

RECOMMANDATION UIT-R SA.1165-1

**CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET CRITÈRES DE QUALITÉ
DE FONCTIONNEMENT DES RADIOSONDES UTILISÉES DANS LE SERVICE
DES AUXILIAIRES DE LA MÉTÉOROLOGIE**

(Question UIT-R 144/7)

(1995-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les mesures effectuées dans la haute atmosphère par des radiosondes sont un élément essentiel du Programme de veille météorologique mondiale de l'Organisation météorologique mondiale (OMM);
- b) que de nombreux services du secteur de la défense utilisent des radiosondes pour effectuer diverses opérations indépendamment du Programme de veille météorologique mondiale;
- c) qu'un grand nombre de radiosondes sont actuellement utilisées pour la surveillance locale et régionale de la pollution atmosphérique ainsi que pour suivre la trajectoire d'émanations dangereuses provenant de catastrophes d'origine naturelle ou humaine;
- d) que les radiosondes exploitées dans le service des auxiliaires de la météorologie ont des besoins de radiocommunications spécifiques;
- e) que ces besoins se répercutent sur les assignations et d'autres aspects de la réglementation;
- f) que les radiosondes utilisées dans le service des auxiliaires de la météorologie sont embarquées à bord de ballons et de fusées et peuvent être exploitées avec des stations installées au sol ou à bord de navires;
- g) que d'autres types de radiosondes utilisées dans le service des auxiliaires de la météorologie sont lancées d'aéronefs et fonctionnent avec des stations placées à bord de ces aéronefs;
- h) que les objectifs de qualité de fonctionnement des liaisons établies avec les radiosondes doivent être compatibles avec les caractéristiques fonctionnelles demandées et les limitations associées aux systèmes et aux bandes de fréquences dans lesquelles les besoins doivent être satisfaits;
- j) que les objectifs de qualité de fonctionnement des systèmes représentatifs exploités dans le service des auxiliaires de la météorologie ont valeur de directives pour la mise au point des systèmes devant être exploités dans des conditions de partage des fréquences;
- k) que les objectifs de qualité de fonctionnement des divers systèmes peuvent être définis à l'aide d'une méthodologie semblable à celle qui est décrite dans la Recommandation UIT-R SA.1021;
- l) qu'il faut définir des objectifs de qualité de fonctionnement pour être en mesure de formuler des critères de brouillage,

recommande

- 1** de tenir compte des caractéristiques exposées à l'Annexe 1 pour les questions techniques et opérationnelles d'assignation de fréquence et de réglementation concernant les systèmes auxiliaires de la météorologie et leur interaction avec les autres services;
- 2** d'adopter pour les systèmes utilisés dans le service des auxiliaires de la météorologie les objectifs de qualité de fonctionnement spécifiés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Objectifs de qualité de fonctionnement des liaisons du service des auxiliaires de la météorologie

Bande de fréquences (MHz), plate-forme réceptrice Antenne	Fonction, plate-forme émettrice, antenne	Modulation et largeur de bande	Angle d'élévation de l'antenne de réception (degrés)	Portée maximale réelle (km)	Rapport $C/(N+I)$ minimal (dB)	Puissance de l'émetteur (dBW)	Altitude maximale de l'émetteur (km)	Taux de disponibilité des liaisons requis (%)
400,15-406 Récepteur au sol ou à bord d'un navire	Acquisition directe de données émises par un ballon radiosonde	MF 280-480 kHz	0 à 90	300	12	-6,0	36	99
400,15-406 Récepteur à bord d'un aéronef	Acquisition directe de données émises par une catasonde pendant la descente	MF numérique 20 kHz	-3 à -90	350	12	-8,2	20	99
400,15-406 Récepteur à bord d'un ballon	Réception du signal de télémétrie par un récepteur à bord d'un ballon	MF 300 kHz	-3 à -90	250	12	3,0	Emetteur au sol	99
1 668,4-1 700 Récepteur au sol Antenne à gain élevé	Acquisition directe de données émises par un ballon radiosonde	MA -40 dBc: 0,5 MHz -50 dBc: 1,0 MHz	3 à 90	250	12	-6,0	36	99
1 668,4-1 700 Récepteur au sol Antenne à gain élevé	Acquisition directe de données émises par un ballon radiosonde	MF 180 kHz	3 à 90	250	12	-6,0	36	99

ANNEXE 1

1 Introduction

1.1 Opérations météorologiques journalières

Les radiosondes permettent principalement d'effectuer in situ, dans la haute atmosphère, des mesures de divers paramètres météorologiques (pression, température, humidité relative, vitesse et direction du vent) jusqu'à une altitude de 36 km. Ces mesures sont indispensables pour les fonctions de prévision du temps assurées par les différents pays (et, par conséquent, pour les services d'alerte météorologique grave destinés au public en vue de la protection des personnes et des biens). Les radiosondes et les systèmes de poursuite associés réalisent des mesures simultanées de la structure verticale de la température, de l'humidité relative ainsi que de la vitesse et de la direction des vents sur toute la plage de hauteurs spécifiée. Les variations verticales de ces paramètres météorologiques fournissent la majeure partie des informations indispensables pour la prévision du temps. Les radiosondes constituent le seul système d'observation météorologique capable d'offrir régulièrement la résolution verticale dont les météorologues ont besoin pour les quatre paramètres précités. Il est de la plus haute importance de déterminer les hauteurs auxquelles un paramètre subit de brusques changements. Par conséquent, il est primordial de maintenir la fiabilité des mesures pendant tout le cycle de fonctionnement de la radiosonde.

Les radiosondages sont effectués par des radiosondes installées à bord de ballons ascensionnels lancés à partir de stations terrestres ou de navires ou par des catasondes lancées d'aéronefs et freinées par un parachute. La plupart des pays procèdent régulièrement à des radiosondages, à raison de deux à quatre lancers par jour. Les informations sont ensuite diffusées immédiatement à tous les pays dans un délai de quelques heures. Les systèmes d'observation et de diffusion des données relèvent tous du Programme de veille météorologique mondiale de l'OMM.

Le réseau de radiosondes représente donc la principale source mondiale de mesures effectuées in situ et en temps réel. Selon les règlements de l'OMM (Manuel du système mondial de traitement de données (SMTO)), les mesures effectuées par les auxiliaires de la météorologie doivent être réalisées et diffusées à tous les centres SMTO dans le monde (niveaux national, régional et mondial) en vue de la prévision numérique du temps. D'ici à l'an 2005, les observations devront être effectuées à une résolution horizontale inférieure ou égale à 250 km et à raison d'une à quatre fois par jour, ce qui constitue, à l'échelle mondiale, un objectif raisonnable pour les systèmes de radiosondage. Toutefois dans la réalité, les modèles de prévision numérique du temps exigeront que, à l'horizon 2005, les observations dans la haute atmosphère soient effectuées à des intervalles compris entre une et trois heures et avec une résolution horizontale de 50 à 100 km, selon que les prévisions seront faites à l'échelle planétaire ou à une échelle régionale plus limitée. Ces informations doivent être transmises par divers systèmes d'observation choisis en fonction des besoins de l'administration nationale et comprennent les mesures effectuées par les auxiliaires de la météorologie, les radars profileurs de vent ou les satellites.

Les radiosondages sont indispensables pour maintenir la stabilité du système d'observation mondial mis en place par l'OMM. Les mesures recueillies par télédétection par les satellites n'indiquent pas la résolution verticale fournie par les radiosondes. Pour déterminer la structure verticale de la température à l'aide des mesures obtenues par satellite, il est généralement nécessaire d'initialiser les calculs directement à partir des statistiques établies par radiosonde ou à partir de la prévision météorologique numérique elle-même. Dans le second cas, les mesures par radiosonde assurent que la structure verticale reste précise et stable dans le temps. Par ailleurs, les mesures par radiosonde permettent d'échantillonner, au moyen de diverses techniques, les observations effectuées par satellite. On considère donc les radiosondages comme étant indispensables, dans un avenir prévisible, pour l'activité météorologique.

1.2 Surveillance des changements climatiques

Au cours des vingt dernières années, la température de l'atmosphère et l'ozone atmosphérique ont subi de grands changements partout dans le monde, les modifications les plus importantes ayant eu lieu en majorité à des hauteurs comprises entre 12 et 30 km au-dessus de la surface de la Terre. L'ampleur de ces changements est suffisante pour inspirer des inquiétudes pour la santé publique dans le futur. Des radiosondages effectués régulièrement chaque jour à des hauteurs supérieures à 30 km permettent de déterminer la répartition verticale des changements et donc d'établir les causes des changements à évaluer. Les mesures de l'ozone effectuées par sonde à des hauteurs similaires permettent de déterminer la structure verticale de l'appauvrissement de l'ozone, phénomène qui semble actuellement se produire en hiver et au printemps dans l'hémisphère nord comme dans l'hémisphère sud. A l'heure actuelle, un grand nombre de pays lancent des sondes pour mesurer l'ozone au moins trois fois par semaine en hiver et au printemps afin de surveiller l'évolution de la couche d'ozone.

Pour être efficace, l'échantillonnage des changements climatiques doit être effectué au moyen de radiosondes pour lesquelles les caractéristiques des erreurs systématiques sont connues. La nécessité d'assurer la continuité dans le temps des mesures effectuées dans la haute atmosphère à l'échelle du globe signifie que les nouveaux modèles de radiosondes ne sont mis en service qu'après plusieurs années d'essais intensifs en laboratoire et dans l'atmosphère libre.

1.3 Utilisation dans le secteur de la défense

Les radiosondes sont utilisées en grand nombre dans le secteur de la défense de tous les pays dotés d'une infrastructure qui leur permet de procéder à des opérations de défense modernes (sur terre et sur mer). L'utilisation de radiosondes ne tend pas à diminuer, étant donné qu'il est maintenant bien plus facile, avec l'automatisation moderne, d'exploiter des systèmes mobiles pour les zones de combat et des systèmes embarqués à bord de navires sans qu'il soit nécessaire de recourir à des opérateurs hautement qualifiés et à un important matériel logistique. Les radiosondages à usage civil doivent pouvoir être utilisés pour la défense nationale, ce qui élargit le spectre des fréquences radioélectriques requis. Cet aspect est particulièrement important lorsque les sites de lancement de la défense nationale se trouvent dans un rayon de 150 km des sites civils.

1.4 Autres utilisateurs

Les instituts de recherche nationaux peuvent également recourir à des radiosondes, indépendamment des principaux organismes de météorologie du secteur civil. Les recherches peuvent porter sur la pollution de l'environnement, l'hydrologie, la radioactivité dans l'atmosphère libre, des phénomènes météorologiques importants (blizzards, ouragans, orages, etc.) et certaines propriétés physiques et chimiques de l'atmosphère.

2 Champ d'application des radiosondages

Dans le secteur civil, les radiosondages sont effectués dans le cadre de programmes mondiaux qui permettent de fournir les données d'observation indispensables à la prévision journalière du temps. Les observations standard sont en théorie effectuées à 0000 et 1200 UTC, mais les heures de lancement réelles varient d'un pays à un autre et, dans certains cas, les mesures sont faites au moins quarante cinq minutes avant l'heure théorique. Les lancements peuvent également avoir lieu jusqu'à deux heures après l'heure théorique, si des problèmes surgissent dans la préparation de la radiosonde avant le vol, si la réglementation du trafic aérien d'un pays limite les heures de lancement ou si une défaillance se produit pendant le vol initial. Par ailleurs, certains pays procèdent régulièrement à des observations intermédiaires à 0600 et 1800 UTC.

Les réseaux de radiosondes sont mis en place et exploités par les services nationaux de météorologie conformément aux pratiques et procédures recommandées, convenues au plan international dans le cadre de l'OMM. Le nombre des stations de radiosondage transmettant régulièrement des observations est de l'ordre de 900. Environ 800 000 radiosondes sont lancées chaque année dans le cadre du réseau de l'OMM, sans compter les radiosondes exploitées dans le secteur de la défense ou destinées à des applications spécialisées, dont le nombre est estimé à 400 000. En raison des coûts d'exploitation, le niveau actuel d'utilisation des radiosondes ne répond pas de manière adéquate aux besoins météorologiques.

Des radiosondes et catasondes supplémentaires sont périodiquement lancées, souvent à partir de sites temporaires et au moyen de systèmes mobiles, lorsqu'il existe des conditions météorologiques anormales ou lorsque des essais sont nécessaires.

3 Spectre radioélectrique utilisé dans le cadre des activités de l'OMM

3.1 Résultats d'une étude de l'OMM

Le Tableau 2 présente une estimation des fréquences radioélectriques utilisées par les stations de radiosondage du secteur civil qui transmettent chaque jour des informations destinées à l'activité météorologique de l'OMM. Les renseignements donnés dans ce tableau proviennent d'une étude récente de l'OMM, dont on a regroupé les résultats par région pour montrer les diverses fréquences utilisées dans le monde. Des renseignements plus détaillés figurent dans le catalogue de l'OMM concernant les radiosondes et les systèmes de détection des vents en altitude, actuellement utilisé par les Membres. Les propositions visant à segmenter les bandes doivent tenir compte du fait que les bandes attribuées, à l'échelle internationale et à titre primaire, aux auxiliaires de la météorologie ne sont pas disponibles pour ce service dans tous les pays. En Australie par exemple, la moitié au moins de la bande de fréquences 400,15-406 MHz ne peut pas actuellement être utilisée par les services nationaux de météorologie pour les auxiliaires de la météorologie.

TABLEAU 2

**Récapitulatif des fréquences radioélectriques utilisées par les radiosondes
dans les opérations quotidiennes du secteur civil**

Région	Nombre total de sites	Nombre de sites utilisant la fréquence 400 MHz	Nombre de sites utilisant la fréquence 1 680 MHz	Nombre de sites utilisant la fréquence 1 780 MHz
Europe et Russie occidentale	214	111	11	92
Asie et Russie orientale	265	159	32	74
Afrique	65	53	12	–
Amérique du Nord	174	50	122	2
Amérique du Sud et Antarctique	64	50	12	2
Australie et Océanie	87	65	22	–
Systèmes à bord de navires	25	16	1	8
Total	894	504	212	178

Les systèmes fonctionnant à 1 680 MHz sont principalement exploités ou fournis par les Etats-Unis d'Amérique et le Japon. La Russie et certains états qui ont conclu des accords de coopération utilisent la fréquence 1 780 MHz. Il est probable que cette fréquence cessera d'être utilisée par les pays susmentionnés pour des raisons de compatibilité avec le matériel fourni par d'autres pays. La plupart des systèmes fonctionnant à 400 MHz ont été installés au cours des dix dernières années, les principales exceptions étant certains systèmes exploités en Asie, qui utilisent encore des émetteurs à large bande beaucoup plus anciens.

Les systèmes fonctionnant à 1 680 et à 400 MHz sont utilisés pour les radiosondages effectués dans le secteur de la défense.

Le Tableau 3 indique les différents systèmes servant dans chaque région à la détection des vents en altitude. Pour en faciliter l'interprétation, on a regroupé ces systèmes en trois catégories.

Systèmes de détection des vents au moyen d'aides à la navigation : ces systèmes ont un degré élevé d'automatisation et suivent la radiosonde au moyen de signaux de radiolocalisation émis par des systèmes internationaux. Tous fonctionnent à 400 MHz:

- Radars de poursuite primaires: la mesure de position y est effectuée indépendamment des réponses de la radiosonde. Tous ces systèmes fonctionnent également à 400 MHz.
- Radiothéodolites ou radars secondaires: avec ces systèmes, la poursuite est effectuée en fonction d'une combinaison de mesures directionnelles émises par le site de lancement associées à une mesure de hauteur fournie par la radiosonde ou à une réponse du répondeur aux impulsions émises par la station au sol. Ces systèmes peuvent être des systèmes à large bande fonctionnant à 400 et à 1 780 MHz ou des systèmes fonctionnant à 1 680 MHz.
- Les systèmes NAVAJD, les radars primaires et les radiothéodolites peuvent être utilisés pour les systèmes de défense. Les applications à bord de navires ont généralement recours aux systèmes NAVAJD.

TABLEAU 3

**Récapitulatif des systèmes de détection des vents utilisés pour
les radiosondages dans le secteur civil**

Région	Nombre total de sites	Nombre de sites utilisant des systèmes d'aide à la navigation	Nombre de sites utilisant des radars primaires	Nombre de sites utilisant des radiothéodolites ou des répondeurs
Europe et Russie occidentale	214	86	24	104
Asie et Russie orientale	265	37	21	207
Afrique	65	41	11	13
Amérique du Nord	174	50	–	124
Amérique du Sud et Antarctique	64	31	2	31
Australie et Océanie	87	22	43	22
Systèmes à bord de navires	25	16	–	9
Total	894	283	101	510

3.2 Spectre radioélectrique occupé en Europe

En Europe du Nord et de l'Ouest, le réseau de stations de radiosondage qui est dense est utilisé pour l'activité météorologique courante, le contrôle de l'environnement et diverses activités de la défense nationale. La plupart des radiosondes fonctionnent dans la bande 400,15-406 MHz. Une étude a été réalisée à la fin de 1995 sur le spectre radioélectrique effectivement occupé pendant un an par un réseau de radiosondes exploité à des fins civiles en Europe du Nord et de l'Ouest (voir la Fig. 1). Dans plusieurs régions, les stations civiles se trouvent à 150 km des sites du secteur de la défense. Dans un pays en particulier, les radiosondes à usage civil utilisent des émetteurs à 400 MHz avec, pendant le vol, une variation de fréquence type de 10 kHz, bien que dans un petit nombre de vols, la variation de fréquence puisse atteindre ± 100 kHz. Ces radiosondes ont été retenues par le fabricant pour leur plus grande stabilité et en raison de l'ajout d'une prime à leur prix d'achat.

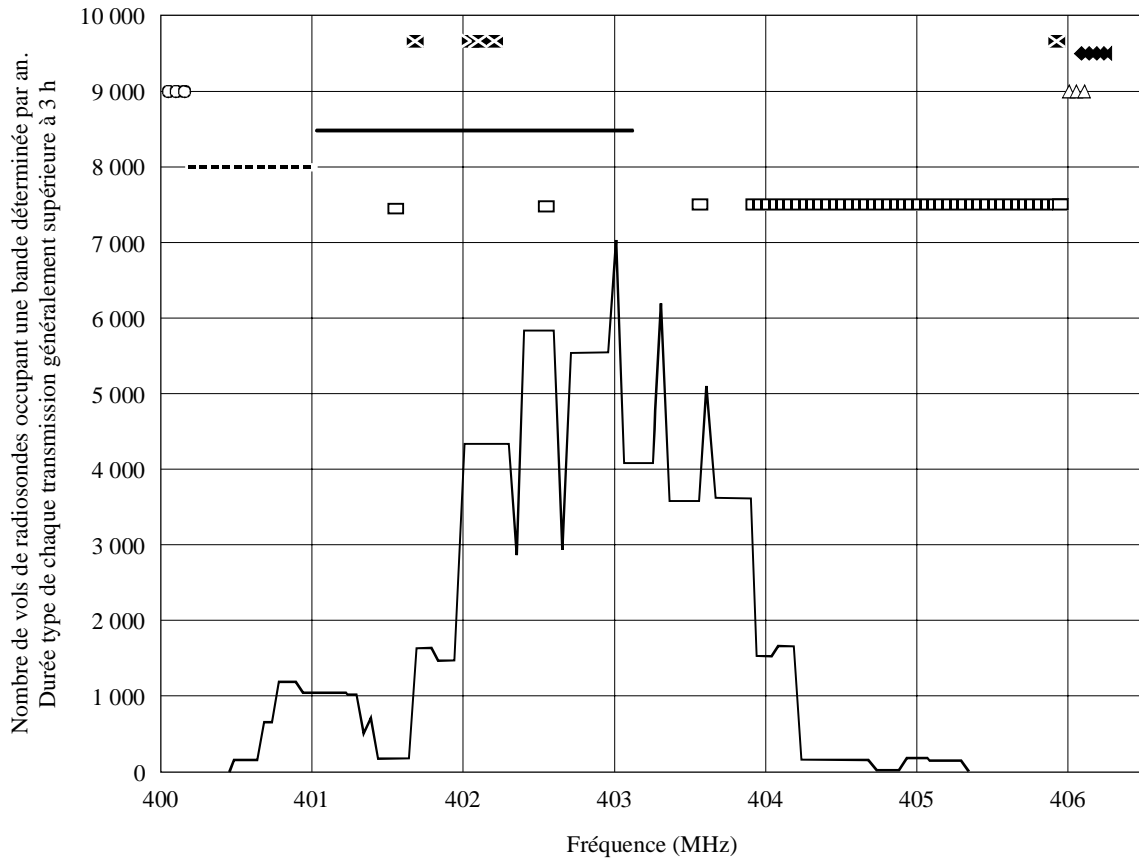
Dans l'exemple donné, les radiosondes utilisées dans le secteur de la défense fonctionnaient sur la fréquence 400 MHz avant que les radiosondes du secteur civil abandonnent la fréquence 28 MHz en 1990. Les fréquences utilisées dans le secteur civil (voir la Fig. 1) ont été choisies compte tenu des utilisations du secteur de la défense. Le degré d'occupation du spectre indiqué est représentatif des grands pays de l'Europe occidentale.

En 1995, le même pays a acquis, pour les auxiliaires de la météorologie du secteur de la défense, du matériel supplémentaire qui occupe à peu près 4 MHz sur le spectre, entre 1 678 et 1 686 MHz environ.

3.3 Spectre radioélectrique occupé aux Etats-Unis d'Amérique

Aux Etats-Unis d'Amérique, le service de météorologie civil est actuellement le principal utilisateur de la bande des 1 680 MHz réservée aux auxiliaires de la météorologie. Les systèmes de défense et certains utilisateurs du secteur de la recherche utilisent la bande des 400 MHz. Bien que la bande 1 668,4-1 700 MHz soit attribuée au service des auxiliaires de la météorologie, la Fig. 2 montre comment la bande est actuellement utilisée. Une coordination efficace des opérations avec d'autres utilisateurs de la bande permet d'éviter les brouillages, et ce, en limitant les auxiliaires de la météorologie à une partie bien plus réduite de la bande. La partie restante utilisée par les auxiliaires de la météorologie est indispensable pour prendre en charge les dérives de fréquence des émetteurs, les vols jumelés, les seconds lâchers et les brouillages entre des stations adjacentes.

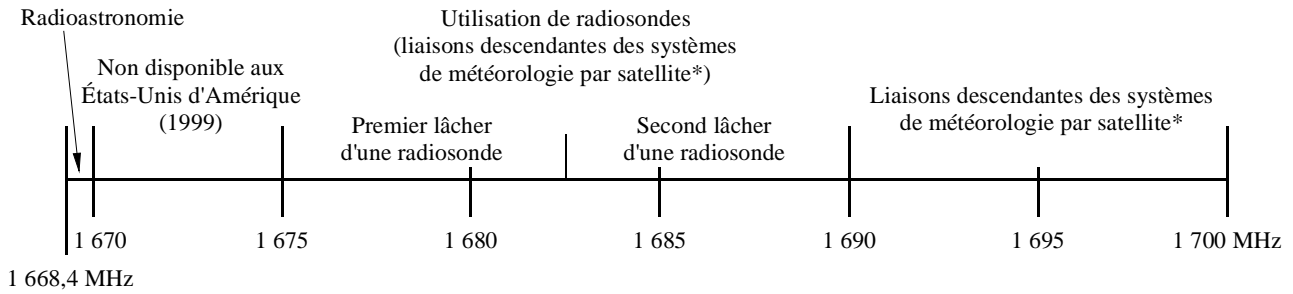
FIGURE 1
 Estimation du spectre radioélectrique occupé pendant une année par un réseau de radiosondes type du secteur civil dans le nord-ouest de l'Europe



- Radiosonde à usage civil
- △ Sarsat, Terre-espace
- Satellite météorologique, Terre-espace
- ◆ Radioastronomie
- Radiosonde à usage militaire et autre
- - - - Satellite météorologique, espace-Terre
- Fréquences étalon et signaux horaires
- ⊗ Plates-formes de collecte de données météorologiques

FIGURE 2

**Utilisation actuelle de la bande 1 668,4-1 700 MHz réservée
aux auxiliaires de la météorologie (États-Unis d'Amérique)**



* Le nombre et l'emplacement des stations de systèmes de météorologie par satellite fonctionnant à plus de 1 690 MHz ne sont plus connus. La densité des stations fonctionnant à moins de 1 690 MHz est faible et leur emplacement est connu. Des radiosondes de 400 MHz sont utilisées dans la haute atmosphère à des sites proches des emplacements connus.

1165-02

Aux États-Unis d'Amérique, une étude récente sur l'utilisation de radiosondes dans la bande 400,15-406 MHz confirme que le secteur de la défense exploite de nombreux systèmes. Au moins 40 autres systèmes sont utilisés par les universités ou d'autres organismes américains. Certains de ces systèmes sont utilisés en groupes avec un espacement horizontal inférieur à 250 km, dans le cadre de recherches à long terme effectuées dans des centres scientifiques nationaux.

Les responsables du secteur de la défense américain ont indiqué que ce secteur occuperait 12 canaux de la bande 401-406 MHz dans le futur et on estime que quatre autres canaux au moins seront nécessaires pour d'autres organismes. A Wallops Island (Virginie), le service de météorologie exploite une station opérationnelle dans cette bande pour éviter que des brouillages se produisent dans la bande des 1 680 MHz avec l'une des principales installations de télécommande et d'acquisition de données du système de météorologie par satellite, située à proximité de la station de radiosondage.

TABLEAU 4

**Utilisation par des radiosondes de fréquences radioélectriques dans la
bande 400,15-406 MHz pour des utilisateurs autres que ceux du
Programme de veille météorologique mondiale (États-Unis d'Amérique)**

	Système NAVAIID Omega	Système NAVAIID Loran	Total
Défense des États-Unis d'Amérique (territoire national)	294	81	375
Défense des États-Unis d'Amérique (à l'étranger)	62	3	65
Autres utilisateurs aux États-Unis d'Amérique	4	40	44
Total	360	124	484

4 Caractéristiques de fonctionnement

En dehors de la précision, les principales caractéristiques que doivent présenter les radiosondes sont la fiabilité, la solidité, la légèreté et la compacité. On recherche également une faible consommation électrique. Du fait qu'une radiosonde n'est en général utilisée qu'une fois, sa production doit être, par conception, peu onéreuse. La facilité et la stabilité de réglage sont également des éléments importants. Une radiosonde doit pouvoir fournir des données sur au moins 200 km, et fonctionner à des températures comprises entre -90 °C et $+60\text{ °C}$. Comme la tension d'un accumulateur varie en fonction du temps et de la température, la radiosonde doit accepter de telles variations sans dépassement des tolérances de précision et de dérive de fréquence. Les équipements associés au sol ne doivent pas être trop complexes, ni exiger des opérations de maintenance hautement spécialisées et fréquentes. Il est toutefois préférable de concevoir des radiosondes aussi simples que possible, au prix éventuellement d'un surcroît de complexité au niveau des équipements au sol, puisque les problèmes de pannes au sol sont plus faciles à régler et que le coût des équipements de vol doit être minimisé.

Le principal facteur limitatif des radiosondages est le coût. Dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), un radiosondage coûte environ 400 ECU, dont 25% pour la seule radiosonde. La ventilation des coûts est sensiblement différente dans les pays en développement, où le coût de la radiosonde est le principal élément. Du fait que les besoins en données météorologiques sont mondiaux, certains pays développés font don de systèmes et de radiosondes aux pays en développement pour assurer la continuité des observations dans la haute atmosphère. Il est donc impératif de faire en sorte que le prix des radiosondes soit aussi bas que possible, si l'on veut être en mesure de continuer à procéder aux observations vitales dans le domaine de la météorologie opérationnelle, notamment en ce qui concerne la protection de la vie humaine. Dans le coût total d'une radiosonde, les capteurs et les systèmes de détection des vents représentent la majeure partie de la dépense, alors que les émetteurs, maintenus aussi simple que possible, ne sont jamais très onéreux. Le coût des émetteurs représente en effet environ 15%-35% du budget d'équipement électronique actuel d'une radiosonde.

Dans une opération de radiosondage complète, l'ascension dure environ 90 min, la descente, avec un parachute, étant deux fois plus rapide. La radiosonde continue en général d'émettre pendant la descente. La portée maximale, pour une bonne réception, est d'environ 200 à 350 km. La vitesse ascensionnelle est d'environ 5 m/s, et la trajectoire dépend du vent. En général, dans un rayon d'environ 400 à 650 km autour de la station de radiosondage, on ne peut pas utiliser la même fréquence de la liaison descendante. Dans les zones à forte densité, plus d'une dizaine d'opérateurs sont répartis dans la zone effective couverte par une radiosonde.

En Europe de l'Ouest et du Nord, le réseau de stations de radiosondage est dense. Les services de météorologie, de contrôle de l'environnement et de recherche, ainsi que la défense nationale, se partagent la bande de fréquences avec les services d'observation synoptique. Il est nécessaire de coordonner les opérations pour éviter les brouillages entre les radiosondes de différentes stations.

5 Tendances

Les bandes de 403 et 1 680 MHz réservées au service des auxiliaires de la météorologie continueront probablement à être utilisées pour les radiosondages. Les facteurs suivants devraient être déterminants dans le choix du système.

5.1 Vents en altitude très forts

La force moyenne des vents en altitude varie selon le lieu géographique. Au Japon et dans de nombreuses régions côtières du nord-ouest de l'Europe, les vents soufflant entre la surface et une hauteur de 16 km sont en moyenne beaucoup plus forts que dans la plupart des autres régions de l'hémisphère nord. La situation s'aggrave pour les radiosondages dans le nord-ouest de l'Europe car à des latitudes élevées et pendant une grande partie de l'hiver, il est fréquent que les vents soufflant entre 16 et 30 km soient même plus forts que dans les couches inférieures. La poursuite des radiosondes doit donc être régulièrement effectuée à des distances bien supérieures à 150 km, avec de très faibles angles d'élévation. Les vents forts peuvent persister pendant plusieurs semaines et des écarts importants apparaissent dans les relevés climatiques si les radiosondages effectués en altitude ne peuvent pas être transmis pendant cette période.

En hiver, les observations sont très importantes pour l'étude de l'appauvrissement de la couche d'ozone et il est primordial que les radiosondes ou les sondes pour l'ozone utilisées dans la haute atmosphère transmettent le plus d'informations possible. La meilleure réception qui est assurée à 403 MHz est donc considérée comme étant de la plus haute importance pour les radiosondages effectués dans ces conditions, quel que soit le moyen utilisé pour mesurer les vents en altitude (NAVAID ou radars primaires).

Dans les régions où la vitesse des vents est le plus souvent élevée, il est donc préférable, pour deux raisons, d'utiliser la bande des 400 MHz pour les auxiliaires de la météorologie. Premièrement, les caractéristiques de propagation à 400 MHz assurent des liaisons plus fiables sur de grandes distances. Deuxièmement, la propagation par trajets multiples limite la précision des radiothéodolites lorsque les angles d'élévation sont proches de l'horizon. Ainsi, pour obtenir des mesures précises du vent dans les conditions difficiles précitées, il est indispensable de recourir à un système NAVAID de 400 MHz, même si le coût du système mondial de positionnement (GPS) risque d'être élevé.

5.2 Efficacité accrue du personnel grâce à des systèmes hautement automatisés

Au cours de la dernière décennie, de nombreux services nationaux de météorologie dans le monde ont opté pour des systèmes de détection des vents fondés sur des NAVAID (Oméga ou Loran-C) fonctionnant à 403 MHz, dans le but d'accroître l'efficacité du personnel chargé des opérations. Le coût supplémentaire de la radiosonde utilisée dans ce système a été compensé par d'importants gains de productivité car les opérations sont effectuées par une seule personne, ainsi que par une notable réduction de la maintenance du système au sol. Aux Etats-Unis d'Amérique, le coût du maintien d'une personne in situ à des fins de maintenance et de réparation ne constitue pas un élément critique, étant donné que cette personne assume également d'autres fonctions et doit être de toute manière disponible.

Il convient de noter que le coût des radiosondes GPS sans code actuellement mises au point ne s'est pas encore stabilisé et qu'il est généralement le double de celui des systèmes NAVAID Oméga et Loran existants. Cela étant, le prix de ces radiosondes pourra se stabiliser à 30%-50% au-dessus du prix des systèmes NAVAID actuels, lorsque leur technologie sera plus au point et leur production plus intensive. Les autres systèmes NAVAID terrestres classiques devraient cesser d'être exploités entre 1997 et 2001 dans la plupart des pays. Il est donc possible que des pays qui utilisent actuellement la fréquence 403 MHz reviennent aux radiothéodolites fonctionnant à 1 680 MHz si le coût des radiosondes GPS est sensiblement plus élevé que celui des radiosondes NAVAID actuelles. Les radiosondes GPS fonctionnant à 403 MHz doivent être utilisées dans les régions où les vents en altitude sont souvent très forts. On peut continuer à recourir à des radiosondes Loran dans les régions du monde où se poursuivent des opérations faisant appel au système Loran.

Certains fabricants étudient la possibilité d'utiliser, pour la détection des vents, des radiosondes d'aide à la navigation fonctionnant dans la bande des 1 680 MHz.

5.3 Faible coût des radiosondes

Il est conseillé d'utiliser la bande des 1 680 MHz dans les pays où les vents forts ne sont pas fréquents et/ou lorsque le coût qu'entraînerait l'utilisation des futures radiosondes GPS fonctionnant dans la bande des 400 MHz réservée aux auxiliaires de la météorologie est un facteur non négligeable. Compte tenu de la réduction de la partie du spectre utilisable par les auxiliaires de la météorologie, il sera peut-être nécessaire de mettre au point des systèmes équipés d'émetteurs plus stables et fonctionnant dans une largeur de bande plus réduite. Les coûts de développement des nouveaux systèmes se répercuteront sur le prix des radiosondes et il faudra peut-être plusieurs années pour que l'utilisateur puisse bénéficier des économies réalisées grâce à une production à grande échelle.

Les radiosondes utilisées dans l'activité météorologique en association avec des radiothéodolites ou des radars primaires constituent le modèle le plus simple et offrent, de ce fait, le coût unitaire le plus bas. Certes, l'installation d'une station au sol plus complexe entraîne des frais initiaux plus élevés, mais des économies peuvent être réalisées au niveau du coût d'exploitation annuel en cas d'acquisition d'un grand nombre de radiosondes et lorsque les dépenses de main-d'oeuvre ne sont pas un élément critique.

5.4 Indépendance à l'égard des systèmes internationaux d'aide à la navigation

Il peut également exister, dans certains pays, une prescription nationale selon laquelle les systèmes de sondage utilisés dans la haute atmosphère doivent pouvoir fonctionner indépendamment des systèmes internationaux NAVAID, qui risquent de ne pas être disponibles en période d'urgence. Dans de telles situations, l'utilisation de radiothéodolites fonctionnant dans la bande des 1 680 MHz ou le recours à des radars primaires de 403 MHz constituent des options réalisables.

5.5 Possibilité de rationaliser l'occupation du spectre grâce à une amélioration des radiosondes

Les pays de l'Europe de l'Ouest qui exploitent des réseaux denses ont été récemment obligés d'utiliser des émetteurs commandés par quartz ou des émetteurs stables spécialement choisis pour réaliser les opérations courantes. Cette amélioration de l'utilisation du spectre est intervenue au cours de la dernière décennie.

En raison de l'abandon du système de radionavigation Omega, une transition importante doit s'opérer à l'horizon 1997-1998 dans les systèmes de détection des vents utilisés pour le service des auxiliaires de la météorologie. Une autre méthode devra remplacer cette fonction.

Une des possibilités est de passer à un système de détection des vents fondé sur le GPS. On ne sait pas encore clairement quelles seront les caractéristiques exactes de ces systèmes, mais les radiosondes GPS servant à la détection des vents fonctionneront probablement sur une largeur de bande réduite (qui peut descendre à 200 kHz si les opérateurs peuvent en assumer le coût et éventuellement à terme à 60 kHz, si cela est nécessaire dans des réseaux très denses où les coûts sont déjà sensiblement plus élevés que la moyenne). La qualité de fonctionnement de ces radiosondes GPS sera égale ou supérieure à celle des radiosondes existantes.

Certaines régions du monde ont toujours recours au système Loran-C et d'autres passeront à ce système. Bien que cela soit moins onéreux que de passer au GPS, il sera difficile d'exploiter un réseau extrêmement dense (avec un espacement de 100 km) en raison de la grande largeur de bande requise par les radiosondes Loran-C.

Par ailleurs, l'OMM encourage les régions qui utilisent des radars à très large bande pour la détection des vents à mettre en place des systèmes à bande étroite, compte tenu de la nécessité d'utiliser le spectre radioélectrique en partage avec d'autres systèmes.

Les systèmes fonctionnant à 1 680 MHz ne sont pas encore utilisés dans les réseaux où l'espacement est aussi réduit et il n'est pas encore exigé des principaux fournisseurs qu'ils mettent au point des émetteurs dotés de la stabilité correspondante. Il est donc possible, dans une certaine mesure, d'utiliser le spectre de manière efficace dans cette bande, étant donné que des modifications peuvent être apportées sur une échelle de temps qui n'entraîne pas une augmentation notable du coût des radiosondes.

Les propositions visant à segmenter les bandes doivent tenir compte du fait que les bandes attribuées, à l'échelle internationale et à titre primaire, aux auxiliaires de la météorologie ne sont pas disponibles pour ce service dans tous les pays. En Australie par exemple, la moitié au moins de la bande de fréquences 400,15-406 MHz ne peut pas actuellement être utilisée par les services nationaux de météorologie pour les auxiliaires de la météorologie.

D'autres méthodes permettent de réduire l'occupation du spectre, notamment la méthode des transmissions numériques, qui est à l'étude.

6 Caractéristiques radioélectriques des radiosondes actuelles

Les radiosondes permettent de mesurer in situ la pression atmosphérique, la température et l'humidité relative. La vitesse et la direction des vents sont déterminées, soit par NAVAJD, soit par mesure radiogoniométrique de l'azimut et de l'angle d'élévation de la radiosonde par rapport à l'antenne de réception (RDF). La liaison descendante de communication des données de la radiosonde à la station de réception au sol utilise la bande des 400 MHz dans le cas NAVAJD et la bande des 1 680 MHz dans le cas des radiosondes RDF. Les signaux Oméga en ondes myriamétriques et Loran-C sont relayés vers le récepteur au sol à l'aide d'un simple transducteur.

Pour les radiosondes 1 680 MHz, une perte du signal qui dure plus de 10 s occasionne en général une perte de poursuite au niveau du récepteur au sol, et il est difficile d'obtenir une seconde acquisition, même lorsque le signal brouilleur disparaît. Le récepteur poursuit le signal de plus forte amplitude dans sa largeur de bande instantanée (1,3 MHz). Lorsque les vents sont très forts, leur vitesse est parfois mesurée à l'aide d'une radiosonde répondeuse. La radiosonde reçoit un signal de télémétrie voisin de 400 MHz de la station au sol et retransmet le train d'impulsions à 1 680 MHz.

Les antennes d'émission des radiosondes sont des quarts d'onde unipolaires.

6.1 Caractéristiques des émetteurs

TABLEAU 5

Caractéristiques radioélectriques des émetteurs de radiosonde 400 MHz

Plage de syntonisation (MHz)	400,15-406
Dérive maximale en vol (kHz)	± 800
Puissance de sortie nominale (dBW)	-6,0
Gain maximal de l'antenne (dBi)	2
Type d'émission UIT-R	F9D
Modulation	MF
Signal modulant PTU (kHz)	7-10
Ecart du signal PTU (kHz)	45 ± 15
Ecart dû à la liaison de transmission en ondes myriamétriques/Loran-C (kHz)	100/300
Largeur de bande occupée (Oméga en ondes myriamétriques) (kHz) (niveau -40 dBc)	280
Largeur de bande occupée (Loran-C) (kHz) (niveau -40 dBc)	480
Largeur de bande occupée (GPS) (kHz) (niveau -40 dBc)	200
Débit de données équivalent du signal PTU (bit/s)	1 200 ⁽¹⁾
Débit de données équivalent des signaux PTU et GPS (bit/s)	2 400
Emission hors bande (dBc)	< -43

⁽¹⁾ Le débit de données indique le volume de données effectivement transmis de la radiosonde au récepteur au sol. Compte tenu des techniques de modulation actuellement utilisées par les radiosondes, un complément d'étude sera nécessaire pour estimer ces valeurs.

TABLEAU 6

Caractéristiques radioélectriques des émetteurs de radiosonde 1 680 MHz

Plage de syntonisation (MHz)	1 668,4-1 700	1 668,4-1 700
Dérive maximale en vol (MHz)	± 4	± 4
Puissance de sortie nominale (dBW)	-6,0	-6,0
Gain maximal de l'antenne (dBi)	2,0	2,0
Type d'émission UIT-R	A9D	F9D
Modulation	MA, 100%	MF
Signal modulant PTU (kHz)	0,7-1,0	7-10
Ecart	Non applicable	45 ± 15
Direction du vent	Détection des angles de réception	Détection des angles de réception
Largeur de bande occupée	-40 dBc: 0,5 MHz -50 dBc: 1,0 MHz	180 kHz
Débit de données (bit/s)	1 200	1 200
Emission hors bande (dBc)	< -43	< -43

6.2 Signal de télémétrie

Le système de détermination de la position de la radiosonde à l'aide d'un radiothéodolite de 1 680 MHz (RDF) est très sensible à l'azimut et à l'angle d'élévation et lorsque les angles d'élévation sont faibles (en dessous de 10° à 15°), les erreurs de mesure de la hauteur (et, par conséquent, de la distance oblique) peuvent devenir très importantes. Ce cas se produit le plus souvent en hiver, lorsque des vents très forts en altitude entraînent la radiosonde loin dans le sens du vent. Pour remédier à cette situation, on a recours à un système de télémétrie à 403 MHz qui fournit à la sonde un paramètre complémentaire, la distance, pour un calcul plus précis de la position (ce paramètre remplace souvent l'angle d'élévation dans le calcul).

La fonction complémentaire de télémétrie génère un signal sinusoïdal à 75 kHz. L'émetteur de la station au sol module en amplitude une porteuse à 403 MHz avec le signal à 75 kHz et la transmet à la radiosonde. Le signal à 403 MHz est démodulé par la radiosonde et le signal à 75 kHz sert à moduler le signal du trajet descendant à 1 680 MHz. La fonction complémentaire de télémétrie de la station au sol compare ensuite la différence de phase entre le signal initial à 75 kHz et le signal renvoyé par la sonde. Cette différence de phase permet de calculer la distance oblique par rapport à la radiosonde. Le Tableau 7 indique les caractéristiques typiques de la fonction complémentaire de télémétrie qui est ajoutée aux systèmes RDF.

TABLEAU 7

Caractéristiques techniques de la fonction complémentaire de télémétrie des radiosondes

Paramètre	Valeur
Station au sol (émetteur de liaison montante):	
– Puissance de sortie de l'émetteur (W)	25
– Largeur de bande d'émission (kHz)	180
– Modulation	MA
– Gain d'antenne (dBi)	12
– Couverture du faisceau à 3 dB (horizontal × vertical)	17 × 45
– Polarisation	Verticale
Récepteur de télémétrie de la radiosonde (récepteur de liaison montante):	
– Largeur de bande RF, 3 dB (MHz)	8,0
– Largeur de bande FI, 3 dB (kHz)	250
– Gain d'antenne (dBi)	1,3
– Couverture du faisceau à 3 dB (horizontal × vertical)	360 × 60

6.3 Antennes de réception

Caractéristiques typiques des antennes actuellement utilisées:

TABLEAU 8

Caractéristiques des antennes à 400 MHz

Type	Equidirective (dipôle, plan de sol)	Directive à coins réflecteurs (6 coins)
Gamme de fréquences (MHz)	397-409	400-406
Gain horizontal (dB)	Equidirective	8
Gain vertical (dB)	Equidirective	-3
Facteur de bruit de l'amplificateur (dB)	< 3,5	< 2,5
Gain de l'amplificateur (dB)	13	20

TABLEAU 9

Caractéristiques des antennes à 1 680 MHz

Type	Réseau à déphasage	Balayage conique
Gamme de fréquences (MHz)	1 660-1 700	1 660-1 700
Couverture du faisceau à 3 dB (degrés)	20 horizontale	8,8
	15 verticale	
Gain (dBi)	16 minimum	28
Affaiblissement dans les lobes latéraux (dB)	> 20 en direction de la réflexion spéculaire au sol sur terrain plat avec un angle d'élévation > 14°	15 à ± 60° à partir de l'angle de visée
Sensibilité (dBm)	Entrée -110 RF, S + N/N 12 dB	-97 (poursuite)
Commande automatique de gain (dBm)	Plage dynamique -110 ... 0	
Largeur de bande FI pour la mesure de PTU (kHz) - Poursuite (MHz)	300	180
	Non applicable	1,3