, MOBILE<br>RADIOASTRONOMIE  |
| 1 670-1 675 MHz   | PRIMAIRE              | FIXE, MOBILE<br>MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (espace vers Terre)   |
| 1 675-1 690 MHz   | PRIMAIRE              | FIXE, MOBILE<br>MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (espace vers Terre)<br>MOBILE PAR SATELLITE (Terre vers espace)<br>(Région 2 seulement)                       |
| 1 690-1 700 MHz   | PRIMAIRE              | MÉTÉOROLOGIE PAR SATELLITE (espace vers Terre)<br>MOBILE PAR SATELLITE (Terre vers espace)<br>(Région 2 seulement)                                       |
| 35,2-36 GHz       | PRIMAIRE              | RADIOLOCALISATION  |

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.

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.

Une étude consacrée à l'utilisation du service entre 1978 et 1988 a révélé que les radiosondes vendues dans le commerce fonctionnaient à des fréquences de 27,5 MHz à 28 MHz, 400,15 MHz à 406 MHz et 1668,4 MHz à 1700 MHz dans le réseau OMM. 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. 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. 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<br>RPV (véhicule piloté à distance,<br><i>remotely piloted vehicle</i> ) ou UAV<br>(véhicule aérien sans équipage,<br><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

Quelque 800 000 radiosondes sont emportées par des ballons chaque année dans le monde (voir les Fig. 3-1 et 3-2). 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

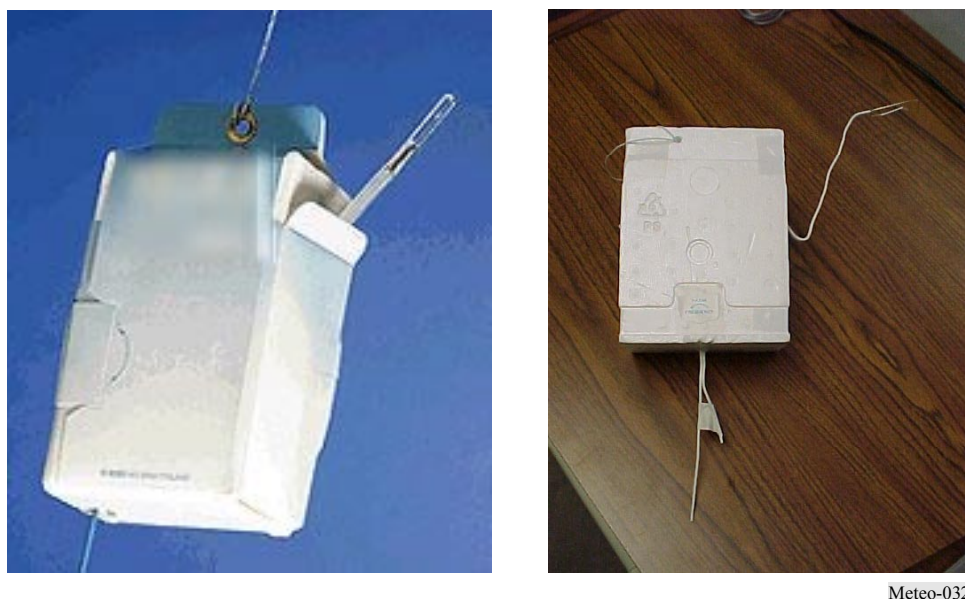
#### Lancement d'une radiosonde



Meteo-031

FIGURE 3-2

### Radiosondes



Une radiosonde classique renferme plusieurs éléments: un émetteur, un bloc de détection, une pile et un récepteur NAVAJD d'aide à la navigation (voir la Fig. 3-3). L'émetteur envoie les données à la station de réception. 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. Si la mesure des vents se fait grâce aux signaux NAVAJD, la radiosonde est dotée d'un récepteur spécial. Les radiosondes NAVAJD captent les signaux système mondial de radiorepérage (GPS), LORAN et VLF. 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  $-90^{\circ}\text{C}$ .

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 Les parasondes

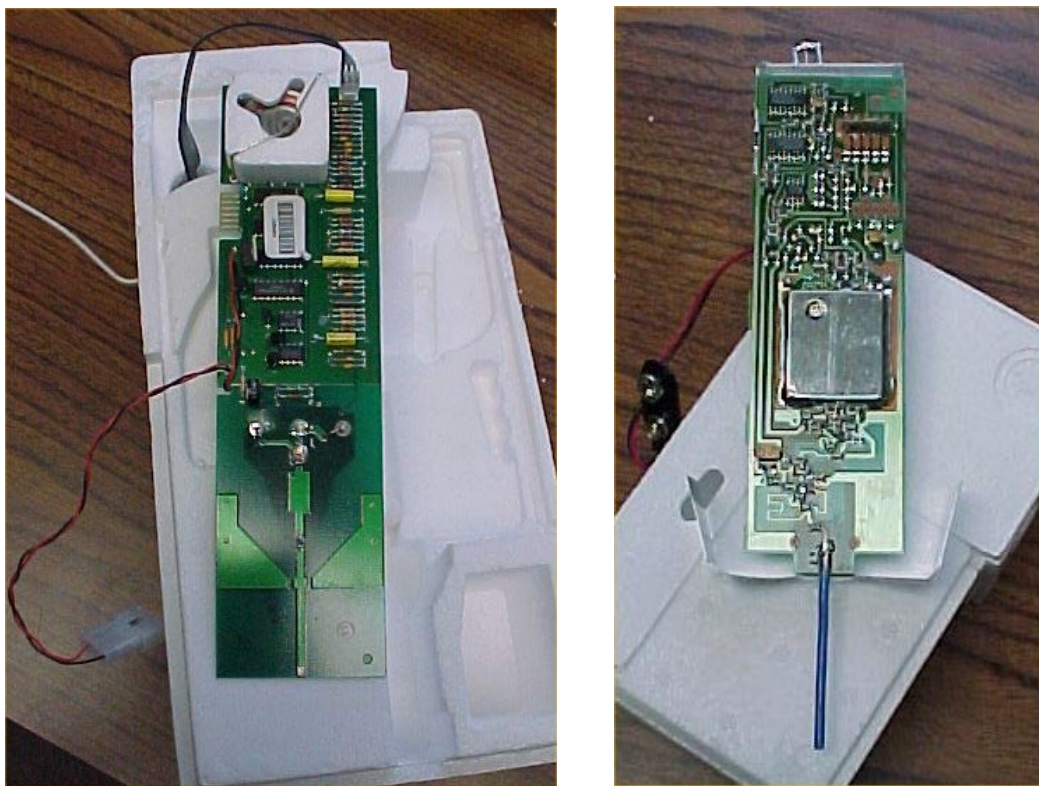
Leurs composants sont semblables à ceux des radiosondes, mais l'assemblage est modifié parce que ces appareils sont parachutés d'un aéronef et établissent les profils de l'atmosphère pendant leur descente (voir la Fig. 3-4). L'aéronef ne pouvant être muni d'une grande antenne de poursuite,



toutes les parasondes fonctionnent dans la bande 401-406 MHz et mesurent les vents par les signaux NAVD (GPS actuellement). 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.

FIGURE 3-3

### Equipement électronique des radiosondes



Meteo-033

### 3.3.3 Les sondes-fusées

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. 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

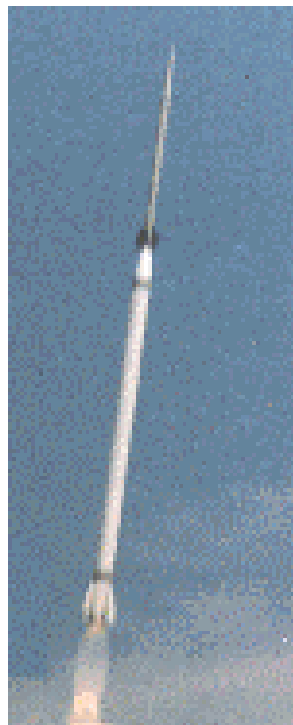
**Parasonde**



Meteo-034

FIGURE 3-5

**Sonde-fusée**



Meteo-035

### 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 SA.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-036

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-037

#### 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 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 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 possibles 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. On utilise encore peu les circuits intégrés à application spécifique (ASIC, *application specific integrated circuits*) du type commercial car une bonne partie des produits destinés aux communications sans fil ne présentent pas les caractéristiques voulues pour de telles conditions d'exploitation ou ne fonctionnent pas dans les bandes attribuées au service MetAids.

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 kg. Les radiosondes sont en général placées dans une enveloppe légère de mousse ou de carton 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.

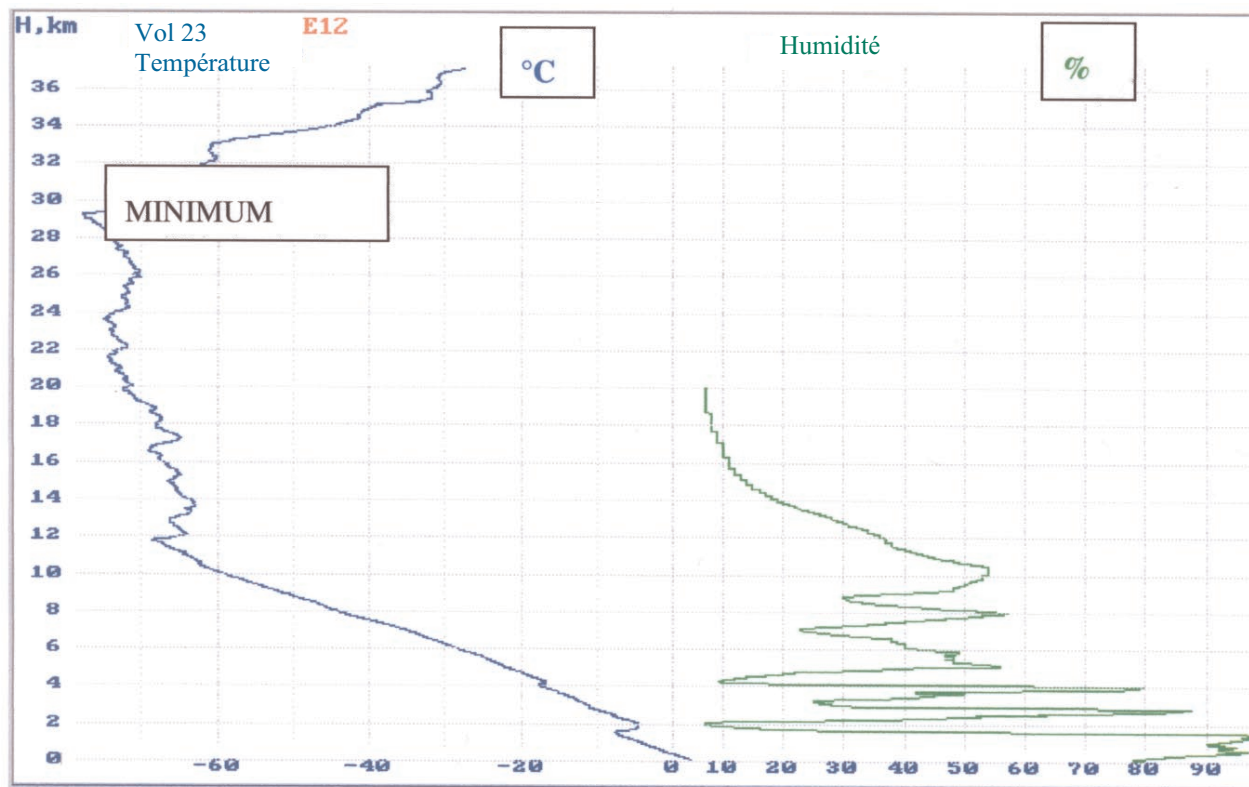
La Fig. 3-8 montre les mesures de la température et de l'humidité relative en fonction de l'altitude obtenues le 23 janvier 2000 à une station de surveillance du climat située à 60° N au Royaume-Uni (Lerwick, îles Shetland). Les valeurs de la température, qui comportent de faibles erreurs (moins de 0,5° 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, que ce soit à des fins civiles ou stratégiques.

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 1980. Les appareils plus anciens n'étaient plus fiables à partir de -30° C ou -40° C. Ces capteurs sont extrêmement difficiles à fabriquer. Ils exigent encore de lourds investissements à long terme dans la conception et les installations de production.

FIGURE 3-8

Mesure de la température et de l'humidité par radiosondage



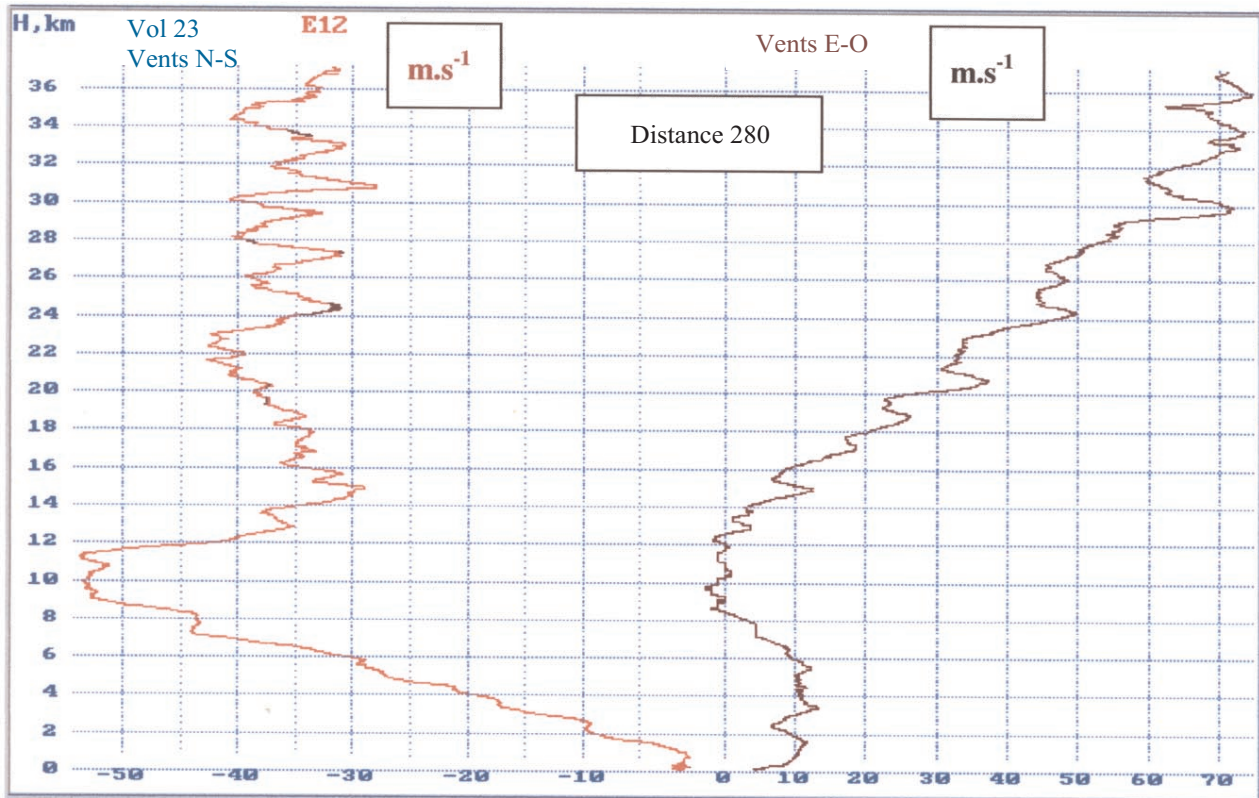
Meteo-038

Dans la Fig. 3-8, la température la plus basse est relevée à 29 km environ, alors que de l'air encore plus froid se trouvait au nord de la station. On approche là des conditions propres à déclencher les mécanismes chimiques qui détruisent l'ozone pendant l'hiver boréal. La remontée rapide de la température au-delà de 29 km est due au réchauffement important que produisent les mouvements de la haute atmosphère à cette période de l'année.

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



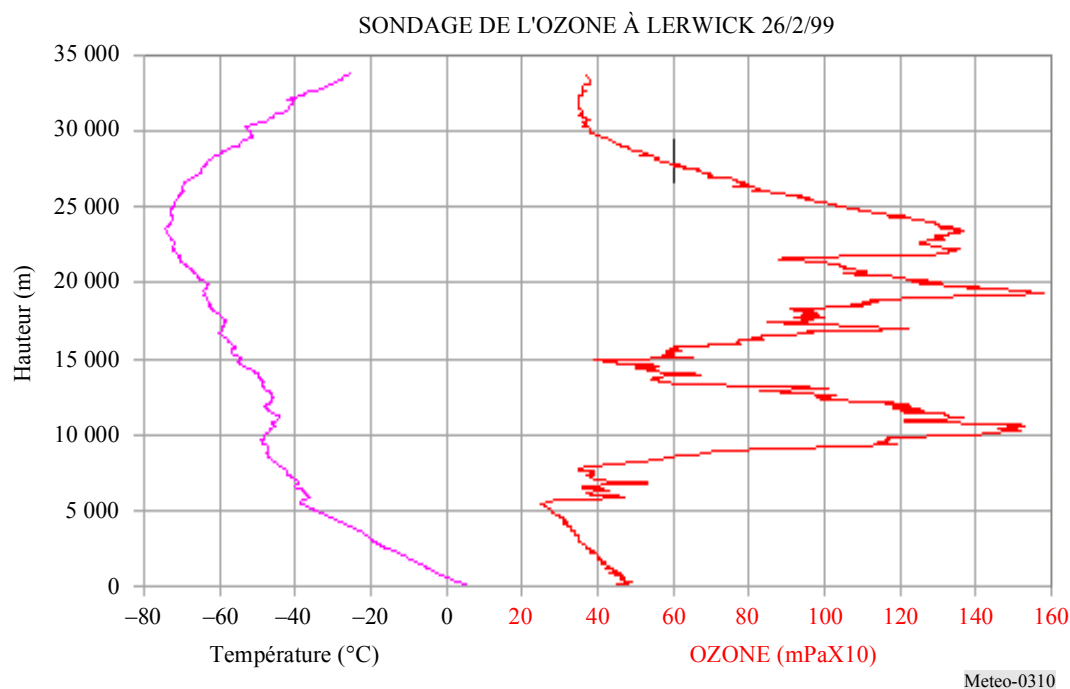
Meteo-039

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

### 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 NAVAJD. 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 1680 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 NAVAJD 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**

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 organisé en 1998 une réunion d'experts sur les caractéristiques des fréquences radioélectriques attribuées aux MetAids. Le groupe a conclu que la totalité de la bande 401-406 MHz était nécessaire, dans un avenir proche, pour conduire ces opérations. Il a été 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 1 668,4-1 700 MHz**

La situation est différente dans cette région du spectre. 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. De nombreux 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. Lors de la réunion d'experts sur les caractéristiques des fréquences radioélectriques attribuées aux auxiliaires de la météorologie tenue par l'OMM en 1998, le groupe a conclu que les opérations du service MetAids exigeaient, dans un avenir proche, 12 MHz dans cette bande. Cette estimation correspondait aux besoins de pointe et certains pays pourraient utiliser moins de spectre. Dans cet esprit, les réunions ultérieures de l'OMM ont recommandé que le service MetAids soit soigneusement protégé au sein de la sous-bande 1 675-1 683 MHz.

### **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, LORAN ou VLF), 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 NAV-AID, 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 téléométrique 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.

#### **3.7.1 Mesure des vents par le système GPS**

L'utilisation du GPS pour mesurer les vents avec des radiosondes améliorerait de beaucoup l'efficacité spectrale des appareils NAVAID. Elle se traduirait, 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 devraient être transmises 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. Ce genre de radiosonde existe depuis 1997 mais, quatre ans plus tard, l'OMM s'efforce encore de résoudre avec les fabricants les problèmes apparus en exploitation. Le Chapitre 6 présente d'autres utilisations du service de radionavigation GPS par les météorologistes.

#### **3.7.2 Circuits intégrés d'émetteurs de type commercial**

Jusqu'à présent, l'emploi de circuits intégrés destinés aux communications sans fil ne s'est pas étendu pour plusieurs raisons. Peu de ces circuits vont jusqu'aux bandes de fréquences du service MetAids. Par ailleurs, ils sont rarement conçus pour supporter des températures extrêmes. La mise au point et la fabrication de circuits ASIC qui répondent précisément aux critères de fréquence, d'alimentation et de milieu ambiant du service MetAids ne sont toujours pas rentables, vu la demande relativement faible par année. Cependant, à l'avenir, les coûts devraient décroître et permettre la production économique de plus petites quantités de circuits ASIC pour des applications plus limitées comme celles-ci.

#### **3.7.3 Augmentation de la densité des réseaux**

L'OMM a énoncé des objectifs en matière de densité des réseaux qui ont contraint les exploitants du service des auxiliaires de la météorologie à améliorer les caractéristiques d'émission des appareils afin d'éliminer le brouillage causé aux stations adjacentes.

## **Bibliographie**

OMM [1996] Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, OMM-N° 8.

## CHAPITRE 4

### LES RADARS MÉTÉOROLOGIQUES

|   | Page |
|---|------|
| 4.1 Introduction .....  | 34   |
| 4.1.1 Généralités.....  | 34   |
| 4.1.2 Equation radar .....  | 35   |
| 4.2 Les radars météorologiques tournants.....                         | 35   |
| 4.2.1 Applications .....  | 35   |
| 4.2.2 Aspects opérationnels de la réflectivité.....                   | 35   |
| 4.2.3 Les réseaux de radars météorologiques.....                      | 36   |
| 4.2.4 Les radars Doppler .....  | 36   |
| 4.2.5 Les radars multiparamètres .....                                | 37   |
| 4.2.6 Suppression des échos fixes .....                               | 37   |
| 4.2.7 Besoins actuels et futurs de spectre.....                       | 37   |
| 4.2.8 Risques de brouillage des radars .....                          | 39   |
| 4.2.9 Risques de brouillage d'autres systèmes.....                    | 40   |
| 4.3 Les radars profileurs de vent .....                               | 40   |
| 4.3.1 Applications .....  | 40   |
| 4.3.2 Aspects relatifs au fonctionnement et aux fréquences .....      | 42   |
| 4.3.3 Besoins actuels et futurs de spectre.....                       | 44   |
| 4.3.4 Partage du spectre.....   | 44   |
| 4.3.5 Réseau JMA de profileurs de vent dans la bande de 1,3 GHz ..... | 45   |
| 4.3.6 Réseaux de profileurs de vent .....                             | 47   |

## 4.1 Introduction

Tout le monde sait que les radars météorologiques permettent de sauver des vies. 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 de savoir s'il pleuvra, et avec quelle intensité, ce qui peut indiquer des risques de crue éclair. Il nous renseigne aussi sur les probabilités de vents violents et de foudre. Les radars météorologiques sont exploités dans le cadre du service de radiolocalisation.

Ce Chapitre présente les types de radars au sol couramment employés en météorologie. Le premier est le radar tournant, qui fournit des données sur une zone plus ou moins circulaire autour de son emplacement. Généralement appelé radar météorologique, cet appareil est bien connu du grand public car on le voit souvent lors de la présentation du temps à la télévision. Les bandes de fréquences radioélectriques utilisées se situent au voisinage de 2,8 GHz, 5,6 GHz, 9,4 GHz et 35,6 GHz.

Un modèle plus récent est le radar profileur de vent, qui procure des données sur un volume plus ou moins conique, juste au-dessus de l'appareil. Utilisé couramment depuis une dizaine d'années, 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 et 1 000 MHz.

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.). Le signal de retour est faible pour plusieurs raisons. D'abord, il doit franchir deux fois le même trajet, du radar à la cible et de la cible au radar. Deuxièmement, la cible ne constitue pas un réflecteur particulièrement efficace. 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.

### 4.1.1 Généralités

Les radars météorologiques sont généralement des appareils à faisceau étroit et à balayage de volume qui détectent et mesurent l'intensité et la vitesse de la grêle, de la neige, des nuages et, surtout, de la pluie. La réflectivité de la pluie est liée aux paramètres suivants: distribution en dimension des gouttes, permittivité relative du milieu et longueur d'onde radar. Les radars peuvent également mesurer les vents. C'est le cas des trois catégories ci-après:

1. Les radars météorologiques Doppler, les hydrométéores servant de traceurs.
2. Les radars de poursuite des ballons, qui établissent le vecteur vent en vitesse et direction.
3. Les radars profileurs de vent, qui détectent les variations turbulentes de l'indice de réfraction de l'air et s'en servent comme traceurs.

### 4.1.2 Equation radar

L'équation (4-1) est une formulation simple de l'équation radar. Elle montre les facteurs qui contribuent à la puissance de réception, soit la constante radar, la réflectivité de la cible et l'atténuation atmosphérique principalement due aux nuages et à la pluie. Dans cette relation, la cible étant un écho qui fluctue, la réflectivité de la pluie  $\eta$  est une valeur moyenne qui résulte du processus d'intégration temps-espace au sein du volume de détection pendant le temps de tenue:

$$P_r = \frac{P_t \cdot A_e^2 \cdot \lambda^2 \cdot c \cdot \tau \cdot \theta^2 \cdot l_s}{45} \cdot \frac{\eta}{r^2} \cdot \frac{1}{L^2} \quad (4-1)$$

*performance du radar*
*réflectivité de la cible*
*perte de trajet*

où:

- $P_r$ : puissance reçue en retour
- $P_t$ : puissance de sortie de l'émetteur
- $A_e$ : ouverture équivalente de l'antenne
- $l_s$ : pertes du système radar
- $\lambda$ : longueur d'onde
- $c$ : vitesse de la lumière
- $\theta$ : largeur de faisceau d'antenne à 3 dB
- $\tau$ : largeur de l'impulsion
- $\eta$ : réflectivité
- $r$ : distance de la cible
- $L$ : perte de trajet incluant l'atténuation atmosphérique.

L'équation (4-1) peut s'appliquer à une cible répartie si les conditions suivantes sont satisfaites:

- la cible occupe tout le volume de l'impulsion;
- elle se compose de particules sphériques ou de particules apparentées à des sphères;
- la taille des particules satisfait le critère de Rayleigh;
- la constante diélectrique  $|K|^2$  et la distribution en dimension des diffuseurs sont homogènes dans le volume  $V$  considéré;
- le faisceau d'antenne est à peu près gaussien;
- la polarisation du faisceau est linéaire;
- les effets de la diffusion multiple sont négligés.

## 4.2 Les radars météorologiques tournants

### 4.2.1 Applications

Les radars météorologiques servent surtout à détecter les précipitations solides et liquides et, si possible, à mesurer leur intensité et la composante vitesse en direction du radar.

### 4.2.2 Aspects opérationnels de la réflectivité

La réflectivité  $\eta$  de la pluie est liée à la permittivité relative de l'eau  $\epsilon_r$ , au diamètre des gouttes  $D$  et à la longueur d'onde  $\lambda$ . Pour les gouttes de pluie présentes dans le volume  $V$  étudié, la réflectivité peut s'exprimer sous la forme de l'équation (4-2):

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

où  $|K|^2$  a la valeur 0,93 pour l'eau liquide et 0,18 pour la glace.

Le facteur de réflectivité  $Z$ , indépendant de  $\lambda$ , est défini comme suit:

$$Z = \sum_j D_j^6 / V \quad (4-3)$$

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

Donc, pour les gouttes d'eau:

$$\eta = \frac{285 Z}{\lambda^4} \quad (4-4)$$

Note: Cette formule n'est valable que dans le domaine de la diffusion de Rayleigh, soit pour:

$$D \leq \frac{\lambda}{20} \quad (4-5)$$

La réflectivité  $Z$  (en  $\text{dB}_Z$ ) et l'intensité des précipitations,  $R$  (mm/h) sont associées comme suit:

$$Z = a \cdot R^b \quad (4-6)$$

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. Une équation courante, établie par Marshall-Palmer en 1948, repose sur une distribution exponentielle:

$$Z = 200 \cdot R^{1,6} \quad (4-7)$$

où les valeurs  $Z$  et  $R$  sont exprimées respectivement en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  et en mm/h.

### 4.2.3 Les réseaux de radars météorologiques

Le principal inconvénient du radar météorologique est sa portée relativement courte, imputable à la courbure de la terre. Pour compenser cette contrainte, on dispose généralement une série de radars à une distance égale de manière à former des réseaux répartis qui fonctionnent 24 h par jour. Ces réseaux 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.

### 4.2.4 Les radars Doppler

Les radars Doppler, employés depuis plus de 30 ans en recherche atmosphérique pour mesurer la convection dans les orages et pour détecter les fronts de rafale, sont maintenant couramment utilisés en exploitation par la météorologie. Contrairement aux anciens radars, ces appareils sont non seulement capables de déterminer l'existence et la position de cibles réflectrices mais également leur vitesse. 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.



#### 4.2.5 Les radars multiparamètres

La technologie radar polarimétrique permet de déterminer la nature des diffuseurs par télédétection de leur forme. Le radar météorologique polarimétrique a été proposé pour reconnaître les hydrométéores et améliorer 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, phénomène qui augmente avec la taille des gouttes. 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  $\varphi_h - \varphi_v$ , 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 proposé 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.

#### 4.2.6 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 (dues à la végétation qui ondule sous le vent). 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 est assez élevée pour dépasser la fréquence de coupure du filtre.
- Application du filtrage statistique fondé sur les variations de la réflectivité de la pluie et 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 (proposé) pour distinguer la pluie des échos de sol.

#### 4.2.7 Besoins actuels et futurs de spectre

Le choix de la longueur d'onde  $\lambda$  résulte d'un compromis entre la réflectivité, qui varie selon  $\lambda^{-4}$ , et l'atténuation, qui baisse à mesure que  $\lambda$  augmente et devient négligeable aux longueurs d'onde décimétriques. Par exemple, la bande Ka (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 (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 (5,4 cm) est parfois préférée dans les climats tempérés pour détecter la pluie jusqu'à 300 km, mais l'intensité des précipitations ne peut être mesurée efficacement qu'à 100 km environ.

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 ambiguë 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, défini de la façon suivante:

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

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 ( $3 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$ : 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.

Les autres longueurs d'onde discrètes utilisées se trouvent dans les bandes de fréquences généralement employées par les radars de la défense et de surveillance des routes aériennes. Elles peuvent varier légèrement d'un pays à l'autre. Le Tableau 4-1 montre les paramètres importants des radars météorologiques types.

TABLEAU 4-1

**Paramètres d'un système radar**

| Paramètre   | Bande S   | Bande C   | Bande X  | Bande Ka  |
|---|-----------|-----------|----------|-----------|
| Portée associée à la FRI du radar (km)  | 600       | 450       | 200      | 150       |
| Portée maximale de détection = 0 dB <sub>z</sub> , temps clair (km)           | 300       | 300       | 150      | 80        |
| Portée maximale pour une mesure fiable de Z avec une atténuation modérée (km) | 150       | 125       | 100      | 40        |
| Bande UIT (GHz)   | 2,7-2,9   | 5,6-5,65  | 9,3-9,5  | 35,2-36   |
| Principal renvoi au RR  | 5,423     | 5,452     | 5,475    |           |
| Bande occupée maximale (MHz)<br>(entre les zéros de la fonction sin x/x)      | 4         | 4         | 4        | 2         |
| Puissance de crête de l'émetteur: magnétron (kW)                              | 1 000     | 250       | 100      | 100       |
| Puissance de crête de l'émetteur: klystron (kW)                               | 1 200     | 250       | 8        | inutilisé |
| Fréquence de répétition des impulsions: magnétron (Hz)                        | 250-1 200 | 250-1 200 | 1 000    | 1 000     |
| Fréquence de répétition des impulsions: klystron (Hz)                         | 0-4 000   | 0-4 000   | 0-10 000 | inutilisé |
| Durée de l'impulsion: magnétron (µs)  | 0,8-2     | 0,8-2     | 1        | 1         |
| Durée de l'impulsion: klystron (µs)   | 0,5-8     | 0,5-20    | 0,5-30   | inutilisé |

TABLEAU 4-1 (fin)

| Paramètre                                      | Bande S            | Bande C            | Bande X            | Bande Ka  |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| Facteur de charge: magnétron (%)               | $10^{-3}$          | $10^{-3}$          | $10^{-3}$          | $10^{-3}$ |
| Facteur de charge: klystron (%)                | $2 \times 10^{-3}$ | $6 \times 10^{-3}$ | $3 \times 10^{-3}$ | inutilisé |
| Puissance moyenne de l'émetteur: magnétron (W) | 1 000              | 250                | 100                | 100       |
| Puissance moyenne de l'émetteur: klystron (W)  | 2 500              | 1 500              | 240                | inutilisé |
| Diamètre de l'antenne (m)                      | 4-8                | 4                  | 2                  | 1,5       |
| Gain d'antenne du faisceau principal (dBi)     | 39-45              | 44                 | 43                 | 50        |
| Largeur du faisceau -3 dB (degrés)             | 2-1                | 1                  | 1.2                | 0,4       |
| Lobes secondaires (dBc)                        | -25 à -35          | -25 à -35          | -25 à -30          | -25       |

*Note sur le spectre des fréquences d'émission:* si l'impulsion émise est rectangulaire et de largeur  $\tau$ , le spectre présente une dépendance  $\sin x/x$  de  $x = \pi F \tau$  avec les caractéristiques bien connues ci-après:

|  |                 |
|--|-----------------|
| Largeur à demi-puissance:                                | $0,88/\tau$     |
| Premiers zéros à:  | $\pm 1/\tau$    |
| Premiers lobes secondaires à:                            | $\pm 1,43/\tau$ |
| Baisse des niveaux de crête des lobes secondaires selon: | $1/x$ .         |

Si la forme de l'impulsion est à peu près trapézoïdale, avec des temps de montée et de descente  $\Delta t$ , le spectre peut différer de  $\sin x/x$  et les crêtes des lobes secondaires peuvent descendre plus rapidement que  $1/x$  – jusqu'à  $1/x^2$ . Toutefois, pour  $\Delta t < 0.1\tau$ , le spectre est assez semblable à  $\sin x/x$ , sauf pour les lobes secondaires éloignés de la fréquence centrale, qui sont beaucoup plus petits.

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.

#### 4.2.8 Risques de brouillage des radars

Un radar météorologique mesure 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 (dans le cas d'un radar pulsé). 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 Risques de brouillage d'autres systèmes

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. Cela tend à créer une grande portée propice au brouillage des systèmes qui partagent le même canal (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.

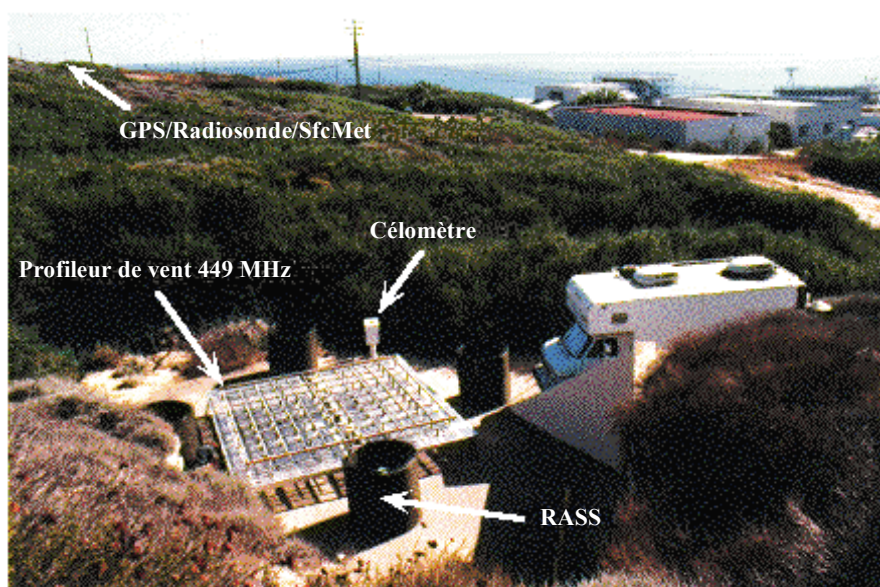
### 4.3 Les radars profileurs de vent

#### 4.3.1 Applications

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. Les besoins des utilisateurs en matière de résolution temporelle et verticale et de couverture de la hauteur influent sur la puissance de fonctionnement, la largeur de bande et la fréquence centrale. La Fig. 4-1 montre une telle installation.

FIGURE 4-1

#### Profileur de vent de la NOAA à Point Loma, Californie, Etats-Unis d'Amérique



Meteo-041

Les profileurs peuvent aussi établir la température de l'air en fonction de la hauteur. Dans cette technique, souvent appelée système de sondage radio-acoustique (RASS, *radar acoustic sounding system*), de grands haut-parleurs situés au niveau de l'antenne émettent des ondes sonores le long du trajet du faisceau radar vertical. On choisit une fréquence sonore qui présente une longueur d'onde acoustique afin de produire de fortes réflexions du signal radar à la fréquence d'utilisation, ce qui permet de suivre l'onde quand elle se propage vers le haut. Comme la vitesse du son dépend de la température de l'air, on peut déduire cette dernière, en fonction de la hauteur au-dessus du sol, en mesurant la vitesse de l'onde acoustique. 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:

$$SNR = \text{const} \frac{\bar{P}_t A_e \Delta_z \lambda^{1/6} t_{obs}^{1/2}}{T_{sys}} \frac{C_n^2}{z^2} \quad (4-9)$$

où:

- $\bar{P}_t$ : puissance moyenne de l'émetteur
- $A_e$ : ouverture équivalente
- $\Delta_z$ : résolution de la hauteur
- $z$ : hauteur
- $\lambda$ : longueur d'onde
- $t_{obs}$ : temps d'observation (intégration)
- $T_{sys}$ : température de bruit du système
- $C_n^2$ : paramètre de la structure.

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 1 500 MHz) le choix de longueur d'onde. 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;
- 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 où la FRI ne cause pas de problème d'ambiguïté de la portée et où 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.

D'autres aspects, plus pratiques, seront examinés au § 4.3.2.

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 à 10-15 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 (4-10):

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

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 m<sup>2</sup>), 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 bandes suivantes sont attribuées à l'échelle internationale pour la radiolocalisation:

- 138-144 MHz dans la Région 2 à titre permis;
- 223-230 MHz dans la Région 3 à titre secondaire;
- 420-430 et 440-450 MHz dans toutes les Régions à titre secondaire;
- 430-440 MHz dans toutes les Régions à titre primaire;
- 890-942 MHz dans toutes les Régions à titre secondaire;
- 1 215-1 300 MHz dans toutes les Régions à titre primaire;
- 1 350-1 400 MHz dans toutes les Régions à titre primaire.

Des radars profileurs de vent fonctionnent actuellement dans tout ce spectre sauf dans la bande 138-144 MHz et aux environs de 404 et de 472 MHz. La Résolution 217 (CMR-97) a pris note:

«... d'une demande adressée à l'UIT par le Secrétaire général de l'OMM, en mai 1989, en vue d'obtenir avis et assistance pour déterminer des fréquences appropriées au voisinage des 50 MHz, 400 MHz et 1 000 MHz, afin de procéder à des attributions et à des assignations pour les radars profileurs de vent» et a décidé;

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

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

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

«...de prier instamment les administrations de mettre en oeuvre les radars profileurs de vent dans la bande 400,15-406 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. 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.

#### **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. La Résolution 217 (CMR-97) assure un choix suffisant de fréquences radioélectriques. Une largeur de bande de 2 MHz ou 3 MHz est nécessaire au voisinage de 400 MHz, de 8 MHz ou 10 MHz au voisinage de 1 000 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. Un réseau exploitant la bande météorologique 400,1-406 MHz, mis en place avant que les nouvelles bandes ne soient disponibles, a perturbé le fonctionnement du système COSPAS-SARSAT dans la bande 406-406,1 MHz. La CMR-97 a ensuite recommandé d'abandonner ces fréquences pour les futurs profileurs. L'administration qui a construit ce système expérimental est en train de mettre au point de nouveaux profileurs utilisables dans une bande approuvée, mais les efforts déployés pour rendre les installations de 400 MHz compatibles ont permis de recueillir un volume considérable d'information sur la compatibilité des profileurs. 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'espace 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. Rappelons que les premiers profileurs fabriqués aux Etats-Unis d'Amérique fonctionnaient à 404,37 MHz, aucune bande adéquate n'étant attribuée à l'époque. Au début, les signaux de ces profileurs à 404 MHz étaient détectés par les récepteurs SARSAT utilisant la bande 406-406,1 MHz, embarqués à bord de satellites sur une orbite de 850 km. Les efforts pour résoudre le problème 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  $41^\circ$  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.

Les Recommandations UIT-R actuelles établissent le spectre à utiliser avec 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.

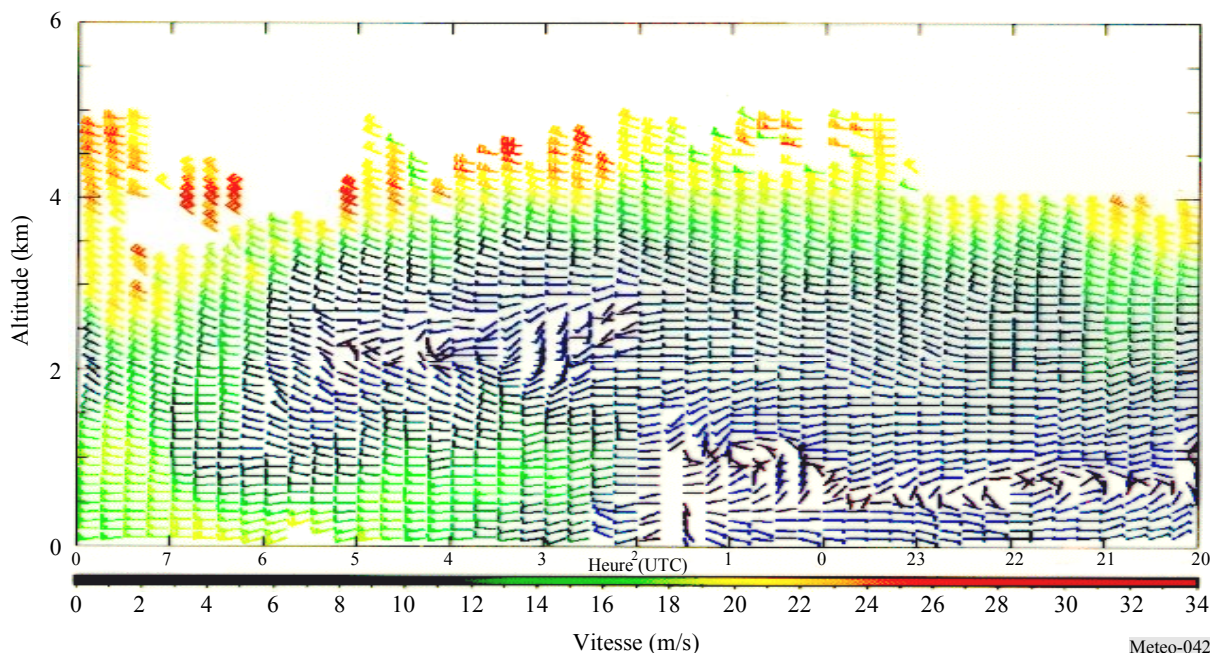
On voit à la Fig. 4-2 un graphique vitesse des vents/altitude produit par un profileur mobile de la NOAA fonctionnant à 924 MHz. L'orientation de chaque barre représente la direction en fonction de l'altitude (axe vertical) et du temps (axe horizontal), la couleur indique la vitesse. La NOAA est en train de mettre au point un profileur qui sera placé à bord d'un navire. Voir <http://www4.etl.noaa.gov/>.

#### **4.3.5 Réseau JMA de profileurs de vent dans la bande de 1,3 GHz**

Le Service météorologique japonais (JMA, *Japan Meteorological Agency*) a récemment mis en place un réseau d'observation en altitude constitué de vingt-cinq profileurs de 1,3 GHz et d'un centre de contrôle pour profileurs (PCC, *profiler control centre*) totalement opérationnel depuis avril 2001. Outre les stations actuelles de radiosondage, le JMA dispose d'un dense réseau aérologique exploité en continu. Les données sur les vents ainsi obtenues servent à la prévision numérique du temps et à la prévision immédiate.

FIGURE 4-2

**Vitesse des vents en fonction de l'altitude**



Les profileurs en bande L (souvent appelés profileurs de la couche limite) mesurent généralement les vents à moins de quelques kilomètres du sol. Les profileurs du JMA peuvent toutefois recueillir des données jusqu'à 5 km avec une résolution verticale de 100-600 m, grâce à la compression des impulsions, à une forte puissance d'émission et à une antenne de grande dimension. Tous les profileurs sont commandés à partir du PCC, situé au siège du JMA à Tokyo. Le Tableau 4-2 donne les principales caractéristiques de ces appareils.

TABLEAU 4-2

**Caractéristiques des profileurs dans la bande de 1,3 GHz**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Séquence de rayonnement (MHz)                | 1 357,5                       |
| Largeur de bande occupée (MHz)               | 10                            |
| Puissance de crête (W)                       | 2 000                         |
| Compression des impulsions (bits)            | 8                             |
| Durée des impulsions (µs)                    | Réglable à 0,67, 1,33, 2 ou 4 |
| Fréquence de répétition des impulsions (kHz) | Réglable à 5, 10, 15 ou 20    |
| Atténuation à 0-10° d'angle d'élévation (dB) | -40                           |

Comme une barrière anti-échos parasites de 2 m de haut atténuée à 40 dB sous le lobe principal le niveau du lobe secondaire, à 0-10° d'angle d'élévation, les stations qui utilisent les bandes de fréquences voisines (comme les radars de surveillance des routes aériennes) sont préservées du brouillage émanant des profileurs. Cela permet d'installer des profileurs même en zone urbaine.

#### 4.3.6 Réseaux de profileurs de vent

Outre les nombreux profileurs établis sur la planète, surtout à titre expérimental, on a construit plusieurs réseaux complets caractérisés par des mécanismes de partage des données, dont:

- Le réseau américain décrit au § 4.2.4, le premier au monde, qui est en train d'être agrandi et de passer à 449 MHz.
- Le réseau japonais qui fonctionne à 1 357,5 MHz, décrit au § 4.2.5.
- Quatre profileurs australiens dans la gamme 45-56 MHz, la bande 54-56 MHz étant préférable pour les nouvelles installations. Quatre autres profileurs fonctionnent au voisinage de 920 MHz et deux dans la bande 1 270-1 295 MHz, ce qui est préférable pour les nouveaux appareils. Le nombre de systèmes devrait croître lentement dans les cinq prochaines années.
- En Europe, plusieurs administrations exploitent des profileurs dans diverses bandes avec partage continu des données:
  - Autriche: 1 290 MHz (3)
  - France: 45 MHz (1), 52,05 MHz (1), 1 290 MHz (1)
  - Allemagne: 482 MHz (1), 1 290 MHz (2)
  - Pays-Bas: 1 290 MHz (1)
  - Suède: 52 MHz (1)
  - Suisse: 1 290 MHz (1)
  - Royaume-Uni: 6,5 MHz (1), 915 MHz (2), 1 290 MHz (2).

Plusieurs pays exploitent aussi des profileurs pendant des périodes d'essai afin de fournir des données au réseau lorsqu'il est en service.

#### Références

GOSSARD, E. E. et STRAUCH, R. G. [1983] *Radar Observation of Clear Air and Clouds*, Elsevier, New-York, Etats-Unis d'Amérique. 280 pages.

## Bibliographie

- COST Action 76 [mars 2000] Development of VHF/UHF wind profilers and vertical sounders for use in European observing systems, Rapport final sous la direction de J. Dibbern, W. Monna, J. Nash et G. Peters, Commission européenne, DG Science, Recherche et développement.
- DOVIAK, R. J. et ZRNIC, D. S. [1993] Doppler radar and weather observations, Academic Press, Inc., San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- LAW, D. *et. al.* [mars 1994] Measurements of Wind Profiler EMC Characteristics, Rapport NTIA 93-301, 63 pages. National Telecommunications and Information Administration.
- MAMMEN, T. [1998] Weather radars used by members, WMO instruments and observing methods, Rapport No. 69.
- SESSIONS, W. B. [décembre 1995] SARSAT SARP instrument performance when receiving emissions from NOAA 404 MHz wind profiler radars, NOAA, NESDIS, E/SP3, 87 pages.
- SKOLNIK, M. [1990] *Radar Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., New-York, Etats-Unis d'Amérique.
- OMM [1996] Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, OMM-N° 8, Organization météorologique mondiale.

## CHAPITRE 5

### LE SERVICE D'EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE POUR LES ACTIVITÉS MÉTÉOROLOGIQUES

|   | Page |
|---|------|
| 5 Introduction .....  | 50   |
| 5.1 La radiométrie passive à hyperfréquences .....  | 51   |
| 5.1.1 Capacités générales .....   | 51   |
| 5.1.2 Besoins de spectre .....  | 52   |
| 5.1.3 Caractéristiques techniques .....   | 54   |
| 5.1.3.1 Sensibilité radiométrique .....   | 54   |
| 5.1.3.2 Seuil $\Delta P$ du radiomètre .....  | 56   |
| 5.1.3.3 Résolution géométrique .....  | 56   |
| 5.1.3.4 Temps d'intégration .....   | 56   |
| 5.1.4 Conditions d'exploitation types des capteurs passifs .....                          | 56   |
| 5.1.4.1 Satellites en basse orbite .....  | 56   |
| 5.1.4.2 Satellites géostationnaires .....   | 56   |
| 5.1.5 Observation des paramètres à la surface de la Terre .....                           | 56   |
| 5.1.5.1 Mesures sur les surfaces océaniques .....   | 57   |
| 5.1.5.2 Mesures sur les terres émergées .....   | 58   |
| 5.1.5.3 Paramètres auxiliaires pour d'autres instruments de télédétection .....           | 59   |
| 5.1.6 Principales caractéristiques techniques .....                                       | 59   |
| 5.1.7 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage .....                        | 60   |
| 5.1.8 Mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques .....                      | 61   |
| 5.1.8.1 Sondeurs atmosphériques verticaux passifs à hyperfréquences .....                 | 61   |
| 5.1.8.2 Mécanisme des sondages atmosphériques verticaux .....                             | 61   |
| 5.1.8.3 Applications des sondages atmosphériques verticaux .....                          | 64   |
| 5.1.8.4 Caractéristiques des capteurs passifs à visée du nadir au voisinage de 60 GHz ... | 66   |
| 5.1.8.5 Limbosondeurs passifs hyperfréquences .....                                       | 67   |
| 5.2 Les capteurs actifs .....   | 72   |
| 5.2.1 Introduction .....  | 72   |
| 5.2.2 Radars à ouverture synthétique .....  | 73   |
| 5.2.3 Altimètres .....  | 75   |
| 5.2.4 Diffusiomètres .....  | 75   |
| 5.2.5 Radars de précipitations .....  | 79   |
| 5.2.6 Radars de profil des nuages .....   | 79   |
| 5.2.7 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs .....           | 81   |
| 5.2.8 Niveaux de brouillage .....   | 82   |
| 5.2.9 Etudes de compatibilité .....   | 83   |
| 5.2.10 Fréquences attribuées .....  | 84   |

## 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 photographies 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 mesurés essentiellement 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». Certains sont par conséquent surpris d'apprendre que les systèmes de télédétection par satellite font appel à des fréquences effectivement radioélectriques, des ondes métriques aux hyperfréquences jusqu'aux régions supérieures du spectre. Il existe en fait une télédétection passive et une télédétection active.

Dans la **télédétection passive**, on n'emploie que des récepteurs, sans émetteur. Le rayonnement ciblé par ces récepteurs est d'origine naturelle. 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. 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 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. Ses applications vont de la mesure des caractéristiques de la surface de la mer 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 réception, en particulier ceux qui ont une large empreinte, présentent une sensibilité particulière parce qu'ils sont soumis à une accumulation de rayonnement produit par une multitude d'émetteurs au sol. Si un seul émetteur de Terre ne risque pas de causer de brouillage, l'effet conjugué d'un grand nombre d'entre eux peut être nocif. C'est ce qui soulève les préoccupations actuelles concernant les émissions du service fixe à haute densité (SFHD). Le problème vient de la densité spatiale des émetteurs SFHD, et non de leurs caractéristiques individuelles.

Dans le cas de la télédétection passive, le problème n'existe que dans un sens: le satellite est incapable de provoquer du brouillage car il n'a pas d'émetteur. Sa vulnérabilité est attribuable à la nature indéterminée du signal qu'il doit recevoir. 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.

Malheureusement, tout le savoir accumulé sur la correction des erreurs est inutile quand on ne connaît pas les caractéristiques des divers signaux reçus, ce qui est précisément le cas dans la télédétection passive. 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. Des vies humaines dépendent de la validité de ces conclusions quand il s'agit de météorologie. Etant donné que les erreurs ne peuvent être ni détectées ni corrigées dans les systèmes passifs, l'intégrité des données repose sur la prévention du brouillage. L'imposition de strictes restrictions en matière de brouillage est la seule solution; les limites fixées dans ces restrictions sont analysées actuellement.

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, avec les progrès récents dans la technologie des radars de même type. 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 plates-formes spatiales.

## **5.1 La radiométrie passive à hyperfréquences**

### **5.1.1 Capacités générales**

La radiométrie passive à hyperfréquences est fondamentale pour le SETS. Celui-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, par exemple).

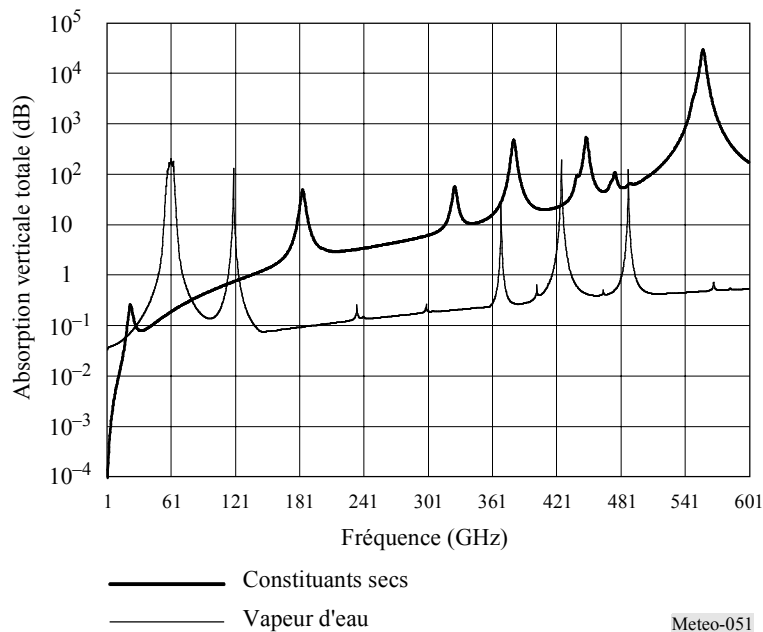
Les techniques à hyperfréquences permettent d'observer la surface de la Terre et l'atmosphère à partir d'une orbite spatiale, même en présence de nuages car ces derniers sont presque transparents à moins de 100 GHz. Cela présente un intérêt considérable pour le SETS car plus de 60 % du globe est recouvert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

### 5.1.2 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, les largeurs de bande nécessaires et les largeurs de bande attribuées 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.

Le Tableau 5-2 montre l'occupation spectrale, jusqu'à 200 GHz, des principaux capteurs passifs à hyperfréquences et à visée du nadir. Soulignons que conformément à la révision du Tableau d'attribution des bandes de fréquences du Règlement, un certain nombre de fréquences actuellement utilisées par certains capteurs seront abandonnées à la fin de la durée de vie de ceux-ci.



TABLEAU 5-1

**Bandes et largeurs de bande employées en télédétection passive par satellite\***

| <b>Fréquences (GHz)</b> | <b>Largeur de bande nécessaire ou attribuée (MHz)</b> | <b>Principales mesures</b>  |
|-------------------------|---|---|
| 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   | 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   | 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 <sub>2</sub> (profils de la température)  |
| 52,6-59,3               | 6 700 <sup>(1)</sup>                                  | O <sub>2</sub> (profils de la température)  |
| 86-92                   | 6 000   | Nuages, glace, neige, pluie   |
| 100-102                 | 2 000   | N <sub>2</sub> O  |
| 109,5-111,8             | 2 300   | O <sub>3</sub>  |
| 114,25-122,25           | 8 000 <sup>(1)</sup>                                  | O <sub>2</sub> (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 1er janvier 2018 en vertu du numéro 5.562F du RR)            |
| 164-167                 | 3 000   | Canal fenêtre   |
| 174,8-191,8             | 17 000 <sup>(1)</sup>                                 | H <sub>2</sub> O (profils de l'humidité), N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub>                                |
| 200-209                 | 9 000 <sup>(2)</sup>                                  | H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O   |
| 226-232                 | 6 000 <sup>(2)</sup>                                  | Nuages, CO  |
| 235-238                 | 3 000 <sup>(2)</sup>                                  | O <sub>3</sub>  |
| 250-252                 | 2 000 <sup>(2)</sup>                                  | N <sub>2</sub> O  |
| 275-277 <sup>(3)</sup>  | 2 000 <sup>(2)</sup>                                  | N <sub>2</sub> O  |
| 294-306 <sup>(3)</sup>  | 12 000 <sup>(2)</sup>                                 | N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , HOCl                               |
| 316-334 <sup>(3)</sup>  | 10 000 <sup>(2)</sup>                                 | Profils de la vapeur d'eau, O <sub>3</sub> , HOCl   |
| 342-349 <sup>(3)</sup>  | 7 000 <sup>(2)</sup>                                  | CO, HNO <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> Cl, O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , HOCl, H <sub>2</sub> O       |

TABLEAU 5-1 (*fin*)

| Fréquences (GHz)       | Largeur de bande nécessaire ou attribuée (MHz) | Principales mesures   |
|------------------------|--|---|
| 363-365 <sup>(3)</sup> | 2 000 <sup>(2)</sup>                           | O <sub>3</sub>  |
| 371-389 <sup>(3)</sup> | 18 000 <sup>(2)</sup>                          | Profils de la vapeur d'eau  |
| 416-434 <sup>(3)</sup> | 18 000 <sup>(2)</sup>                          | Profils de la température   |
| 442-444 <sup>(3)</sup> | 2 000 <sup>(2)</sup>                           | Vapeur d'eau  |
| 486-506 <sup>(3)</sup> | 9 000 <sup>(2)</sup>                           | O <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> Cl, N <sub>2</sub> O, BrO, ClO   |
| 546-568 <sup>(3)</sup> | 22 000 <sup>(2)</sup>                          | Profils de la température   |
| 624-629 <sup>(3)</sup> | 5 000 <sup>(2)</sup>                           | BrO, O <sub>3</sub> , HCl, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , HOCl, HNO <sub>3</sub>                         |
| 634-654 <sup>(3)</sup> | 20 000 <sup>(2)</sup>                          | CH <sub>3</sub> Cl, HOCl, ClO, H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> O, BrO, O <sub>3</sub> , HO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> |
| 659-661 <sup>(3)</sup> | 2 000 <sup>(2)</sup>                           | BrO   |
| 684-692 <sup>(3)</sup> | 8 000 <sup>(2)</sup>                           | ClO, CO, CH <sub>3</sub> Cl   |
| 730-732 <sup>(3)</sup> | 2 000 <sup>(2)</sup>                           | O <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>   |
| 851-853 <sup>(3)</sup> | 2 000 <sup>(2)</sup>                           | NO  |
| 951-956 <sup>(3)</sup> | 5 000 <sup>(2)</sup>                           | O <sub>2</sub> , NO, H <sub>2</sub> O   |

\* Pour la mise à jour de ce Tableau, se reporter à la Recommandation UIT-R SA.515.

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

(2) Cette largeur de bande est occupée par des capteurs multiples.

(3) Numéro 5.565 du RR.

### 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,  $\Delta T_e$ , que le capteur est capable de détecter.  $\Delta T_e$  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)

$\tau$ : temps d'intégration (s)

$\alpha$ : constante du système récepteur (varie selon la configuration)

$T_s$ : température de bruit du système récepteur (K).

TABLEAU 5-2

Fréquences centrales ou nombre de canaux utilisés par les principaux capteurs passifs à hyperfréquences

| Nom                     | Portos   | IRIS    | MIRAS   | MIMR      | AMSR      | AMSR-E   | SMMR      | SSM/I   | SSM/T          | SSM/S           | TMI     | MIVZA     | MZOAS     | MTVZ<br>A       | MHS             | AMSU-<br>A/B    | MWRS   | MWRI          |   |
|-------------------------|--|---------|---------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|----------------|-----------------|---------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|---------------|---|
| Antenne de mission (cm) | Aérop.   | Aérop.  | Aérop.  | METOP 150 | ADEOS 200 | Aqua 160 | NIMBUS 80 | DMSP 65 | DMSP 60        | DMSP 65         | TRMM 65 | Meteor 40 | Meteor 80 | Meteor 20       | NOAA / METOP 20 | 20              |        | FY-3          |   |
| Balayage                | s.o.   | Interf. | Interf. | Conique   | Conique   | Conique  | Conique   | Conique | Croisé         | Conique         | Conique | Conique   | Conique   | Conique         | Croisé          | Croisé          |        |               |   |
| <b>Fréq. (GHz)</b>      | Fréquences centrales (lorsqu'un nombre de canaux est indiqué, la polarisation est double, tandis que les canaux marqués d'un astérisque n'ont que la polarisation verticale) |         |         |           |           |          |           |         |                |                 |         |           |           |                 |                 |                 |        |               |   |
| 1,37-1,4:               | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 1,4-1,427:              | 1,41   | -       | 1,40    | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 2,69-2,7:               | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 4,2-4,4:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 4,99-5,0:               | 5,05   | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 6,425-7,25:             | -  | 6,50    | -       | 6,80      | 6,93      | 6,925    | 6,60      | -       | -              | -               | -       | -         | 6,20      | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 10,6-10,68:             | 10,65  | -       | -       | 10,65     | 10,65     | 10,65    | -         | -       | -              | -               | 10,65   | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 10,68-10,7:             | -  | -       | -       | -         | -         | -        | 10,69     | -       | -              | -               | -       | -         | 10,80     | -               | -               | -               | 10,65  | -             | - |
| 15,2-15,35:             | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 15,35-15,4:             | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 18,6-18,8:              | -  | -       | -       | 18,70     | 18,70     | 18,70    | 18,00     | 19,35   | -              | 19,35           | 19,35   | -         | -         | -               | -               | -               | 18,70  | -             | - |
| 21,2-21,4:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | 21,00     | -       | -              | 21,30           | 20,00   | 20,00     | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 22,21-22,5:             | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | 22,24   | -              | 22,24           | -       | -         | 22,20     | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 23,6-24,0:              | 23,80  | -       | -       | 23,80     | 23,80     | 23,80    | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | 23,80           | 23,80  | 23,9          | - |
| 31,3-31,5:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | 31,4            | -      | 31,40         | - |
| 31,5-31,8:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 36,0-37,0:              | 36,50  | -       | -       | 36,50     | 36,50     | 36,50    | 37,00     | 37,00   | -              | 37,00           | 37,00   | 35,00     | 35,00     | -               | -               | -               | 36,50  | -             | - |
| 50,2-50,4:              | -  | -       | -       | -         | 50,30 *   | -        | -         | -       | 50,50          | 50,30           | -       | -         | -         | -               | -               | 50,30           | -      | 50,31         | - |
| 51,4-54,25:             | -  | -       | -       | -         | 52,80 *   | -        | -         | -       | 53,20          | 2 can.          | -       | -         | -         | 3 can. et sous  | -               | 3 can. et sous  | -      | 53,74         | - |
| 54,25-58,2:             | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | 2 can.         | 3 can. et sous  | -       | -         | -         | 12 can. et sous | -               | 22 can. et sous | -      | 54,96 & 57,95 | - |
| 58,2-59,0:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | 2 can.         | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 59,0-64,0:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | 59,40          | 21 can. et sous | -       | -         | -         | -               | -               | 12 can. et sous | -      | -             | - |
| 64,0-65,0:              | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 86,0-92,0:              | 90,00  | -       | -       | 89,00     | 89,00     | 89,00    | -         | 85,50   | 90,00          | 91,66           | 85,50   | 94,00     | 94,00     | -               | 89              | 89,00           | 89,00  | 89,00         | - |
| 100-102:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 105-116:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 116-126:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 150-151:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | 150,00         | 150,00          | -       | -         | -         | -               | -               | 150,00          | 150,00 | -             | - |
| 156-158:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | 157             | -               | -      | -             | - |
| 164-168:                | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | -              | -               | -       | -         | -         | -               | -               | -               | -      | -             | - |
| 174,8-194,8:            | -  | -       | -       | -         | -         | -        | -         | -       | 6 can. et sous | 6 can. et sous  | -       | -         | -         | -               | 6 can. et sous  | 6 can. et sous  | -      | -             | - |

### 5.1.3.2 Seuil $\Delta P$ du radiomètre

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

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

où:

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

$\Delta P$  est calculé en utilisant  $\Delta T_e$ . A l'avenir,  $T_s$  diminuera ainsi que  $\Delta T_e$  (voir l'équation (5-1)). Il faut donc calculer  $\Delta P$  en se basant sur une valeur  $\Delta T_e$  raisonnable et non sur le  $\Delta T_e$  de la technologie actuelle. De même,  $\tau$  augmentera (concept de la barrette de détecteurs).  $\tau$  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 (voir le § 5.1.4), on considère généralement que l'ouverture  $-3\text{dB}$  de l'antenne détermine la résolution transversale. Dans le cas de mesures tridimensionnelles des paramètres atmosphériques (voir le § 5.1.5), 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

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 passifs du SETS 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 servent à recueillir des données haute résolution sur l'environnement du globe. La mécanique orbitale 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, 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 ou moins.

## 5.1.5 Observation des paramètres à la surface de la Terre

Pour mesurer les paramètres de surface, 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

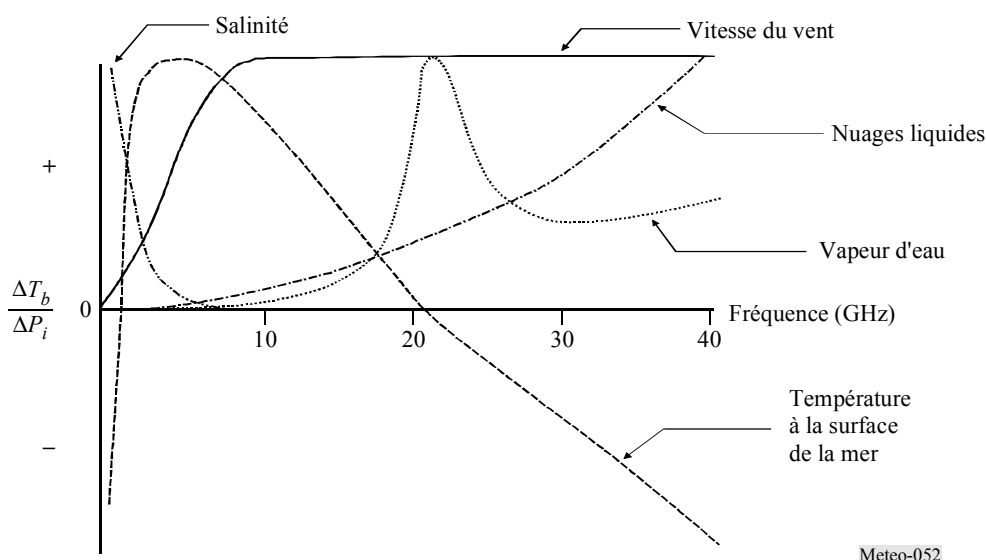
précisément les fréquences car les émissions naturelles de ces paramètres ne sont pas fortement dépendantes des fréquences. Plusieurs paramètres géophysiques contribuent habituellement, à divers niveaux, aux émissions qui peuvent être observées à une fréquence donnée. On le voit dans les Fig. 5-2 à 5-4, qui présentent la sensibilité des émissions naturelles hyperfréquences à divers paramètres géophysiques, selon la fréquence.

### 5.1.5.1 Mesures sur les surfaces océaniques

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

FIGURE 5-2

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



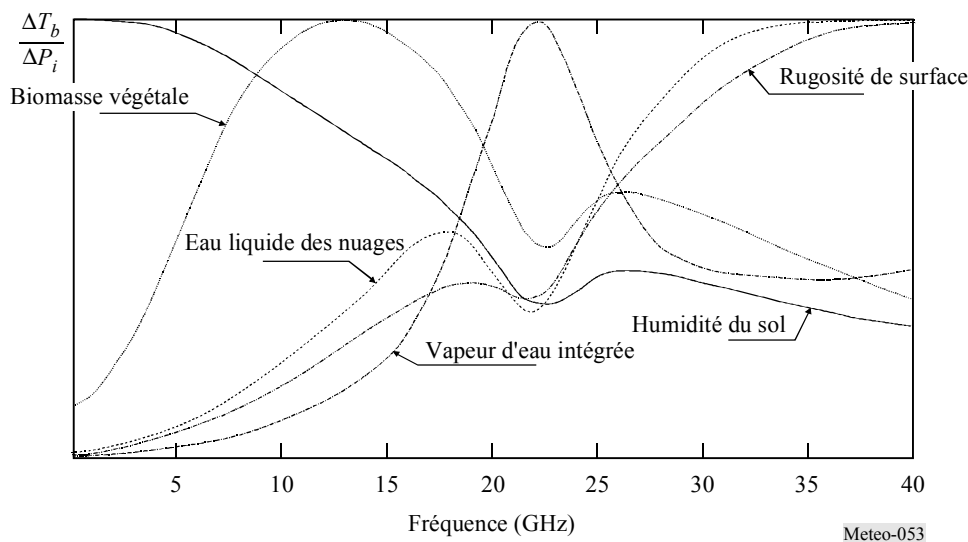
- les mesures à basse fréquence, aux environs de 1,4 GHz, servent à établir la salinité de l'océan;
- les mesures avoisinant 6 GHz présentent la plus grande sensibilité à la température de surface de la mer, mais contiennent un léger apport dû à la salinité et à la vitesse du vent que l'on peut éliminer 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 23 GHz, les nuages liquides au voisinage de 36 GHz;
- cinq fréquences (proches de 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 23 GHz et 36 GHz) sont nécessaires pour déterminer les paramètres dominants.

### 5.1.5.2 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 radiomètre 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. 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, 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. Ces facteurs ont un effet 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.

FIGURE 5-3

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



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 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.

### **5.1.5.3 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. 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, 23 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.

### **5.1.6 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 centrée aux alentours de la direction du nadir. 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.

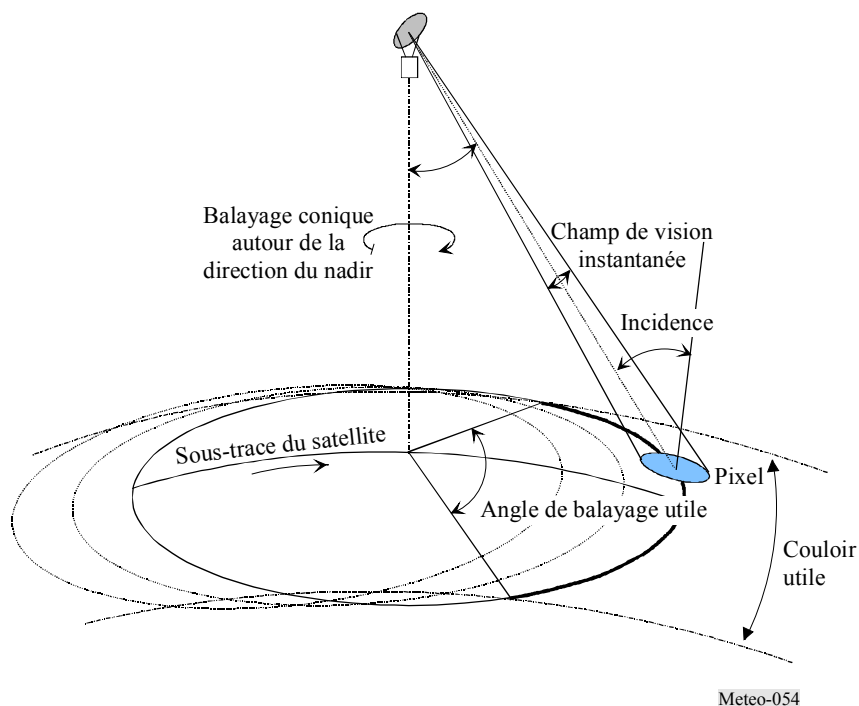
Voici les caractéristiques géométriques types (pour une altitude de 803 km):

- angle d'incidence au sol d'environ 55°
- angle demi-conique de 46,7° par rapport à la direction du nadir;
- couloir utile: 1 600 km (limité par la configuration de balayage), permettant à un instrument d'effectuer deux couvertures complètes par jour, à moyenne et haute latitude;
- taille du pixel variant selon la fréquence et la dimension du réflecteur, généralement entre 50 km à 6,9 GHz et 5 km à 89 GHz pour l'appareil AMSR de la NASDA (réflecteur 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.

FIGURE 5-4

**Géométrie type des radiomètres passifs en hyperfréquence à balayage conique**



**5.1.7 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage**

Le Tableau 5-3 récapitule les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage établis pour les mesures de surface, à partir des Recommandations UIT-R SA.1028 – Critères de qualité de fonctionnement pour la télédétection passive par satellite et UIT-R SA.1029 – Critères de brouillage applicables à la télédétection passive par satellite.

TABLEAU 5-3

**Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage pour les mesures de surface**

| Fréquence (GHz) | Brouillage acceptable (dBW) | Largeur de bande de référence (MHz) | $\Delta T_e$ requis (K) |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Proche de 1,4   | -171                        | 27                                  | 0,1                     |
| Proche de 2,7   | -174                        | 10                                  | 0,1                     |
| Proche de 4     | -161                        | 100                                 | 0,3                     |
| Proche de 6     | -164                        | 100                                 | 0,3                     |
| Proche de 11    | -163                        | 20                                  | 1,0                     |
| Proche de 15    | -166                        | 50                                  | 0,2                     |
| Proche de 18    | -155                        | 100                                 | 1,0                     |
| Proche de 21    | -163                        | 100                                 | 0,2                     |
| 22,235          | -160                        | 100                                 | 0,4                     |
| Proche de 24    | -163                        | 100                                 | 0,2                     |
| Proche de 31    | -163                        | 100                                 | 0,2                     |
| Proche de 37    | -156                        | 100                                 | 1,0                     |
| Proche de 90    | -153                        | 200                                 | 1,0                     |



### 5.1.8 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 le SETS sous 200 GHz.

Un gaz absorbant à une longueur d'onde  $\lambda$  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 loi de Kirchoff qui se formule ainsi:

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

où:

$I$ : la luminance spectrale du gaz à la température  $T$

$L = 2 \cdot k \cdot T/\lambda^2$ : 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)

$\alpha$ : caractérise le gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_3$ , etc.).

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

On effectue également des mesures radiométriques, dans les bandes d'absorption précises, d'autres gaz atmosphériques importants sur le plan 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.

#### 5.1.8.1 Sondes atmosphériques verticaux passifs à hyperfréquences

Les sondes atmosphériques verticales 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. 5-5 à 5-7. La Fig. 5-5 montre également la position et l'état des fréquences attribuées, dont a besoin le SETS (passif) dans la bande 50-71 GHz, qui résultent des études de partage et de la CMR-97. Soulignons la très grande variabilité du spectre d'absorption de la vapeur d'eau aux environs de 183 GHz, en fonction de la zone climatique et des conditions météorologiques locales.

#### 5.1.8.2 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.

FIGURE 5-5

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

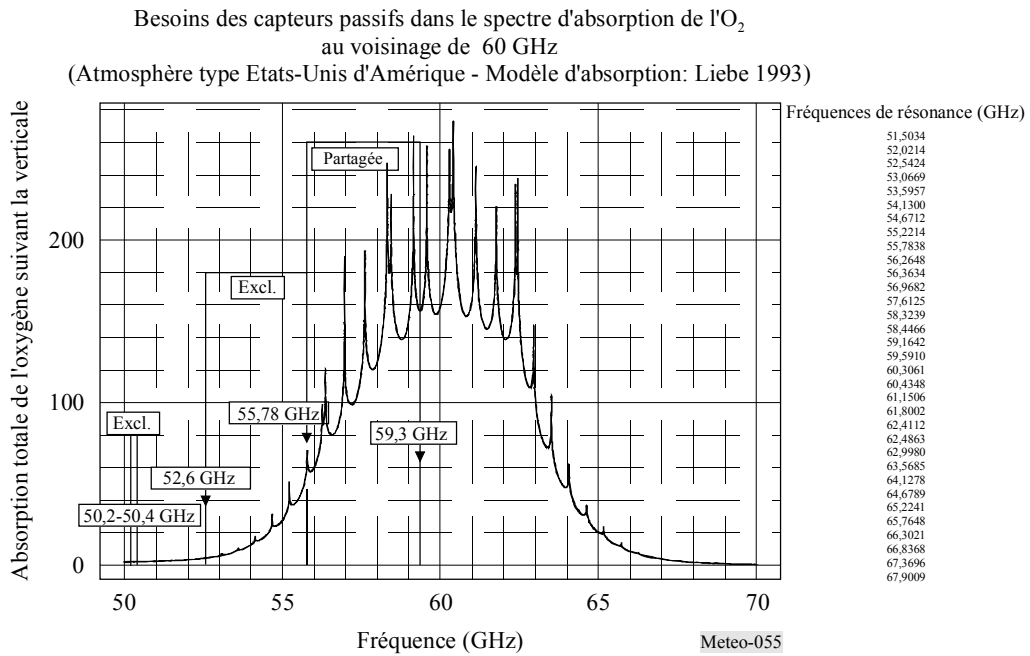


FIGURE 5-6

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

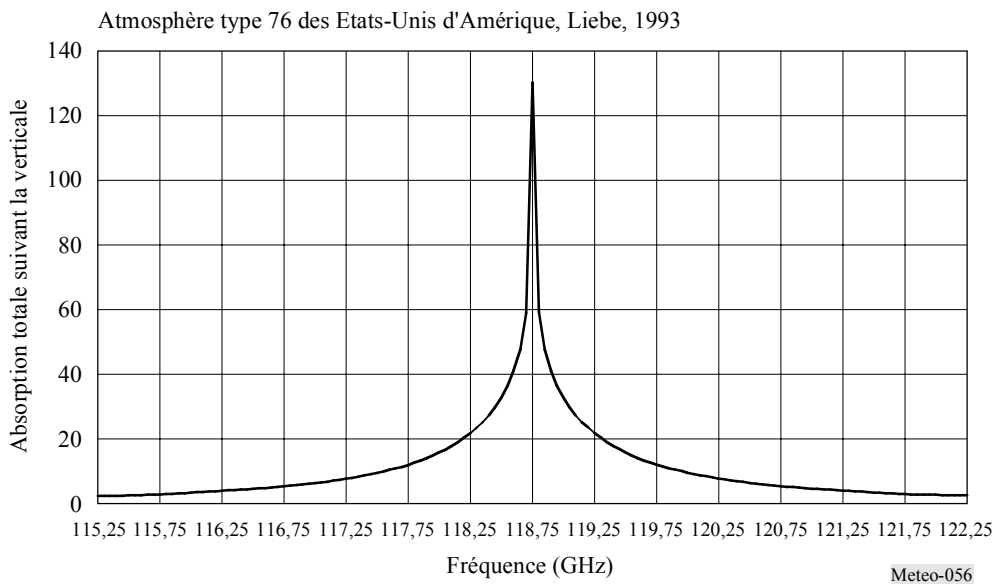
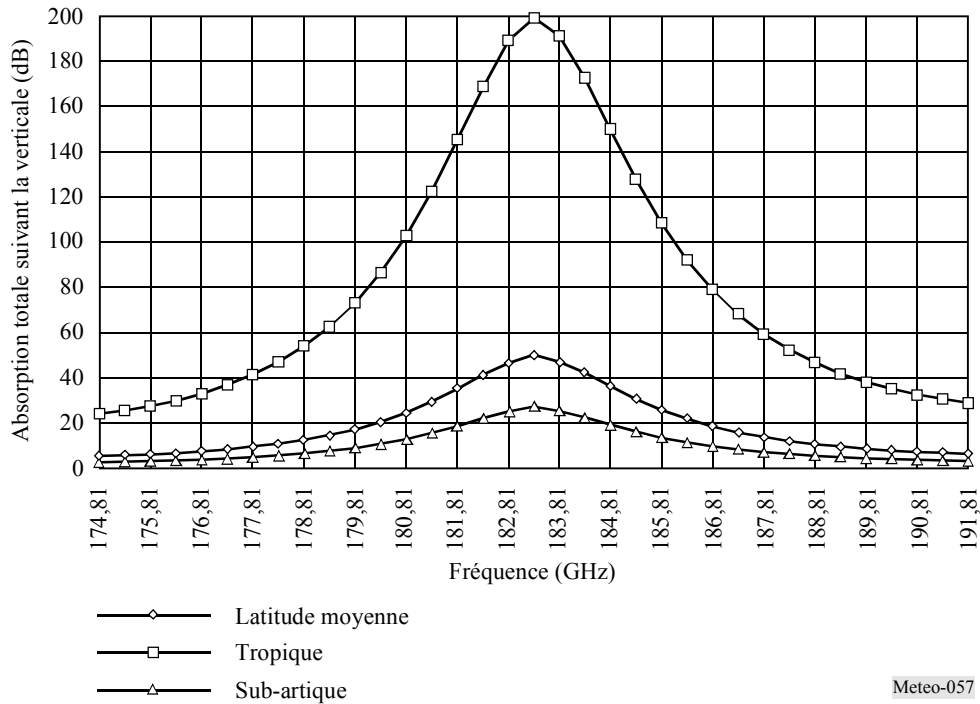


FIGURE 5-7

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



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. 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. 5-8 donne les fonctions de pondération types pour un sondeur de température à hyperfréquences qui fonctionne dans la bande de 60 GHz.

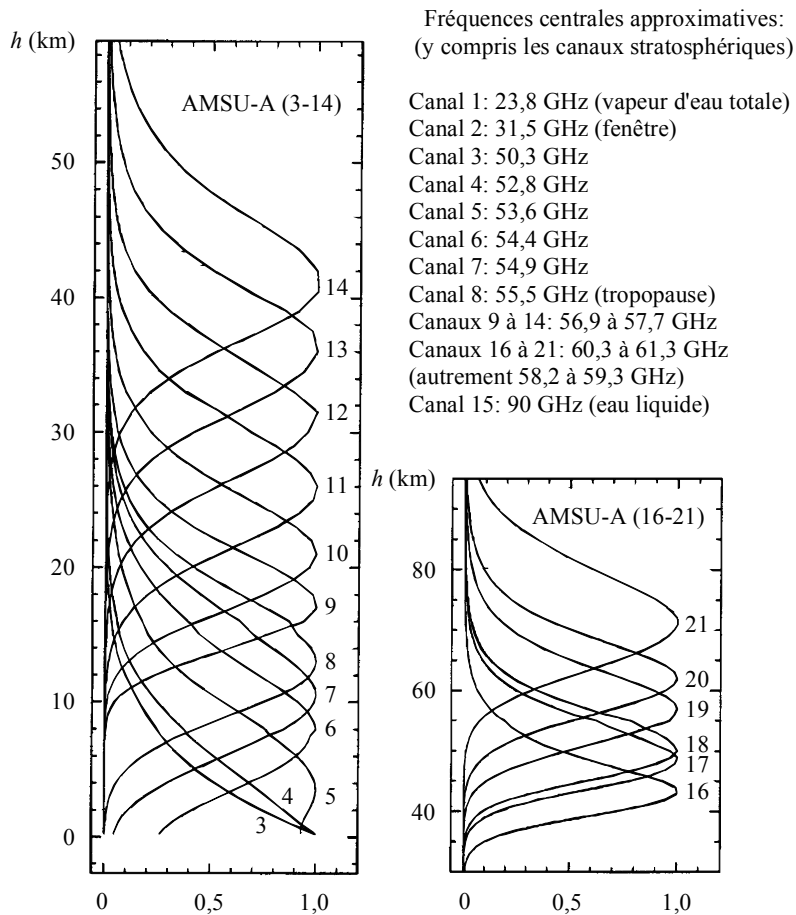
Soulignons l'importance particulière des Canaux 1 (23,8 GHz), 2 (31,5 GHz) et 15 (90 GHz). Il s'agit de canaux auxiliaires qui jouent un rôle prépondérant dans la récupération des mesures effectuées dans le spectre d'absorption de l'oxygène. Ils doivent présenter des performances géométriques et radiométriques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

- 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.

FIGURE 5-8

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



Meteo-058

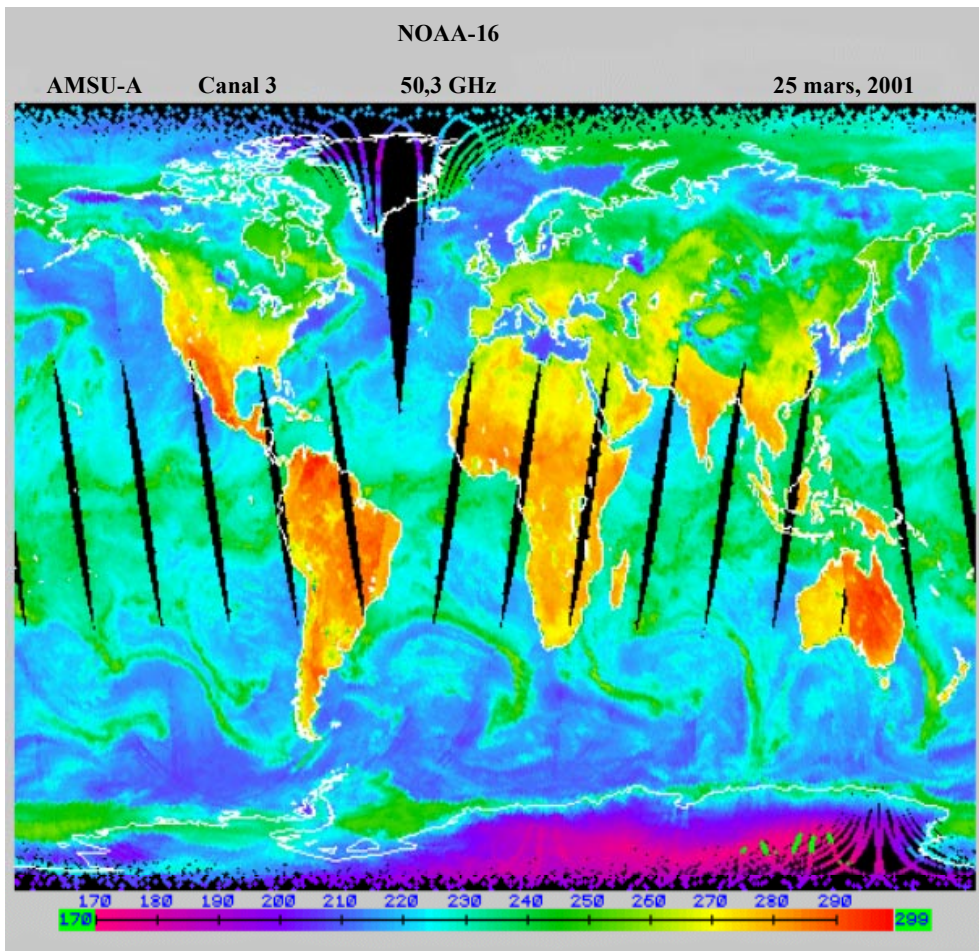
**5.1.8.3 Applications des sondages atmosphériques verticaux**

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 aux Etats-Unis d'Amérique, en Europe, en Chine, en Australie, au Brésil, etc. 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. 5-9 montre l'image composite mondiale des mesures de la température de luminance (K) provenant du canal 3 AMSU-A, produites à l'intérieur d'une fenêtre temporelle d'une douzaine d'heures. Les observations de ce canal 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. 5-8).

FIGURE 5-9

**Image composite mondiale des mesures de la température de luminance (K) provenant du canal 3 AMSU-A**



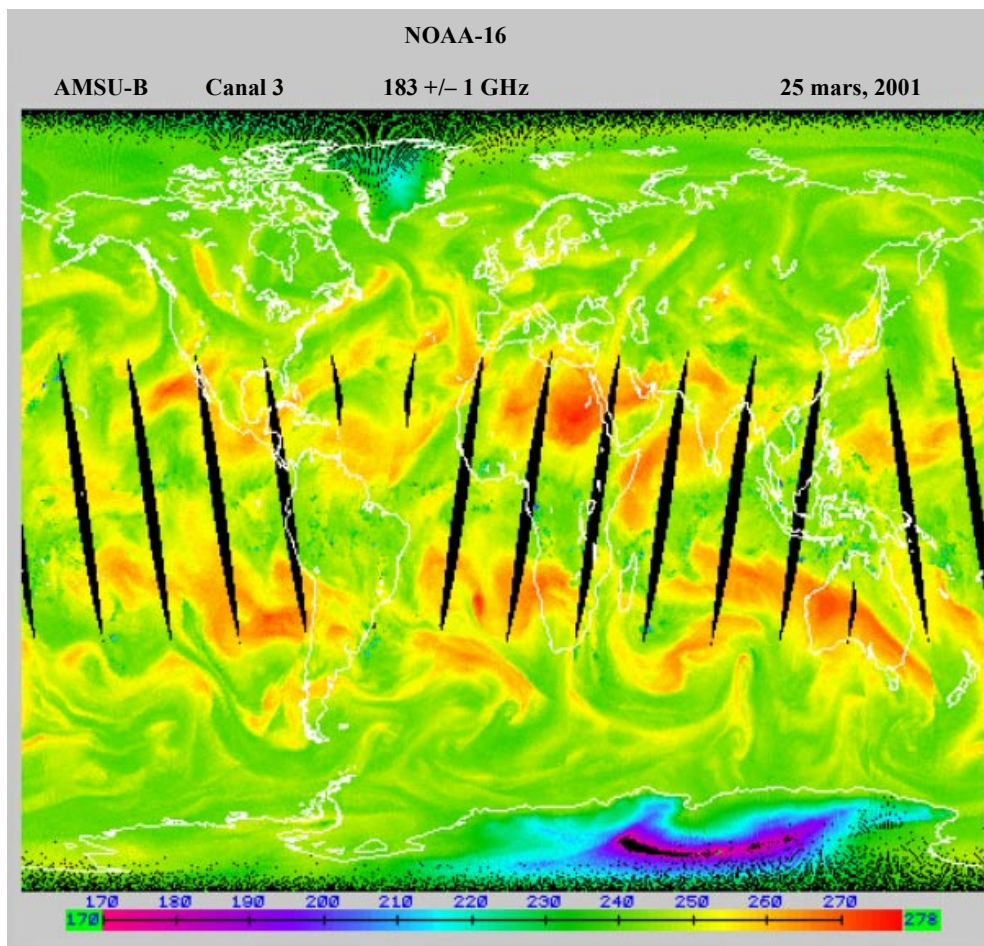
Meteo-059

On voit, à la Fig. 5-10, l'image composite mondiale des mesures de la température de luminance (K) provenant du canal 3 AMSU-B, produites à l'intérieur d'une fenêtre temporelle d'une douzaine d'heures. AMSU-B est un radiomètre qui fonctionne en association avec AMSU-A afin d'améliorer la détection de la vapeur d'eau troposphérique. A 183 GHz, le radiomètre observe de hautes températures (orange/rouge) dans les tropiques et les latitudes moyennes lorsque les parties supérieures de la troposphère sont sèches et que le capteur scrute plus près de la surface, et de basses températures de luminance (vert) lorsque l'humidité est élevée et que le rayonnement provient de couches plus hautes.

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

FIGURE 5-10

**Image composite mondiale des mesures de la température de luminance (K)  
provenant du canal 3 AMSU-B**



Meteo-0510

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 ou moins.

#### **5.1.8.4 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 5-4.

TABLE 5-4

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

| <b>Caractéristiques</b>         | <b>Balayage mécanique (actuel)</b> | <b>Balayage barrette de détecteurs (futur)</b> |
|---------------------------------|------------------------------------|--|
| 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   |

**5.1.8.5 Limbosondeurs passifs hyperfréquences**

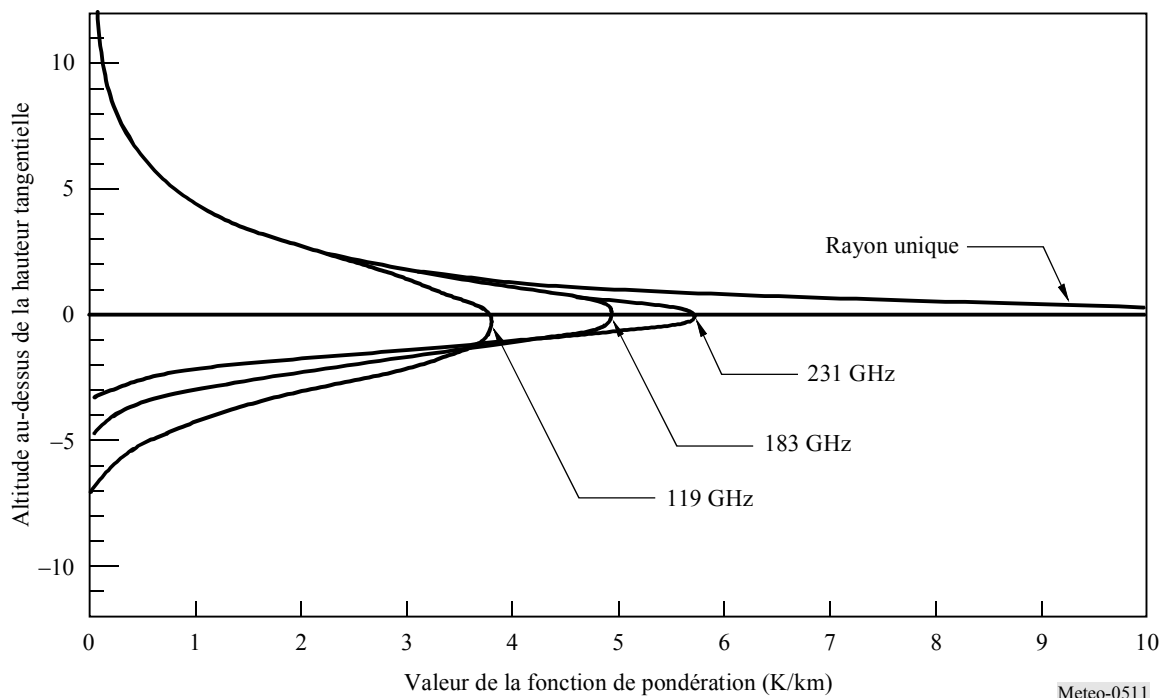
Les limbosondeurs hyperfréquences (MLS, *microwave limb sounders*), qui observent l'atmosphère tangentiellement à ses couches, servent à étudier les régions basses à supérieures de l'atmosphère, là où des activités photochimiques intenses peuvent avoir un fort impact sur le climat terrestre. Les mesures 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. 5-11;
- 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 inter-satellite.



FIGURE 5-11

**Fonctions de pondération verticales des MLS  
(antenne de 1,6 m limitée par la diffraction, 600 km d'altitude)**



**5.1.8.5.1 MLS-satellite de recherche en haute atmosphère (UARS, *upper atmosphere research satellite*)**

Les limbo-sondeurs hyperfréquences (MLS UARS), lancés en 1991 par le Laboratoire de recherche sur la propulsion (JPL) de la NASA, 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. 5-11);
- 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 5-5).

**5.1.8.5.2 Nouvelle génération de MLS (EOS-B)**

Les MLS les plus récents (EOS-B) mesurent la température et les concentrations de H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, ClO, BrO, HCl, OH, HO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCN et N<sub>2</sub>O 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 H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, 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.



TABLEAU 5-5

**Objectifs de mesure des MLS et régions spectrales**

| Paramètre géophysique         | Région spectrale (GHz) | Altitude (km) | Bruit quadratique moyen (intervalle) |
|-------------------------------|------------------------|---------------|--------------------------------------|
| Pression atmosphérique        | 63                     | 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 <sub>2</sub>                |                        | 80-120        | $3 \times 10^{-3}$ v/v (2 s)         |
| Champ magnétique              |                        | 80-110        | 0,3-1 m gauss (10 s)                 |
| H <sub>2</sub> O              | 183                    | 15-90         | $1 \times 10^{-7}$ v/v (2 s)         |
| ClO                           | 205                    | 20-40         | $2 \times 10^{-10}$ v/v (10 s)       |
| O <sub>3</sub>                |                        | 15-90         | $1 \times 10^{-8}$ v/v (2 s)         |
| H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> |                        | 20-50         | $9 \times 10^{-10}$ v/v (10 s)       |
| O <sub>3</sub>                | 231                    | 15-90         | $1 \times 10^{-8}$ v/v (2 s)         |
| CO                            |                        | 15-100        | $1 \times 10^{-7}$ v/v (10 s)        |

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.

L’UARS a 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.

Dans la poursuite des efforts de limbosondage atmosphérique amorcés par le MLS UARS, le MLS EOS-B intègre les progrès technologiques récents afin de fournir de nouvelles mesures importantes.

TABLEAU 5-6

**Régions spectrales et objectifs de mesure du MLS (EOS-B)**

| Région spectrale (GHz) | Espèces atmosphériques                                   | Sensibilité requise intégration 0,6 s, BLU (K) |
|------------------------|--|--|
| 642,85                 | CH <sub>3</sub> Cl, ClO, BrO, HCl, HOCl, SO <sub>2</sub> | $T_{sys} < 10\ 000$                            |
| 1 228,95               | HF   | $T_{sys} < 15\ 000$                            |
| 2 522,78               | OH   | $T_{sys} < 30\ 000$                            |

### 5.1.8.5.3 Observation inframillimétrique des processus atmosphériques importants du point de vue de l’ozone (SOPRANO)

L’ASE a mis au point le système SOPRANO, conçu pour détecter diverses espèces: O<sub>3</sub>, ClO, HCl, NO, O<sub>2</sub>, BrO, HOCl, CH<sub>3</sub>Cl, N<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, etc. Les observations se font habituellement entre 10 et 50 km d’altitude, avec un gain d’antenne d’environ 70 dBi. Le Tableau 5-7 présente les canaux et les objectifs radiométriques du système.

TABLEAU 5-7

#### Canaux et objectifs radiométriques du système SOPRANO

| Canaux à ondes millimétriques (GHz) | Espèces atmosphériques  | Température de bruit du système (BLU, K) | NET (intervalle 0,3 s, résolution 3 MHz (K) |
|-------------------------------------|---|--|---|
| 497-506                             | BrO, O <sub>3</sub> , ClO, CH <sub>3</sub> Cl, N <sub>2</sub> O | 3 800                                    | 2,5   |
| 624,6-629                           | HCl, HOCl   | 7 900                                    | 8   |
| 952-955                             | O <sub>2</sub> , NO   | 7 600                                    | 8   |

### 5.1.8.5.4 Acquisitions en ondes millimétriques pour la recherche sur les échanges stratosphère-troposphère (MASTER)

L’ASE a également conçu le système MASTER. L’appareil est destiné au satellite ACE (*atmospheric chemistry explorer*) à orbite héliosynchrone basse. Il est conçu pour détecter, entre autres, les substances suivantes: CO, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, ClO, BrO, CH<sub>3</sub>Cl. Les observations se font habituellement entre 0 et 50 km d’altitude avec un gain d’antenne d’environ 70 dBi. Le Tableau 5-8 présente les canaux et les objectifs radiométriques du système.

TABLEAU 5-8

#### Canaux et objectifs radiométriques du système MASTER

| Canaux à ondes millimétriques (GHz) | Espèces atmosphériques   | Température de bruit du système (BLU, K) | NET (Intervalle 0,3 s, résolution 50 MHz (K) |
|-------------------------------------|--|--|--|
| 199-207                             | O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O                  | 3 500                                    | 1  |
| 296-306                             | O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> | 5 200                                    | 1,5  |
| 318-326                             | O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub>                  | 5 200                                    | 1,5  |
| 342-348                             | O <sub>3</sub> , CO, HNO <sub>3</sub>                                | 5 200                                    | 1,5  |
| 498-505                             | O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>3</sub> Cl, BrO, ClO      | 5 200                                    | 1,5  |

### 5.1.8.5.5 Sondeurs supraconducteurs de limbo-émissions à ondes inframillimétriques (SMILES)

L'appareil SMILES a été mis au point par le Laboratoire CRL de la NASDA. Le Tableau 5-9 renferme les régions spectrales et les objectifs de mesure du système.

TABLEAU 5-9

#### Régions spectrales et objectifs de mesure du système SMILES

| Région spectrale (GHz) | Espèces atmosphériques   | Température de bruit (BLU, K) |
|------------------------|--|-------------------------------|
| 624-629<br>649-653     | O <sub>3</sub> , HCl, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , HO <sub>2</sub> ,<br>HOCl, HNO <sub>3</sub> , ClO, BrO | $T_{sys} < 500$               |

Le système SMILES balaie l'antenne afin d'obtenir une résolution altitudinale d'environ 3,5 km à une altitude tangentielle allant de la haute troposphère (10 km) à la basse mésosphère (60 km) à partir de l'orbite de la station spatiale internationale (ISS, *international space station*). Il comprend un récepteur à niveau de bruit ultrabas avec mélangeurs supraconducteur-isolateur-supraconducteur (SIS). L'appareil sera mis en service en 2005.

### 5.1.8.5.6 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. Ils sont donc extrêmement sensibles au brouillage, 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, 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;
- 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-SA.1028 et UIT-R-SA.1029 définissent comme suit la qualité de fonctionnement radiométrique requise et le niveau de brouillage admissible:

- *Dans la bande de fréquences 50-66 GHz:* les résolutions radiométriques requises sont de 0,3 K pour les capteurs à balayage et de 0,1 K pour les capteurs à barrette de détecteurs. Les seuils de brouillage sont donc de -161 dBW pour le premier type d'appareil et de -166 dBW pour le deuxième, dans une largeur de bande de référence de 100 MHz. Ces niveaux, équivalents à une augmentation des températures de luminance de 0,06 K et 0,02 K, peuvent être considérés comme une contribution normale au bilan d'erreur de l'instrument.

- *Au-delà de 100 GHz*: la résolution radiométrique requise est actuellement de 0,2 K à toutes les fréquences, avec un seuil de brouillage de -160 dBW, dans une largeur de bande de référence de 200 MHz. Ces chiffres devraient toutefois être révisés au vu des progrès les plus récents accomplis dans les sciences de l'atmosphère.

La Recommandation UIT-R SA.1029 énonce que les «niveaux de brouillage susmentionnés peuvent être dépassés d'une valeur inférieure à 0,01% du temps dans la zone d'observation du capteur pour ce qui est des mesures tridimensionnelles de la température atmosphérique ou de la concentration d'un gaz dans les bandes d'absorption, notamment entre 50,2 et 61,3 GHz et dans des bandes au voisinage de 118 GHz et de 183 GHz».

## 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 5-10 donne les caractéristiques de ces cinq grands types de capteurs spatiaux actifs.

TABLEAU 5-10

**Caractéristiques des capteurs spatiaux actifs**

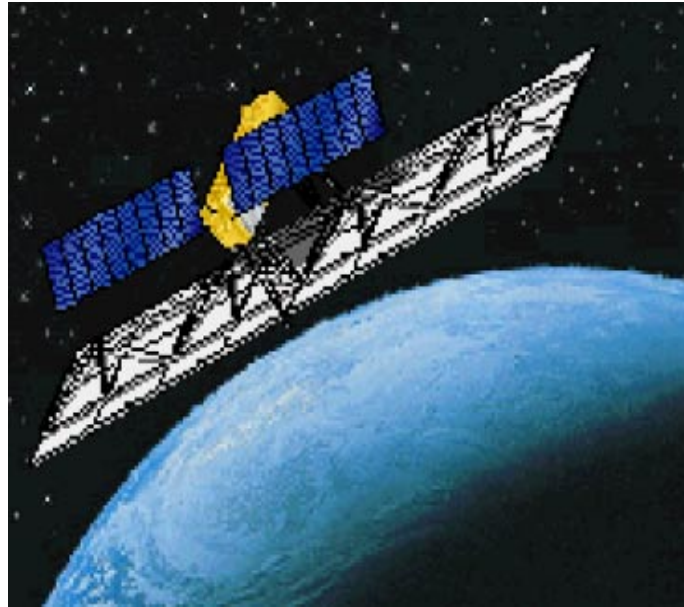
| Caractéristiques                | Types de capteurs                               |                         |  |  |                    |
|---------------------------------|---|-------------------------|--|--|--------------------|
|                                 | SAR   |                         | SAR  |  | SAR                |
| Géométrie de visée              | Balayage latéral à 10°-55° par rapport au nadir | Visée du nadir          | – Six faisceaux éventail à l’azimut<br>– Deux faisceaux à balayage conique | Visée du nadir                           | Visée du nadir     |
| Empreinte/dynamique             | – Fixe sur un côté<br>– ScanSAR                 | Fixe au nadir           | – Fixe à l’azimut<br>– Balayage  | Balayage en travers de la trace du nadir | Fixe au nadir      |
| Faisceau d’antenne              | Faisceau-éventail                               | Faisceau-crayon         | – Faisceaux-éventail<br>– 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**

Les SAR fournissent des images de la surface de la Terre. On peut voir à la Fig. 5-12 une représentation du système LightSAR en bande L proposé. 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  $\theta$  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, prise par le système SIR-C.

FIGURE 5-12

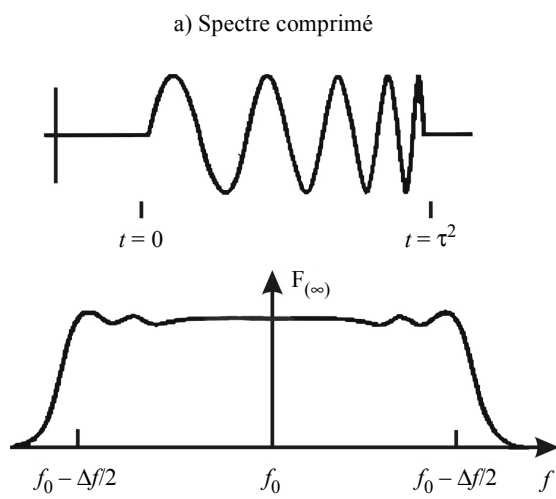
**Radar LightSAR en bande L**



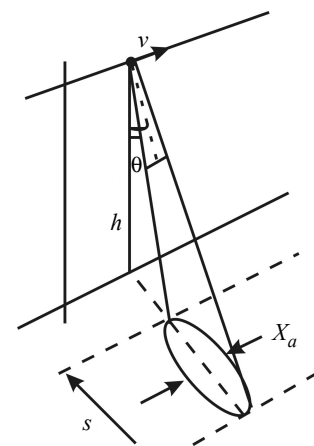
Meteo-0512

FIGURE 5-13

**Spectre comprimé et couloir d'illumination SAR**



b) Couloir d'illumination SAR



Meteo-0513

FIGURE 5-14

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



Meteo-0514

### 5.2.3 Altimètres

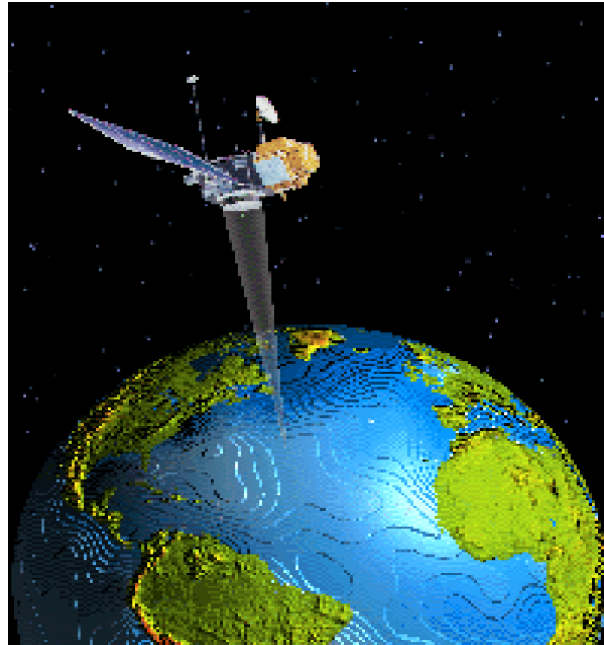
Les altimètres donnent l'altitude de la surface des océans. Les Fig. 5-15, 5-16a) et 5-16b) illustrent l'altimètre TOPEX et sa précision. Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface de l'océan. Le fonctionnement en fréquence double permet de compenser le retard ionosphérique. Par exemple, TOPEX/POSEIDON utilise les fréquences au voisinage de 13,6 GHz et 5,3 GHz. La grande largeur de bande influe sur la précision des mesures de la hauteur. L'exactitude de la différence de temps  $\Delta t$  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.

### 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. 5-18 montre la fluctuation de la rétrodiffusion par rapport à la direction du vecteur vitesse du vent.

FIGURE 5-15

**Satellite TOPEX**

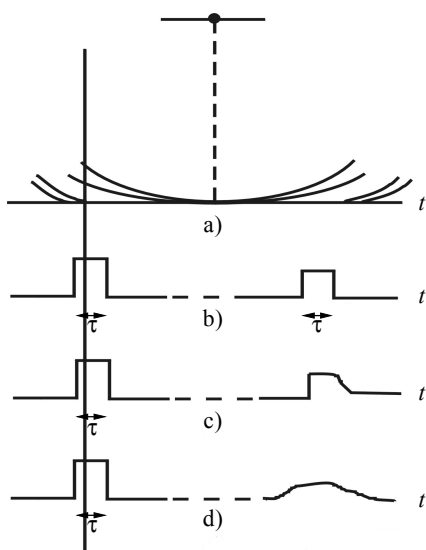


Meteo-0515

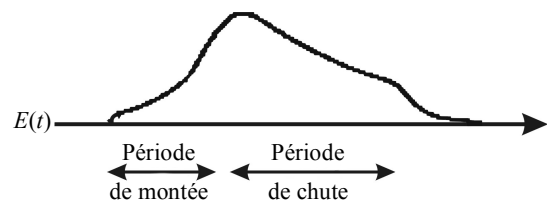
FIGURE 5-16

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

a) Illustration du retour de l'altimètre



b) Etalement de l'impulsion de retour



Meteo-0516



FIGURE 5-17

**Détection par TOPEX/POSEIDON des températures chaudes de la mer pendant un épisode El Niño dans l'océan Pacifique**

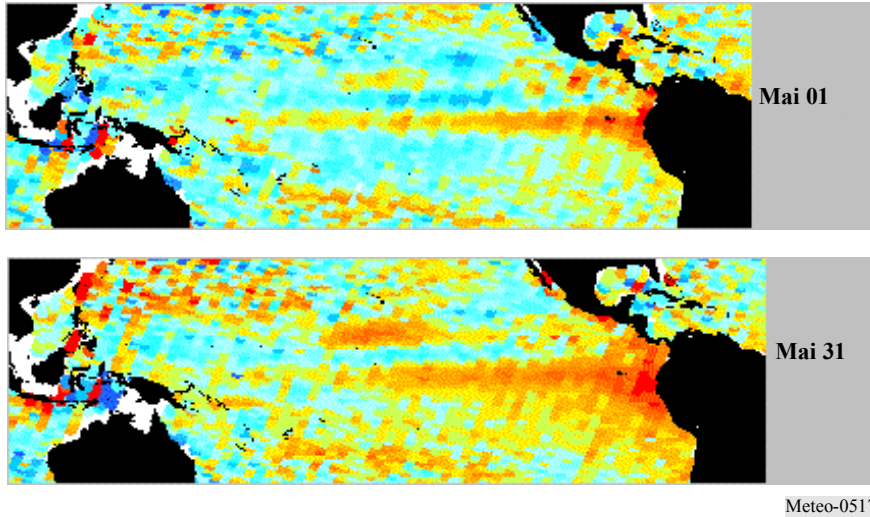
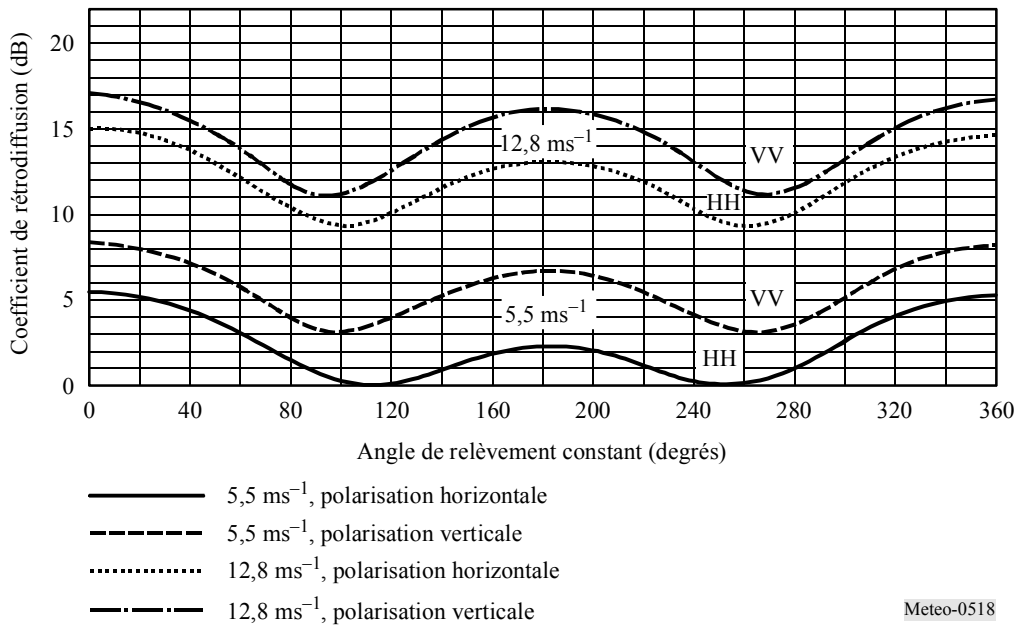


FIGURE 5-18

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



Comme on le voit à la Fig. 5-19, SCAT illumine la surface de la Terre à différents angles fixes de relèvement constant. A la Fig. 5-20, le faisceau-crayon de SEAWINDS balaie selon deux différents angles 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. Dans le cas de NSCAT, la bande 2-15 kHz suffit pour une résolution de 25 km. La dégradation admissible de la précision de la vitesse du vent détermine le niveau de brouillage tolérable.

FIGURE 5-19

**Empreinte fixe de NSCAT**

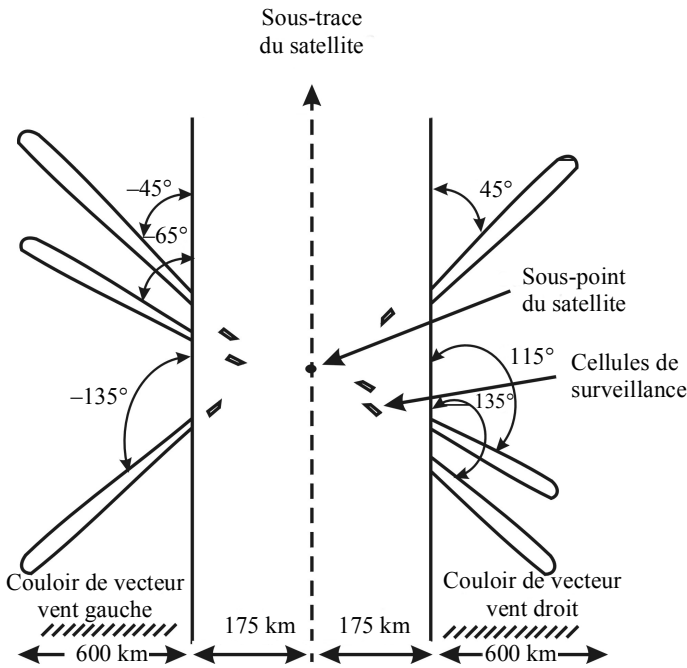
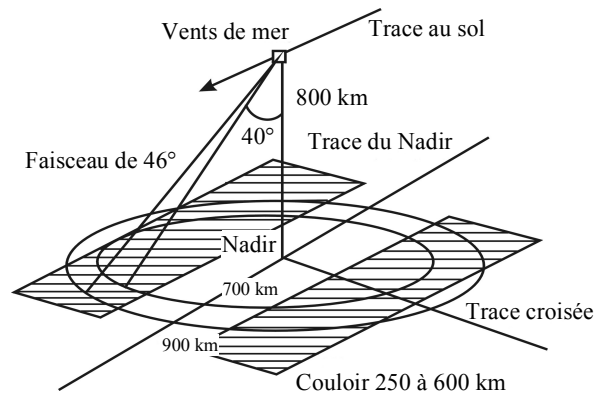


FIGURE 5-20

**Balayage du faisceau-crayon de Seawinds**

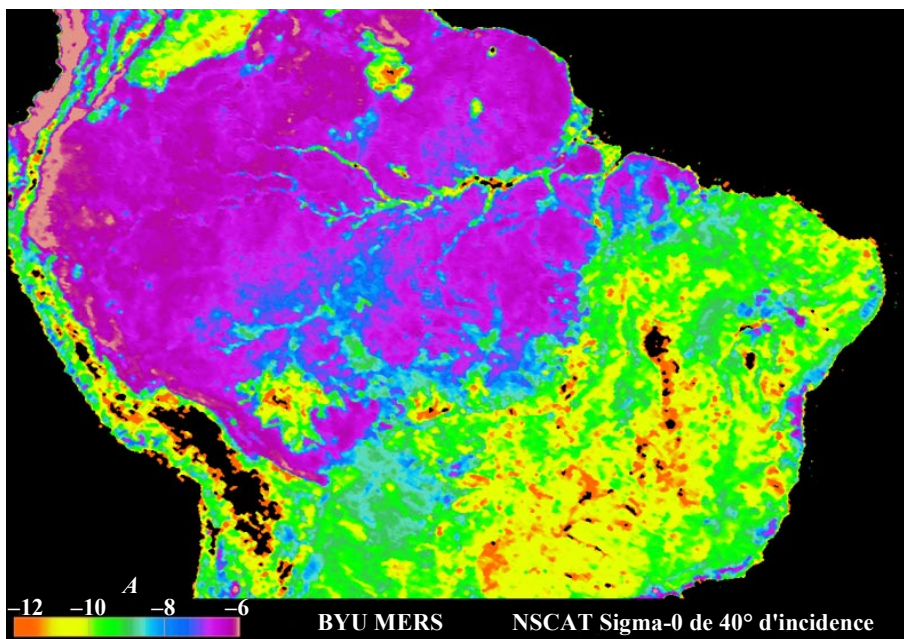


Meteo-0519

La Fig. 5-21 montre une image radar de la forêt ombrophile amazonienne en Amérique du Sud prise par le NSCAT. Mentionnons aussi l'utilisation, à des fins météorologiques, des diffusiomètres ERS AMI (mode vent) et METOP Ascats.

FIGURE 5-21

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



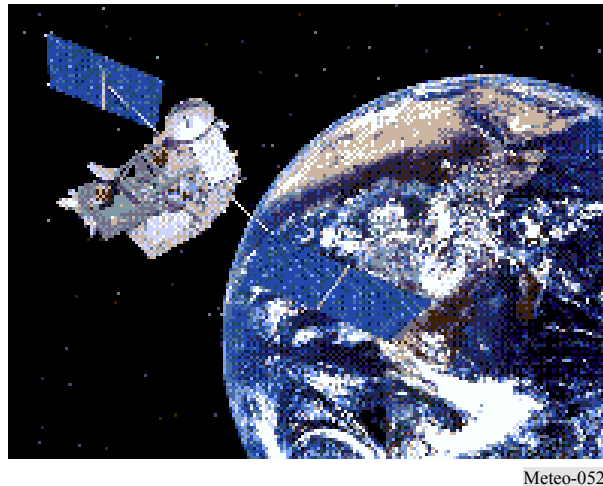
Meteo-0521

### 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. La Fig. 5-22 montre le satellite TRMM.

FIGURE 5-22

#### Représentation du satellite TRMM



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

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

où:

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

$D$ : diamètre de la goutte

$\lambda$ : longueur d'onde du radar

$Z$ : facteur de réflectivité du radar.

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

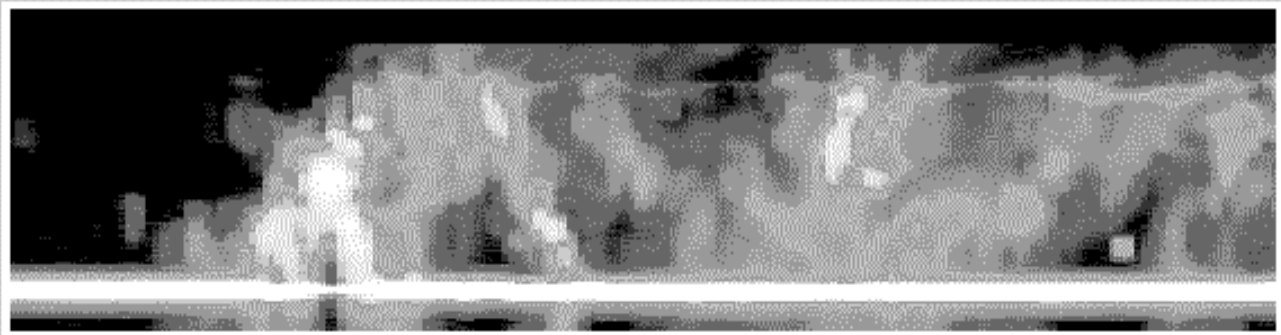
La Fig. 5-23 fournit un exemple de section verticale du facteur de réflectivité du radar. La courte durée d'impulsion du signal assure la résolution voulue en portée. Le radar TRMM fonctionne avec une durée d'impulsion de  $1,6 \mu\text{s}$ . La dégradation admissible de la réflectivité minimale des précipitations détermine le niveau de brouillage tolérable.

### 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. 5-24 montre un exemple type de réflectivité de rétrodiffusion en fonction de l'altitude.

FIGURE 5-23

**Réfectivité synthétisée du radar TRMM selon les mesures de réfectivité ARMAR**

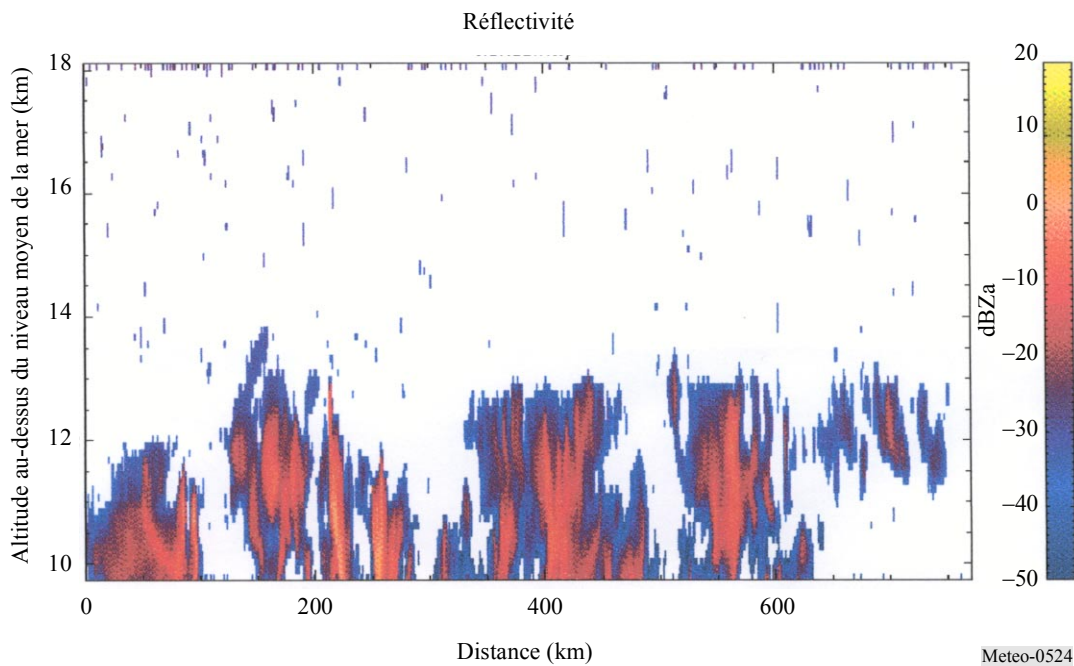


Meteo-0523

FIGURE 5-24

**Exemple de réfectivité d'un cirrus**

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



Le choix de la fréquence centrale dépend des interactions avec le champ électromagnétique à la surface des océans et de leurs variations en fonction de 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)

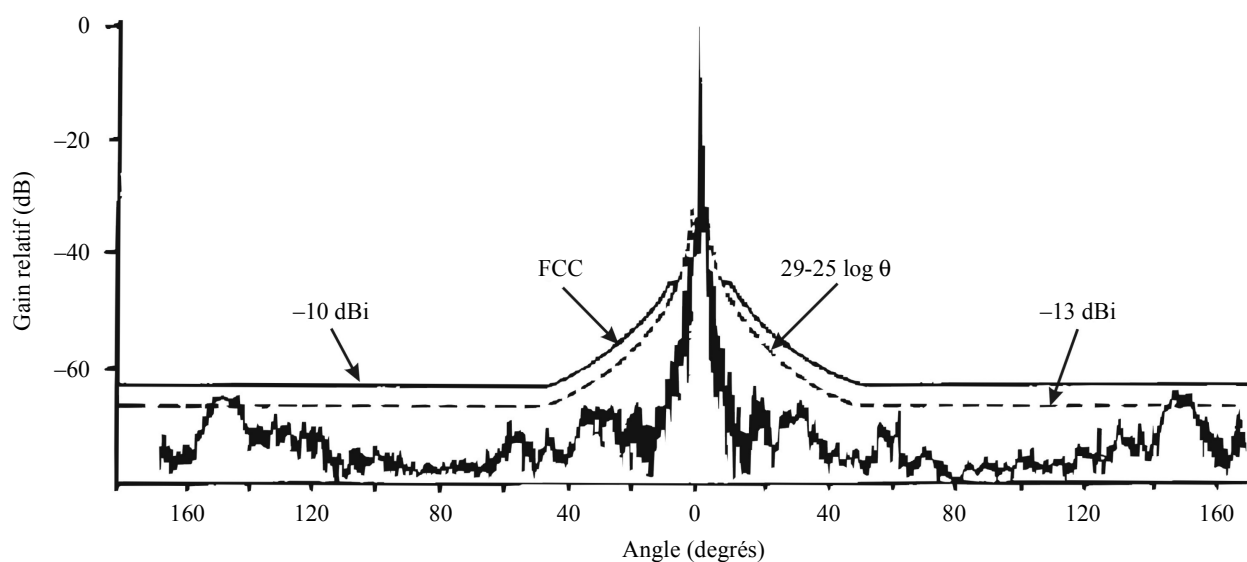
- $G$ : gain d'antenne (numérique)
- $t$ : durée de l'impulsion ( $\mu\text{s}$ )
- $\theta_r$ : largeur de faisceau d'antenne 3 dB (degrés)
- $K_W$ : facteur diélectrique de la teneur en eau des nuages
- $Z_r$ : facteur de réflectivité des nuages ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )
- $r_0$ : portée (km)
- $\lambda$ : longueur d'onde radar (cm)
- $l$ : affaiblissement de signal dû à l'absorption atmosphérique
- $l_r$ : affaiblissement du système radar.

On le voit, 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.

La Fig. 5-25 montre les lobes secondaires de  $-60$  dB d'une antenne classique. La largeur de bande réduite du signal assure la résolution voulue des cellules de mesure. La dégradation admissible de l'exactitude de la réflectivité détermine le niveau de brouillage tolérable.

FIGURE 5-25

### Gain relatif en fonction de l'angle de l'antenne



Meteo-0526

### 5.2.7 Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage des capteurs

Voici les critères établis pour les différentes catégories de capteurs spatiaux actifs:

SAR: 10 % de dégradation de l'écart type de la puissance de pixel donne  $I/N = -6$  dB avec les effets atténuateurs du traitement

Altimètre: 4 % de dégradation du bruit de hauteur donne  $I/N = -3$  dB

- Diffusiomètre: La dégradation de la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar normalisé, avec simulations du système de mesure, donne  $I/N = -5$  dB
- Radar de précipitations: 7 % d'augmentation de l'intensité minimale des précipitations donne  $I/N = -10$  dB
- Radar de nuages: 10 % de dégradation de la réflectivité minimale des nuages donne  $I/N = -10$  dB

Les critères de qualité de fonctionnement et de brouillage sont récapitulés au Tableau 5-11.

TABLEAU 5-11

**Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage**

| Type de capteur               | Critère $I/N$ (dB) | Critère de disponibilité (%) |              |
|-------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------|
|                               |                    | Systématique                 | Systématique |
| Radar à ouverture synthétique | -6                 | 99                           | 95           |
| Altimètre                     | -3                 | 99                           | 95           |
| Diffusiomètre                 | -5                 | 99                           | 95           |
| Radar de précipitations       | -10                | n/d                          | 99,8         |
| Radar de profil des nuages    | -10                | 99                           | 95           |

**5.2.8 Niveaux de brouillage**

Les caractéristiques des divers types de capteurs spatiaux actifs données dans le Tableau 5-10 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 5-12 montre les niveaux de puissance surfacique à la surface de la Terre pour certaines configurations types de capteurs actifs.

TABLEAU 5-12

**Niveaux de brouillage types à la surface de la Terre**

| Paramètre                                    | Type de capteur |           |               |                         |                            |
|--|-----------------|-----------|---------------|-------------------------|----------------------------|
|  | SAR             | Altimètre | Diffusiomètre | Radar de précipitations | Radar 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 <sup>2</sup> )) | -59,67          | -77,25    | -78,17        | -46,55                  | -31,64                     |

### 5.2.9 Etudes de compatibilité

On a réalisé à l'UIT-R des études de compatibilité pour de nombreuses bandes de fréquences des capteurs spatiaux actifs. Le Tableau 5-13 récapitule les bandes de fréquences et les types de capteurs qui ont fait l'objet de telles études.

TABLEAU 5-13

#### Etudes de compatibilité par bande de fréquences et type de capteur

| Bande de fréquences (MHz) | Type de capteur                          |               |                                    |                         |                            |
|---------------------------|--|---------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
|                           | SAR                                      | Altimètre     | Diffusiomètre                      | Radar de précipitations | Radar de profil des nuages |
| 430-440                   | (P)                                      |               |                                    |                         |                            |
| 1 215-1 300               | SIR-C, JERS-1, PALSAR (ALOS)             |               |                                    |                         |                            |
| 3 100-3 300               | ALMAZ                                    | RA2 (P)       |                                    |                         |                            |
| 5 150-5 250               | RADARSAT-2 (P)                           | JASON (P)     |                                    |                         |                            |
| 5 250-5 350               | RADARSAT, ASAR, ERS1/2, ENVISAT ASAR (P) | TOPEX         | ERS1/2, NSCAT (P), METOP ASCAT (P) |                         |                            |
| 5 350-5 470               | RADARSAT-2 (P)                           | JASON (P)     |                                    |                         |                            |
| 8 550-8 650               | (S)                                      | (S)           | (S)                                |                         |                            |
| 9 500-9 800               | X-SAR, Okean-O SLR                       | (S)           | (S)                                |                         |                            |
| 9 975-10 025              |  |               |                                    |                         |                            |
| 13 250-13 400             |  | JASON         | NSCAT, SEAWINDS                    | TRMM suite (P)          |                            |
| 13 400-13 750             |  | JASON, ERS1/2 | NSCAT, SEAWINDS, ENVISAT RA-2 (P)  | TRMM suite (P)          |                            |
| 17 200-17 300             |  |               | (S)                                | (S)                     |                            |
| 24 050-24 250             |  |               |                                    | (S)                     |                            |
| 35 500-35 600             |  | (S)           | (S)                                | TRMM suite (P)          |                            |
| 78 000-79 000             |  |               |                                    |                         | (S)                        |
| 94 000-94 100             |  |               |                                    |                         | CLOUDSAT (P)               |
| 133 500-134 000           |  |               |                                    |                         | (S)                        |
| 237 900-238 000           |  |               |                                    |                         | (S)                        |

NOTE – (P) Proposé pour l'avenir, (S) Supposé, dans les autres cas utilisé actuellement.

### 5.2.10 Fréquences attribuées

Le Tableau 5-14 indique l'attribution actuelle des fréquences aux capteurs spatiaux actifs.

TABLEAU 5-14  
Attribution des fréquences aux capteurs spatiaux actifs

| Bande de fréquences (GHz) | Objectifs des utilisateurs   | Attribution actuelle                 | Attribution nécessaire                | Utilisateurs  |
|---------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 0,420-0,470               | Surveillance des forêts (biomasse)   | Aucune                               | PRIMAIRE ou secondaire, minimum 6 MHz | SAR en bande P  |
| 1,215-1,300               | Structure des vagues, géologie, humidité du sol, interférométrie (DEM)               | PRIMAIRE No. 5.332 et 5.335 du RR    | PRIMAIRE                              | SAR en bande L (JERS-1, SIR-C, PALSAR)  |
| 3,1-3,3                   | Géologie   | Secondaire                           | PRIMAIRE                              | SAR en bande S, altimètre (Envisat RA-2 fréquence seconde)                                    |
| 5,15-5,25                 | Géologie, océanographie, glace de mer, utilisation des terres, interférométrie (DEM) | Aucune                               | PRIMAIRE                              | Altimètres radar haute résolution (Jason)   |
| 5,25-5,46                 | Géologie, océanographie, glace de mer, utilisation des terres, interférométrie (DEM) | PRIMAIRE No. 5.447D, 5.448A, B du RR | PRIMAIRE 5 460-5 570 MHz              | SAR, diffusiomètres, altimètres (AMI, ASCAT, ASAR, ALT/dual, IKAR-N)                          |
| 8,55-8,65                 | Applications SAR haute résolution (tactiques) plus neige et glace                    | PRIMAIRE No. 5.468 et 5.469 du RR    | PRIMAIRE                              | Indéterminés  |
| 9,5-9,8                   | Applications SAR haute résolution (tactiques) plus neige et glace                    | PRIMAIRE No. 5.476A du RR            | PRIMAIRE                              | SAR en bande X, Okean-O SLR   |
| 9,975-10,025              | SAR haute résolution (tactiques) plus neige et glace                                 | Secondaire No. 5.479 du RR           | Indéterminée                          | Indéterminés  |
| 13,25-13,75               | Vent, glace, géoïde  | PRIMAIRE No. 5.498A, 501A, B du RR   | PRIMAIRE                              | Diffusiomètres en bande Ku, altimètres (NSCAT, ALT/dual, PR, R225, IKAR-D & N, RA, RA-2, DPR) |
| 17,2-17,3                 | Végétation, neige, pluie, vent   | PRIMAIRE No. 5.513A du RR            |                                       | Radars de pluie, radar de précipitations, diffusiomètres                                      |
| 24,05-24,25               | Pluie  | Secondaire                           | PRIMAIRE                              | Radars de pluie, radar de précipitations (IKAR-D & N)   |



TABLEAU 5-14 (*fin*)

| Bande de fréquences (GHz) | Objectifs des utilisateurs                               | Attribution actuelle         | Attribution nécessaire | Utilisateurs  |
|---------------------------|--|------------------------------|------------------------|---|
| 35,5-36,0                 | Glace, vent, géoïde, neige                               | PRIMAIRE<br>No. 5.551A du RR |                        | Altimètres, diffusiomètres, radar des précipitations (IKAR-N,DPR) |
| 78-79                     | Altimétrie (terres et glace) à haute résolution spatiale | PRIMAIRE<br>No. 5.560 du RR  |                        | Radioaltimètres   |
| 94,0-94,1                 | Profilage des nuages                                     | PRIMAIRE<br>No. 5.562 du RR  | PRIMAIRE               | Radars de profil des nuages (ESA CPR, CPR/NASA, IKAR-D & N)       |
| 133,500-134,000           | Profilage des nuages                                     | PRIMAIRE<br>No. 5.562E du RR |                        | Radar de profil des nuages  |
| 237,900-238,000           | Profilage des nuages                                     | PRIMAIRE<br>No. 5.563B du RR |                        | Radar de profil des nuages  |

## Bibliographie

### Capteurs passifs

AMSR: <http://adeos2.hq.nasda.go.jp/>

AMSR-E: <http://eos-pm.gsfc.nasa.gov/>

SMILES: <http://smiles.tksc.nasda.go.jp/>

### Capteurs actifs

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

WU, DR. C. et autres [1994] *The SeaWinds Scatterometer Instrument*, IGARSS '94.

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

Adresses Internet pour l'accès aux Figures:

SAR: <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/dsea.html>

PALSAR/ALOS: <http://www.eorc.nasda.go.jp/ALOS>

Altimètre: [http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/near\\_rt/enso/topex\\_97.html](http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/near_rt/enso/topex_97.html)

SLR: <http://sputnik1.infospace.ru>

<http://planet.iitp.ru>

### Textes de l'UIT-R

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



## CHAPITRE 6

### LES AUTRES SYSTÈMES DE RADIOCOMMUNICATION UTILISÉS EN MÉTÉOROLOGIE

|  | Page |
|--|------|
| 6 Introduction .....   | 88   |
| 6.1 Les systèmes de diffusion et de radiodiffusion .....                   | 88   |
| 6.2 Les systèmes hydrologiques de radiocommunication .....                 | 89   |
| 6.2.1 Introduction .....   | 89   |
| 6.2.2 Exemples de systèmes hydrologiques .....                             | 89   |
| 6.3 Autres systèmes à satellites .....                                     | 90   |
| 6.4 Les systèmes distants fixes .....                                      | 90   |
| 6.5 Les applications météorologiques des systèmes de radionavigation ..... | 91   |
| 6.5.1 Services de Terre .....  | 91   |
| 6.5.2 Système mondial de navigation par satellite (GNSS) .....             | 91   |
| 6.6 Les systèmes de détection et de localisation des éclairs .....         | 92   |
| 6.7 La télédétection au sol .....  | 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. De même, les mesures effectuées en temps réel à bord d'aéronefs commerciaux deviennent de plus en plus essentielles. Ces mesures sont réalisées lors des montées et des descentes à proximité des aéroports, mais également sur des distances plus longues aux altitudes de croisière. 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.

Trois éléments représentatifs de l'utilisation des services de radiocommunication seront examinés dans les § ci-après:

- 6.1 Les systèmes de diffusion et de radiodiffusion;
- 6.2 Les systèmes hydrologiques de radiocommunication;
- 6.3 Autres systèmes à satellites.

Le service fixe sert à appuyer le fonctionnement de certains systèmes météorologiques. Ces cas seront considérés brièvement dans la section suivante:

- 6.4 Les systèmes distants fixes

Les météorologistes emploient couramment les services de radiorepérage et de radionavigation depuis de nombreuses années. Dans certains cas, les besoins de la météorologie diffèrent des autres domaines et peuvent ajouter des contraintes à ces services, ce dont il sera question dans:

- 6.5 Les applications météorologiques des systèmes de radionavigation.

Certaines utilisations du spectre des fréquences radioélectriques ne s'intègrent pas facilement à la structure actuelle des services de radiocommunication de l'UIT. Cela sera illustré par les deux sujets suivants:

- 6.6 Les systèmes de détection et de localisation des éclairs
- 6.7 La télédétection passive au sol.

### **6.1 Les systèmes de diffusion et 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 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.

## **6.2 Les systèmes hydrologiques de radiocommunication**

### **6.2.1 Introduction**

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 les crues et évaluer la disponibilité des ressources en eau. Ils fonctionnent souvent dans les bandes des ondes métriques ou décimétriques et sont intégrés aux services fixes ou mobiles.

Les dégâts moyens annuels causés par les inondations avoisinent actuellement les 4 milliards de dollars, seulement aux Etats-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.

### **6.2.2 Exemples de systèmes hydrologiques**

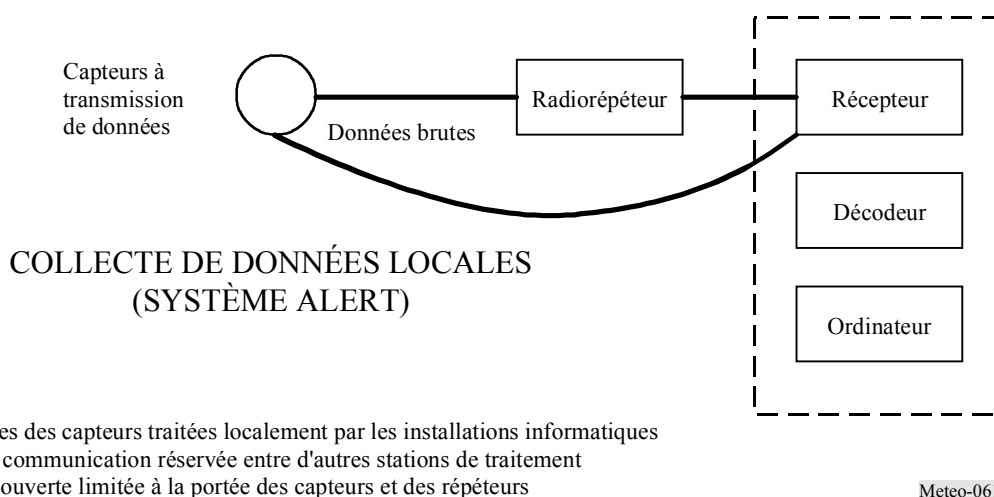
Aux Etats-Unis d'Amérique, c'est le Service météorologique national (NWS, *National Weather Service*) qui est responsable d'émettre les avis de crue locaux et régionaux. Les données obtenues par le NWS à partir de systèmes d'avis de crue locaux automatisés (ALFWS, *automated local flood warning systems*) utilisant des fréquences hydrologiques contribuent à la transmission d'avis rapides et exacts. Il existe plus de 400 systèmes de ce type aux Etats-Unis d'Amérique employant 42 fréquences dans les bandes des ondes métriques (162-174 MHz) et décimétriques (406,1-420 MHz) principalement attribuées aux services hydrologiques. Le nombre d'ALFWS à fréquences radioélectriques devrait augmenter avec la mise en service des nouveaux systèmes de crue éclair.

Le système automatisé d'évaluation locale en temps réel (ALERT) se compose de capteurs météorologiques et hydrologiques automatisés axés sur la signalisation d'événements, d'un équipement de communication et de logiciels et matériels informatiques. Il fonctionne selon le principe suivant: les capteurs transmettent des signaux codés, généralement dans les bandes des ondes métriques et

décimétriques, à une station de base, souvent en passant par des répéteurs (voir la 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 pré-établies sont satisfaites.

FIGURE 6-1

### Schéma d'un système ALERT



### 6.3 Autres systèmes à satellites

La collecte, la transmission et la diffusion des données commencent à être assistées par un certain nombre d'autres systèmes à satellites, et le recours à ces systèmes devrait augmenter à l'avenir. A l'heure actuelle, les données météorologiques brutes et traitées sont transmises à la grandeur de la planète et à l'échelle nationale par le service fixe par satellite (SFS). Le nouveau service mobile par satellite (SMS) encore en développement pourra un jour faciliter la collecte des données, provenant en particulier de lieux reculés et inaccessibles. Les systèmes SMS se divisent en deux catégories. Il y a d'abord ceux qui fonctionnent sous 1 GHz et qui assurent un service peu coûteux pour les données seulement, que l'on appelle SMS non vocal non géostationnaire ou «mini-LEO» (orbite terrestre basse). Il y a ensuite les systèmes qui acheminent à la fois les données et la voix et qui exploitent leurs liaisons (à destination et en provenance des utilisateurs individuels) dans la bande 1-3 GHz, surnommés «maxi-LEO».

### 6.4 Les systèmes distants fixes

Les caractéristiques techniques, y compris les fréquences d'exploitation, de ces systèmes varient beaucoup et presque toutes les bandes de fréquences météorologiques peuvent être employées. Les choix sont souvent faits en fonction de la largeur de bande nécessaire, qui à son tour est déterminée par le type et la quantité d'information à transmettre. En météorologie, les systèmes distants fixes ont plusieurs utilités et fonctionnent dans un certain nombre de bandes de fréquences. Comme leur nom l'indique, ils sont exploités dans des attributions fixes. Les applications types sont les suivantes:

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

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

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

## **6.5 Les applications météorologiques des systèmes de radionavigation**

### **6.5.1 Services de Terre**

Les météorologistes utilisent les signaux du service de radionavigation à diverses fins. L'emploi des signaux de navigation Oméga (fréquences situées entre 10 et 13 kHz) s'est répandu pour la poursuite des radiosondes à partir de 1985 jusqu'à la fin de l'exploitation du réseau dans le service des auxiliaires de la météorologie. Cela était dû au fait que les systèmes de radiosonde pouvaient être utilisés avec une simple antenne de station de base, que le traitement était automatisé et que les systèmes étaient faciles à entretenir dans les régions reculées. On faisait aussi appel aux signaux Loran-C à 100 kHz pour le même usage et l'utilisation de ce système s'est accrue dans les zones où une bonne couverture était maintenue.

Lorsque l'on a mis hors service les émetteurs Oméga en 1997, plus de 20% des systèmes de radiosonde du réseau de l'OMM devaient être changés. La plupart de ces systèmes au sol ont été modifiés ou remplacés afin d'utiliser des radiosondes recevant et traitant les signaux de navigation GPS.

### **6.5.2 Système mondial 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 et du système Galileo proposé) 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 sans pilote 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 § 6.6).
- *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 METOP et NPOESS, et ceux-ci sont actuellement utilisés sur des satellites spécialisés comme COSMIC.

## 6.6 Les systèmes de détection et de localisation 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 (voir la Fig. 6-2) est déterminée en mesurant la direction d'arrivée de la sphère associée (onde atmosphérique), son temps d'arrivée, ou la combinaison des deux.



FIGURE 6-2

**Photographie longue exposition de coups de foudre nuage-sol près de Norman, en Oklahoma, Etats-Unis d'Amérique**



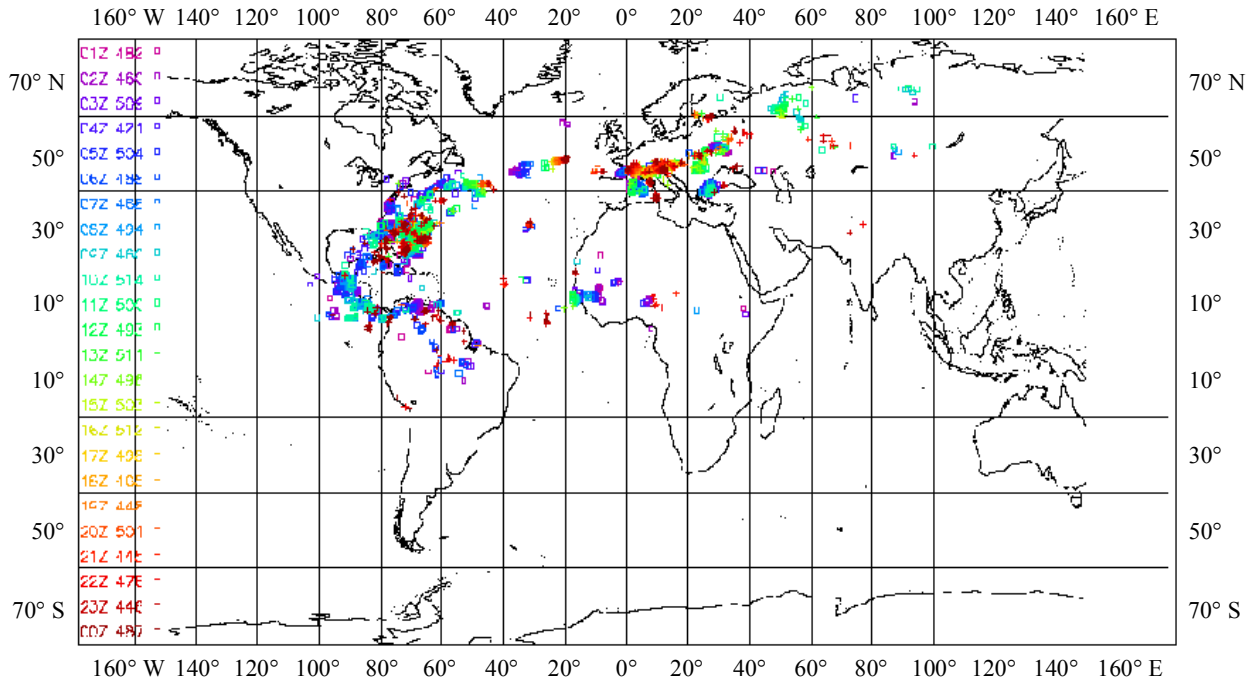
Meteo-062

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. 6-3). Dans ce système, les parasites atmosphériques sont reçus à des stations éloignées situées autour de l'Europe [Lee, 1986] et espacées jusqu'à 2000 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. Le brouillage étant un facteur très important, chaque station distante est munie de filtres coupe-bande réglables permettant d'éliminer la contamination locale.

FIGURE 6-3

**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 h

Meteo-063

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.

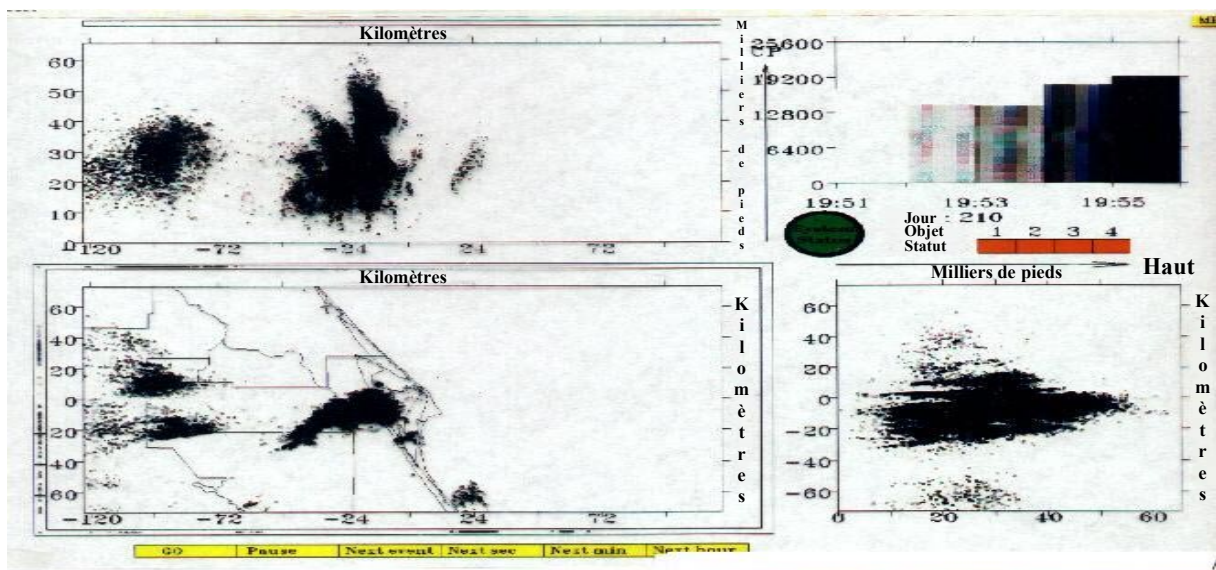
Dans certaines régions, il est par ailleurs nécessaire d'observer toutes les décharges électriques associées aux orages, qu'elles soient du type nuage-sol ou nuage-nuage. On peut y arriver en ayant recours à des fréquences beaucoup plus élevées (63 MHz et 225 MHz avec le système LDAR (*lightning detection and ranging*), et 110 MHz à 118 MHz avec le système SAFIR). Le système LDAR mis au point par la NASA, est décrit par [Lennon et Maier, 1991] et le système SAFIR, conçu en France, est examiné par [Kawasaki et autres, 1994]. La Fig. 6-4 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. 6-4 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 6-4

### Affichage LDAR en temps réel



Meteo-064

## 6.7 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, devrait également bénéficier de l'augmentation du nombre de radiomètres au sol.

### Bibliographie

- 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, Etats-Unis d'Amérique, p. 68.
- 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

|          |   |          |   |
|----------|---|----------|---|
| <b>A</b> |   | ASIC     | Circuit intégré à application spécifique                                |
| AAAS     | American Association for the Advancement of Science   | ATMS     | Sondeur hyperfréquence de haute technologie (NPOESS/NASA)               |
| AARS     | Système de transmission automatique des observations d'aéronefs   | ATOVS    | Sondeur vertical opérationnel perfectionné de TIROS                     |
| AA VMM   | Activités d'appui à la VMM  | ATSR     | Radiomètre à balayage dans le sens de la trace au sol                   |
| ABSN     | Réseau synoptique de base de l'Antarctique  | AVCS     | Système de caméra Vidicon perfectionné                                  |
| ACARS    | Système embarqué de communication, d'adressage et de compte rendu   | AVHRR    | Radiomètre perfectionné à très haute résolution                         |
| ACMAD    | Centre africain pour les applications de la météorologie au développement                                       | AWIPS    | Système avancé de traitement météorologique interactif                  |
| ADC      | Convertisseur analogique-numérique  | <b>B</b> |   |
| ADEOS    | Satellite de pointe d'observation de la Terre (Japon)   | BPS      | bits par seconde  |
| AFC      | Contrôle de fréquence automatique   | BR       | Bureau des radiocommunications de l'UIT                                 |
| AGRHYMET | Centre régional de formation, de recherche et d'application en agrométéorologie et en hydrologie opérationnelle | <b>C</b> |   |
| AIMSA    | Association internationale de la météorologie et des sciences de l'atmosphère                                   | $C/N_0$  | Rapport porteuse-densité de bruit                                       |
| AIRS     | Sondeur infrarouge avancé à haute résolution (NASA)   | CAG      | Commande automatique de gain  |
| AISH     | Association internationale des sciences hydrologiques   | CCI      | Commission de climatologie  |
| AM       | Modulation d'amplitude  | CCADC    | Comité consultatif pour les applications et les données climatologiques |
| AMDAR    | Retransmission des données météorologiques d'aéronefs   | CCD      | Dispositif à charge couplée   |
| AMI      | American Meteorological Society   | CCIR     | Comité consultatif international des radiocommunications, voir UIT-R    |
| AMSR     | Radiomètre perfectionné hyperfréquence à balayage   | CCRS     | Centre de télédétection canadien  |
| ANSI     | American National Standards Institute   | CCSDS    | Consultative Committee for Space Data Systems                           |
| AOPC     | Groupe d'experts des observations atmosphériques pour l'étude du climat   | CDAS     | Station de télécommande et d'acquisition des données                    |
| APT      | Transmission automatique des images   | CEM      | Compatibilité électromagnétique   |
| ARGOS    | Système de localisation et de collecte de données des satellites NOAA   | CEPMMT   | Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme       |
| ASC      | Agence spatiale canadienne  | CERES    | Système d'étude du bilan radiatif de la Terre et des nuages             |
| ASCII    | Code normalisé américain pour l'échange d'information   | CGMS     | Groupe de coordination pour les satellites météorologiques              |
| ASE      | Agence spatiale européenne  | CHy      | Commission d'hydrologie (OMM)   |
|          |   | CIEM     | Conseil international pour l'exploration de la mer                      |
|          |   | CIESIN   | Consortium for International Earth Science Information Networks         |

|         |  |          |  |
|---------|--|----------|--|
| CIMO    | Commission des instruments et des méthodes d'observation                 | CSA      | Commission des sciences de l'atmosphère                                      |
| CIMSS   | Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies               | CSB      | Commission des systèmes de base  |
| CIUS    | Conseil international des unions scientifiques                           | CSIS     | Système centralisé d'information sur les tempêtes                            |
| CLICOM  | Application de l'informatique à la climatologie                          | CSIRO    | Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth    |
| CLINO   | Normales climatologiques   | CSM      | Comité scientifique mixte  |
| CLIPS   | Services d'information et de prévision climatologiques                   | CSMA/CD  | Accès multiple par détection de porteuse et détection de collision           |
| CLIVAR  | Etude de la variabilité et de la prévisibilité du climat                 | CSOT     | Comité sur les satellites d'observation de la Terre                          |
| CMA     | Administration météorologique de la Chine                                | CST      | Comité scientifique et technique   |
| CMAé    | Commission de météorologie aéronautique                                  | CSTM     | Comité scientifique et technique mixte                                       |
| CMAg    | Commission de météorologie agricole                                      | CSTR     | Council for Scientific and Technical Research                                |
| CMD     | Centre mondial de données  | CTCS     | Système TAD de télémétrie et de télécommande (partie TAD du système GIMTACS) |
| CMIS    | Sondeur-imageur hyperfréquences à balayage conique (NPOESS)              | CW       | Onde entretenue  |
| CMM     | Centre météorologique mondial  | CZCS     | Balayeur couleur de zone côtière   |
| CMM     | Commission de météorologie maritime                                      | <b>D</b> |  |
| CMN     | Centre météorologique national   | DAAC     | Centre réparti d'archives actives  |
| CMR     | Conférence mondiale des radiocommunications                              | DADS     | Système de distribution et d'archivage des données                           |
| CNES    | Centre national d'études spatiales                                       | DAPS     | Système de traitement automatique de DCS                                     |
| CNIE    | Comision Nacional de Investigaciones Espaciales                          | dB       | Décibel  |
| COADS   | Ensemble de données détaillées océan-atmosphère                          | DB       | Diffusion directe  |
| COI     | Commission océanographique intergouvernementale                          | DCB      | Décimal codé binaire   |
| CONUS   | Zone continentale des Etats-Unis d'Amérique                              | DCPLS    | Système de collecte de données et de localisation de plates-formes           |
| COP     | Conférence des Parties   | DCPI     | Interrogation de plate-forme de collecte de données                          |
| COPUOS  | Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique       | DCPR     | Réception de plate-forme de collecte de données                              |
| CORSSAC | Civil Operational Remote Sensing Satellite Advisory Committee            | DCR      | Radiomètre différentiel de corrélation                                       |
| COSPAS  | Système russe de recherche et sauvetage par satellite. Voir SARSAT       | DCS      | Système de collecte de données   |
| CPCSA   | Coordination du Programme climatologique et activités d'appui            | DEMUX    | Démultiplexeur   |
| CPR     | Radiomètre pour la physique des nuages                                   | DIFACS   | Fac-similé numérique   |
| CRC     | Code de redondance cyclique  | DIR      | Infrarouge diurne  |
| CrMIS   | Sondeur-imageur hyperfréquence à balayage croisé (NPOESS)                | DLI      | Interface de liaison descendante (DM/PM)                                     |
| CrIS    | Sondeur infrarouge à balayage croisé (NPOESS)                            | DLM      | Contrôleur de liaison descendante  |
| CRT     | Tube cathodique  | DLR      | Agence spatiale allemande (Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt)         |
| CS&C    | Commutation et commande des communications (partie TAD du système GMACS) | 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   | FIFO     | Premier entré-premier sorti  |
| DSB      | Diffusion directe des données de sondage  | FM       | Modulation de fréquence  |
| DSN      | Réseau de communications avec l'espace lointain   | FOV      | Champ  |
| DUS      | Système d'utilisation des données   | fps      | Images par seconde   |
| <b>E</b> |   | FRI      | Fréquence de répétition des impulsions   |
| E&M      | Exploitation et maintenance   | FSK      | Modulation par déplacement de fréquence  |
| EBR      | Enregistreur à faisceau d'électrons   | FSS      | Logiciel d'établissement des plans de vol                                      |
| EC/AGE   | Groupe consultatif de l'échange de données et produits météorologiques et connexes relevant du Conseil exécutif | FTM      | Fonction de transfert de modulation  |
|          |   | <b>G</b> |  |
| EDC      | Centre de données EROS  | GAME     | Expérience GEWEX sur la mousson d'Asie   |
| EDIMS    | Système de gestion des données et de l'information sur l'environnement  | GARP     | Programme de recherches sur l'atmosphère globale                               |
| EIRPSD   | Densité spectrale de puissance isotrope rayonnée équivalente  | GARS     | Système d'archivage et de restitution des satellites GOES                      |
| ELT      | Emetteur de localisation d'urgence  | GCIP     | Projet international d'échelle continentale (GEWEX)                            |
| ELV      | Lanceur non récupérable   | GDTA     | Groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale              |
| EMI      | Brouillage électromagnétique  | GEO      | Orbite géostationnaire terrestre   |
| ENSO     | <i>El Niño</i> /Oscillation australe  | GEWEX    | Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau                    |
| ENVISAT  | Satellite d'observation de l'environnement  | GHz      | Gigahertz  |
| EOS      | Satellite d'observation de la Terre   | GIEC     | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat                 |
| EPOCS    | Etudes climatologiques dans l'océan Pacifique équatorial  | GIMGSP   | Projet de système au sol GOES I-M  |
| EPS      | Capteur de particules énergétiques  | GIMTACS  | Système de télémesure et de télécommande GOES I/M                              |
| ERB      | Bilan radiatif de la Terre  | GMACS    | Système de surveillance et de contrôle GOES (remplacé par GIMTACS)             |
| ERBE     | Expérience sur le bilan radiatif de la Terre  | GMS      | Satellite météorologique géostationnaire                                       |
| ERL      | Laboratoire de recherche énergétique  | GOES     | Satellite géostationnaire d'exploitation pour l'étude de l'environnement       |
| EROS     | Satellite d'exploration des ressources terrestres   | GOMS     | Satellite météorologique d'exploitation géostationnaire                        |
| ERS      | Satellite européen de télédétection   | GOOS     | Système mondial d'observation de l'océan                                       |
| E/S      | Entrée/sortie   | GOSSP    | Groupe d'experts de la composante spatiale des systèmes mondiaux d'observation |
| ESD      | Décharge électrostatique  | GPCP     | Projet mondial de climatologie des précipitations                              |
| ESMR     | Radiomètre en hyperfréquences à balayage électrique   | GPS      | Système mondial de radiorepérage, Système de positionnement global             |
| ETA      | Heure d'arrivée prévue  | GPSOS    | Capteur d'occultation GPS  |
| ETM      | Instrument amélioré de cartographie thématique  | GRC      | Glenn Research Center, ancien Lewis Research Center (LeRC)                     |
| ETM      | Modèle d'essais techniques  | GRT      | GOES temps réel (base de données)  |
| ETS      | Satellite d'essais techniques   | GSFC     | Centre des vols spatiaux Goddard   |
| EUMETSAT | Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques                                       | GSN      | Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC                       |
| EUV      | Ultraviolet extrême   |          |  |
| <b>F</b> |   |          |  |
| FAX      | Fac-similé  |          |  |
| FC       | Fausse couleur  |          |  |
| FCC      | Composition fausse couleur  |          |  |
| FCC      | Federal Communications Commission   |          |  |
| FFT      | Transformation de Fourier rapide  |          |  |
| FI       | Fréquence intermédiaire   |          |  |

|            |  |            |   |
|------------|--|------------|---|
| GSTDN      | Ground Spaceflight Tracking and Data Network   | ITOS       | Satellite d'exploitation TIROS amélioré                                       |
| <i>G/T</i> | Rapport gain d'antenne/température de bruit du système (dB/K)                                | ITPR       | Radiomètre à infrarouge pour la mesure du profil de température               |
| GTOS       | Système mondial d'observation de l'environnement terrestre                                   | <b>J</b>   |   |
| GUAN       | Réseau de stations d'observation en altitude du SMOC   | JDIMP      | Groupe d'experts de la gestion des données et de l'information SMOC/GOOS/GTOS |
| GVAR       | Données GOES   | JERS       | Satellite japonais d'exploration des ressources terrestres                    |
| <b>H</b>   |  | JMA        | Service météorologique japonais   |
| HEPAD      | Détecteur de particules alpha et de protons à haute énergie                                  | JPL        | Laboratoire de recherche sur la propulsion                                    |
| HiRID      | Données d'imageur à haute résolution   | <b>K</b>   |   |
| HIRS       | Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution (TIROS)   | K          | Kelvin  |
| HR         | Humidité relative  | kb         | Kilobit   |
| HRIS       | Sondeur dans l'infrarouge à haute résolution ou interféromètre de sondage à haute résolution | ko         | Kilooctet   |
| HRPT       | Transmission des images à haute résolution   | kbit/s     | Kilobits par seconde  |
| Hz         | Hertz (remplace cycles par seconde)  | keV        | Kiloélectronvolt  |
| <b>I</b>   |  | kHz        | Kilohertz   |
| IASI       | Interféromètre de sondage atmosphérique dans l'infrarouge                                    | KSC        | Centre spatial Kennedy  |
| ICSAR      | International Committee for Search and Rescue  | <b>L</b>   |   |
| IEEE       | Institute of Electrical and Electronics Engineers  | LANDSAT    | Satellite américain de télédétection de la Terre                              |
| IFOV       | Champ de vision instantanée  | LANDSAT-TM | Instrument de cartographie thématique Landsat                                 |
| IFRB       | Comité international d'enregistrement des fréquences (voir BR)                               | LaRC       | Langley Research Center   |
| IGBP       | Programme international géosphère-biosphère  | LEO        | Orbite basse terrestre  |
| IGF        | Générateur d'images  | LEOP       | Phase de lancement et de début de fonctionnement en orbite                    |
| IGFOV      | Champ de vision géométrique instantanée  | LeRC       | Voir GRC  |
| INDOEX     | Expérience dans l'océan Indien   | LGSOWG     | LANDSAT Ground Station Operations Working Group                               |
| INPE       | Instituto de Pesquisas Espaciales  | LHCP       | Polarisation circulaire gauche  |
| INSAT      | Satellite de l'Inde  | LIDAR      | Détection et localisation par la lumière                                      |
| IODE       | Echange international des données et de l'information océanographiques                       | LMT        | Temps moyen local   |
| IPD        | Détecteur de présence FI (TAD)   | LOS        | Affaiblissement du signal   |
| IR         | Infrarouge   | LPA        | Amplificateur à faible puissance  |
| IRIG       | Inter-Range Instrumentation Group  | lpi        | lignes par pouce  |
| IRIS       | Spectromètre-interféromètre infrarouge   | lpm        | lignes par minute   |
| IRS        | Satellite de télédétection de l'Inde   | LRIT       | Transmission des informations à faible débit                                  |
| IRU        | Système de référence inertielle  | LRPT       | Transmission des images à faible débit  |
| ISETAP     | Intergovernmental Science Engineering & Technology Advisory Panel                            | LUT        | Table de recherche  |
| ISO        | Organisation internationale de normalisation   | LWIR       | Infrarouge de grande longueur d'onde  |
|            |  | <b>M</b>   |   |
|            |  | 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                         | NE-delta-T | Différence de température équivalente au bruit  |
| MDHS       | Système de gestion des données météorologiques            | NERC       | Conseil national de la recherche sur l'environnement  |
| MDPB       | Modulation par déplacement de phase bivalente             | NESDIS     | Service national d'information, de données et de satellites pour l'étude de l'environnement |
| MDT        | Multiplexage par division dans le temps                   | NF         | Facteur de bruit  |
| MDUS       | Station moyenne d'utilisation des données                 | NHC        | National Hurricane Center   |
| MEO        | Orbite moyenne terrestre                                  | NIR        | Infrarouge nocturne ou proche infrarouge  |
| MEPED      | Détecteur de protons et d'électrons à énergie moyenne     | NNODS      | Système de données océaniques NOAA/NOSS   |
| MetAids    | Auxiliaires de la météorologie                            | NOAA       | Administration américaine pour les océans et l'atmosphère                                   |
| METEOSAT   | Satellite météorologique géostationnaire européen         | NOS        | Etude nationale des océans  |
| METOP      | Satellite météorologique à orbite polaire européen        | NPOESS     | Système national de satellites sur orbite polaire pour l'étude de l'environnement           |
| MetSat     | Satellite météorologique                                  | NRCT       | Conseil national de recherches thaïlandais  |
| MeV        | Mégaélectronvolt  | NROSS      | Navy Remote Ocean Sensing System  |
| MeV/n      | Mégaélectronvolts par nucléon                             | NRSA       | National Remote Sensing Agency  |
| MHS        | Sondeur hyperfréquence de l'humidité                      | NRZ        | Sans retour au zéro   |
| MHz        | Mégahertz   | NRZ-L      | Sans retour au niveau zéro  |
| MIA        | Modulation d'impulsion en amplitude                       | NSI        | Navigation et superposition d'images  |
| MIC        | Modulation par impulsions codées                          | NSSFC      | National Severe Storms Forecast Center  |
| MLS        | Limbo sondeur hyperfréquences                             | NSSL       | National Severe Storms Laboratory   |
| MODEM      | Modulateur/démodulateur                                   | nT         | Nanotesla   |
| MODIS      | Spectroradiomètre imageur à résolution moyenne (NASA)     | <b>O</b>   |   |
| MOPITT     | Mesure de la pollution dans la troposphère (NASA)         | OAD        | Détermination d'attitude et d'orbite  |
| MOS        | Satellite d'observation de la mer (Japon)                 | OAR        | Bureau de la recherche océanique et atmosphérique   |
| mrad       | Milliradian   | OCTS       | Scanner de la couleur et de la température de l'océan                                       |
| MRF        | Multiplexage par répartition en fréquence                 | OMI        | Ozonomètre  |
| MSFC       | Centre des vols spatiaux Marshall                         | OMM        | Organisation météorologique mondiale  |
| MSI        | Imagerie multispectrale                                   | OMPS       | Ozone Mapping and Profiler Suite (NPOESS)   |
| MSS        | Radiomètre multispectral                                  | OOPC       | Groupe sur les observations océaniques pour l'étude du climat                               |
| MSU        | Sondeur à hyperfréquences                                 | OQPSK      | Modulation par déplacement de phase à quatre états non équilibrée                           |
| MTBF       | Temps moyen entre deux pannes                             | <b>P</b>   |   |
| MUX        | Multiplexeur  | p.-p.      | Crête à crête   |
| MW         | Volant d'inertie, onde moyenne ou mégawatt                | PA         | Amplificateur de puissance  |
| <b>N</b>   |   | PCD        | Plate-forme de collecte de données  |
| N-S        | Nord-sud  | PCM        | Programme climatologique mondial  |
| NASA       | Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace | PCV        | Programme de coopération volontaire   |
| NASCOM     | Réseau de télécommunications de la NASA                   | PDL        | Charge de données au processeur   |
| NASDA      | Agence nationale de développement spatial                 | PDR        | Retransmission des données traitées (liaison radioélectrique GVAR)                          |
| NCDC       | Centre national de données climatologiques                | PE         | Equation primitive  |
| ND         | Nœud descendant   |            |   |
| NE-delta-N | Différence de luminance énergétique équivalente au bruit  |            |   |

|          |  |                   |  |
|----------|--|-------------------|--|
| PEP      | Puissance de crête   | RHCP              | Polarisation circulaire droite   |
| PEP      | Protection contre les erreurs polynomiales (NASA)  | RLS               | Radiobalise de localisation des sinistres  |
| PFD      | Puissance surfacique   | RMS               | Moyenne quadratique  |
| PHI      | Programme hydrologique international   | ROS               | Rapport d'onde stationnaire  |
| PHO      | Programme d'hydrologie opérationnelle  | RP                | Radar de précipitations  |
| p.i.r.e. | Puissance isotrope rayonnée équivalente  | RRTDM             | Réseau régional de transmission de données météorologiques   |
| Pixel    | Élément d'image  | RS                | Réseau spatial   |
| PKM      | Moteur de périgée  | RSS               | Résultante quadratique   |
| PLL      | Boucle à verrouillage de phase   | RSU               | Groupe de la télédétection   |
| PM       | Modulation de phase  | RVB               | Rouge/vert/bleu  |
| PMASC    | Programme mondial des applications et des services climatologiques                                 | RVL               | Radar aéroporté à visée latérale   |
| PMDC     | Programme mondial des données climatologiques  | RW                | Volant de réaction   |
| PMDSC    | Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat                         | RWA               | Bloc volant de réaction  |
| PMRC     | Programme mondial de recherche sur le climat   | <b>S</b>          |  |
| PMRPT    | Programme mondial de recherche sur la prévision du temps   | s                 | Seconde  |
| PN       | Pseudo-bruit   | S/C               | Véhicule spatial   |
| PNT      | Prévision numérique du temps   | S/DA              | Sondeur/données auxiliaires  |
| PNUE     | Programme des Nations Unies pour l'environnement   | S/N <sub>0</sub>  | Rapport signal-densité de bruit  |
| POES     | Satellite à défilement pour l'étude de l'environnement   | S/N               | Rapport signal-bruit   |
| ppm      | Parties par million  | S-VAS             | Sondeur atmosphérique/radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue                              |
| PROFS    | Program for Regional Observing and Forecasting Service   | S-VISSR           | Radiomètre à balayage circulaire dans le visible et l'infrarouge à action étendue  |
| PROMET   | Groupe de travail de la fourniture des informations météorologiques requises par l'aviation civile | SAD               | Système d'accès direct   |
| PSK      | Modulation par déplacement de phase  | SAD               | Système d'acquisition des données  |
| PTT      | Poursuite, télémessure et télécommande   | SABD              | Système d'administration de base de données  |
| PWM      | Modulation d'impulsions en durée   | SAGE              | Expérience sur les aérosols et les composants gazeux mineurs de l'atmosphère   |
| <b>Q</b> |  | SAR               | Radar à ouverture synthétique ou recherche et sauvetage  |
| QC       | Contrôle de la qualité   | SARSAT            | Satellite de recherche et de sauvetage-poursuite assistée; voir COSPAS   |
| QPSK     | Modulation par déplacement de phase à quatre états   | SATCOM            | Télécommunications par satellite   |
| <b>R</b> |  | SBUV              | Rayonnement ultraviolet solaire rétrodiffusé   |
| R        | Rayleigh   | SC/OMS            | Sous-comité chargé des satellites météorologiques d'exploitation   |
| RA       | Altimètre radar  | SC/OES            | Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement   |
| R/Y      | Roulis-lacet   | SC/N <sub>0</sub> | Rapport sous-porteuse-densité de bruit   |
| R&D      | Recherche et développement   | SCHOTI            | Conférence permanente des directeurs des établissements de formation professionnelle relevant des Services météorologiques nationaux |
| RSBR     | Réseau synoptique de base régional   | SCIAMACHY         | Spectromètre d'absorption d'imagerie à balayage pour cartographie atmosphérique  |
| RCS      | Système de commande par réaction   |                   |  |
| RF       | Fréquence radioélectrique  |                   |  |
| RFI      | Brouillage radioélectrique   |                   |  |

|         |  |          |   |
|---------|--|----------|---|
| SCO     | Oscillateur de sous-porteuse   | SR-VIS   | Radiomètre à balayage-canal dans le visible                         |
| SCSMEX  | Expérience sur la mousson de la mer de Chine méridionale                         | SRS      | Station de réception au sol   |
| SDUS    | Station secondaire d'utilisation des données                                     | SSM/I    | Sondeur-imageur en hyperfréquence spécialisé                        |
| SeaWiFS | Capteur à large champ d'observation de la mer                                    | SSC      | Surveillance du système climatique                                  |
| SEM     | Appareil d'étude du milieu spatial   | SST      | Température de surface de la mer                                    |
| SET     | Satellite d'exploration de la Terre  | SSU      | Sondeur stratosphérique   |
| SETS    | Service d'exploration de la Terre par satellite                                  | STA      | Science and Technology Agency                                       |
| SEU     | Perturbation isolée  | SST      | Système spatial de transport  |
| SFS     | Service fixe par satellite   | SWH      | Hauteur significative des vagues                                    |
| SGBD    | Système de gestion de base de données  | SWIR     | Infrarouge à courte longueur d'onde                                 |
| SGLS    | Système de liaison espace-sol  | SXI      | Imageur de rayons X solaires  |
| SHN     | Service hydrologique national  | SXT      | Télescope de rayons X solaires (mission Solar-A)                    |
| SHOFM   | Système hydrologique opérationnel à fins multiples                               | <b>T</b> |   |
| SI      | Sondeur-imageur  | T/P      | Topex/Poseidon  |
| SIG     | Système d'information géographique   | T/V      | Vide thermique  |
| SIR     | Radar imageur de la navette  | T&C      | Télémetrie et télécommande  |
| SIRS    | Spectromètre satellitaire infrarouge   | TAD      | Télécommande et acquisition des données                             |
| SIT     | Equipe de mise en œuvre stratégique du CSOT                                      | TAD      | Traitement automatique des données                                  |
| SIUPM   | Système d'intervention d'urgence en cas de pollution de la mer                   | TADW     | Station de télécommande et d'acquisition des données (îles Wallops) |
| SMDSM   | Système mondial de détresse et de sécurité en mer                                | TBUS     | Code de 4 lettres pour message de données d'éphémérides             |
| SMISO   | Système mondial intégré de services océaniques                                   | TDRS     | Satellite de poursuite et d'acquisition de données                  |
| SMN     | Service météorologique ou hydrométéorologique national                           | TDRSS    | Système à satellites de poursuite et d'acquisition de données       |
| SMN     | Service météorologique national  | TEB      | Taux d'erreur sur les bits  |
| SMO     | Système mondial d'observation  | TED      | Détecteur d'énergie totale  |
| SMOC    | Système mondial d'observation du climat  | TEMS     | Système de surveillance des écosystèmes terrestres                  |
| SMS     | Service mobile par satellite   | TEMMSI   | Temps significatif  |
| SMT     | Système mondial de télécommunications  | TES      | Spectromètre d'étude des émissions de la troposphère                |
| SNR     | Rapport signal-bruit   | TIR      | Infrarouge thermique  |
| SOCC    | Spacecraft Operations Control Center   | TIP      | Processeur d'information de TIROS                                   |
| SOES    | Sous-comité chargé des satellites d'exploitation pour l'étude de l'environnement | TIROS    | Satellite d'observation télévisuelle à infrarouge                   |
| SOLAS   | Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer            | TM       | Instrument de cartographie thématique                               |
| SPM     | Capteur de protons solaires  | TMG      | Temps moyen de Greenwich  |
| SPOT    | Satellite probatoire d'observation de la Terre                                   | TMI      | Imageur en hyperfréquence TRMM                                      |
| SQPSK   | Modulation par déplacement de phase à quatre états alternée                      | TMR      | Radiomètre hyperfréquence Topex                                     |
| SPREP   | Programme régional pour l'environnement du Pacifique Sud                         | TO       | Orbite de transfert   |
| sr      | Stéradian  | TOGA     | Programme d'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe  |
| SR      | Radiomètre à balayage  | TOPC     | Groupe d'experts des observations terrestres pour l'étude du climat |
| SR-IR   | Radiomètre à balayage-canal dans l'infrarouge                                    | 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                | VISSR    | Radiomètre à balayage rotatif dans le visible et l'infrarouge                    |
| TRUCE    | Expérience sur le climat urbain dans les régions tropicales | VMM      | Veille météorologique mondiale   |
| TV       | Vide thermique ou télévision                                | VOS      | Navire d'observation bénévole  |
| TVM      | Mode VAS transparent  | VREC     | Enregistreur de données de radiomètre à très haute résolution                    |
| <b>U</b> |   | VTPR     | Radiomètre du profil vertical de température                                     |
| UCT      | Unité centrale de traitement                                | <b>W</b> |  |
| UHF      | Ondes décimétriques   | WAFC     | Centre mondial de prévisions de zone   |
| UIT      | Union internationale des télécommunications                 | WEFAX    | Transmission de données météorologiques en fac-similé                            |
| UIT-R    | Secteur des radiocommunications de l'UIT (remplace le CCIR) | WHYCOS   | Système mondial d'observation du cycle hydrologique                              |
| μrad     | Microradian   | WSFO     | Weather Service Forecast Office  |
| μs       | Microseconde  | WSFO-Tap | Liaison de communications au sol du WSFO pour la retransmission des données GOES |
| UTC      | Temps universel coordonné                                   | <b>X</b> |  |
| UV       | Ultraviolet   | XBT      | Bathythermographe non récupérable  |
| <b>V</b> |   | XRI      | Imageur de rayons X  |
| VAG      | Veille de l'atmosphère globale                              | XRS      | Capteur de rayons X (solaires)   |
| VAS      | Sondeur atmosphérique du VISSR                              | <b>Y</b> |  |
| VDB      | Base de données du VISSR                                    | <b>Z</b> |  |
| VDUC     | Centre d'utilisation des données VAS                        | Z        | Notation courante du temps universel ou du temps moyen de Greenwich              |
| 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  |          |  |

