

RAPPORT 1173

CONSIDERATIONS TECHNIQUES ET D'EXPLOITATION POUR LES
TELECOMMUNICATIONS MOBILES AERONAUTIQUES PAR SATELLITE

(Question 82/8)

(1990)

1. Introduction

L'objet du présent Rapport est d'étudier les facteurs relatifs aux télécommunications aéronautiques par satellite considérées pour la bande comprise entre 1,5 et 1,6 GHz.

1.2 Aujourd'hui, il existe seulement des réseaux de radiocommunication de Terre en ondes décimétriques et métriques pour le contrôle de la circulation aérienne (ATC), le contrôle de l'exploitation aéronautique (AOC), les communications aéronautiques administratives (AAC) et les communications publiques aéronautiques (APC). Toutefois, avec les réseaux de radiocommunication de Terre, les avions ne peuvent pas toujours établir des communications fiables avec les points au sol, surtout lorsqu'ils se trouvent loin du sol. Les services par satellite permettent d'améliorer la capacité, la qualité et la fiabilité des voies pour les communications d'avion dans maintes régions du monde.

1.3 Au début et au milieu des années 70, de nombreux essais expérimentaux et de démonstration ont été effectués dans la bande des 1,5 - 1,6 GHz afin de vérifier la faisabilité des systèmes de communications aéronautiques mobiles et de démontrer leur capacité fonctionnelle. On s'est à nouveau efforcé de procéder à des expériences et à des essais supplémentaires pour mettre au point, à brève échéance, des systèmes capables d'être mis en exploitation.

1.4 ARINC/SITA et d'autres organisations projettent de commercialiser, en 1990, des services de télécommunication aéronautiques par satellite, par l'intermédiaire du secteur spatial d'INMARSAT.

2. Situation actuelle et perspectives

2.1 Les milieux de l'aéronautique civile internationale s'efforcent activement de mettre en oeuvre un service mobile aéronautique par satellite (SMAS) pour assurer le contrôle de la circulation aérienne, le contrôle de l'exploitation aéronautique, ainsi que les communications publiques aéronautiques. L'OACI estime que, vers la fin de 1990, 53 avions de transporteurs aériens seront équipés d'avionique du SMAS et que, vers la fin de 1994, plus de 350 avions, y compris des avions de l'aviation générale et commerciale utiliseront ces équipements. Les autorités aéronautiques de certains pays apportent actuellement, au contrôle de la circulation aérienne, des améliorations essentielles fondées sur les communications par satellite, notamment dans les zones océaniques. La mise en service initiale aura lieu vers la fin de 1990.

2.2 A l'appui de cette initiative des milieux aéronautiques, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) établit, dans le cadre de sa responsabilité concernant l'adoption de Normes et de Pratiques recommandées (SARP) pour l'aviation civile internationale, des SARP pour le SMAS. Les SARP en cours d'élaboration se fondent sur l'architecture des systèmes à satellites mise au point par le Comité spécial des systèmes futurs de navigation aérienne (FANS) de l'OACI, le manuel de définition des systèmes d'aviation d'INMARSAT et les caractéristiques d'équipement du SMAS adoptées par le Comité de l'électronique aérospatiale (AEEC). Le Comité spécial 165 de la RTCA est en train d'élaborer des caractéristiques d'avionique conformes aux SARP de l'OACI.

2.3 Les SARP permettront aux aéronefs en exploitation dans le monde entier de recevoir, par l'intermédiaire de toute station terrienne aéronautique conforme, des communications du service mobile aéronautique par satellite répondant aux besoins de l'aviation.

2.4 Le Japon procède actuellement à des essais préopérationnels de télécommunications par l'intermédiaire d'un satellite INMARSAT pour expérimenter et évaluer des services publics de téléphonie et de télécopie à l'aide d'un Boeing 747 commercial circulant sur des lignes transocéaniques entre le Japon et l'Amérique du Nord [Makita F. et autres, 1988]. Des expériences préopérationnelles de télécommunications aéronautiques par satellite sont aussi faites au Canada via un satellite INMARSAT. Le Royaume-Uni a conduit des essais de développement en 1988 [Schoenenberger, 1988] afin de préparer l'introduction, pour les passagers d'aéronefs du service téléphonique utilisant les satellites INMARSAT. Ces essais, qui doivent déboucher sur l'introduction d'un service commercial, ont été poursuivis en 1989.

2.5 Plusieurs expériences de télécommunications de données à faible vitesse ont déjà été effectuées par l'Agence spatiale européenne (ASE), le Canada, la République fédérale d'Allemagne et d'autres pays [Rogard et Pinelle, 1987] [Neal et autres, 1987] [Wachira et autres, 1987]. Des expériences aéronautiques sur la propagation et les transmissions de données à faible vitesse au moyen d'un satellite INMARSAT, réalisées au titre du programme PRODAT de l'ASE, ont fourni des résultats intéressants.

2.6 Au Japon, un projet appelé le Système expérimental mobile par satellite fonctionnant avec l'ETS-V (ETS-V/EMSS) est actuellement en cours d'exécution pour la mise au point, notamment, de techniques de base applicables aux communications du SMAS [Hase et autres, 1986]. Lancé en août 1987, ce satellite était destiné à établir des techniques de base des télécommunications par satellite et par satellite géostationnaire stabilisé sur les trois axes pour les aéronefs, les navires et les véhicules terrestres. Pour les essais de télécommunications aéronautiques par satellite réalisés au titre du projet EMSS, on utilise un avion à réaction commercial circulant sur des lignes transocéaniques et un avion privé circulant sur des lignes intérieures; ces essais portent notamment sur les transmissions de données à petite, à moyenne et à grande vitesse, la téléphonie et la localisation [Ohmori et autres, 1986] [Niimi et autres, 1987].

2.7 Il faut se pencher sur le partage des fréquences avec d'autres services primaires fonctionnant dans les bandes du SMAS. L'Annexe I contient une analyse préliminaire de ce partage avec le service fixe de Terre.

2.8 Un service mobile aéronautique par satellite en projet (AIRCOM) est décrit dans l'Annexe II et le système aéronautique d'INMARSAT est décrit dans l'Annexe III.

2.9 Toutefois, il convient de noter que, bien que l'architecture des systèmes du SMAS et les normes de l'AEEC indiquent que la réception et la transmission des communications du SMAS peuvent s'effectuer respectivement dans les bandes de détresse 1 544 - 1 545 MHz et 1 645,5 - 1 646,5 MHz, des précautions doivent être prises pour empêcher toute émission intempestive de signaux dans ces bandes qui pourrait gêner la réception des signaux de stations de radiobalises de localisation des sinistres (RLS) ou d'autres communications de détresse et de sécurité par satellite transmises dans ces bandes.

3. Aspects techniques

3.1 Caractéristiques des systèmes

L'architecture des systèmes est décrite en détail dans le Rapport FANS/4 [OACI, 1988]. Les SARP de l'OACI en cours d'élaboration sont fondés sur des documents de l'AEEC et d'INMARSAT; elles seront publiées dans les documents appropriés de l'OACI, puis dans l'Annexe 10 à la Convention sur l'aviation civile internationale aux termes de la procédure consultative de l'OACI. Tous les systèmes assurant un service à l'aviation civile internationale devront respecter les SARP de l'OACI. Dans le but de poursuivre les études, il convient de se référer aux documents pertinents de l'OACI en ce qui concerne les caractéristiques des systèmes du service mobile aéronautique par satellite."

3.2 Interfaces d'avionique

3.2.1 Généralités

La station terrienne d'aéronef devra traiter trois types d'entrées:

- 1) informations de contrôle de vol (par exemple, demande connexion, numéro de vol);
- 2) données d'utilisateur (par exemple, ATS, AOC, AAC et communications publiques aéronautiques);
- 3) téléphonie (cabine passagers et poste de pilotage).

3.2.2 Traitement des données

Les données proviendront d'un certain nombre de sources à bord de l'aéronef, entre autres le système de navigation par inertie, les panneaux de commande manœuvrés par l'équipage, etc. Etant donné cette diversité et le fait que la mise au point d'un système entièrement normalisé est peu probable, il se peut que ces entrées de données soient prétraitées dans une Unité de gestion de données spécialement adaptée avant d'être appliquées au système de télécommunications par satellite. Les données transmises depuis le sol seront normalement imprimées ou visualisées sous une forme appropriée, à l'intention de l'équipage. L'OACI applique actuellement l'interconnexion des systèmes ouverts (OSI) préconisée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) pour l'échange de communications de données [OACI, 1988].

3.2.3 Trafic téléphonique

Le trafic téléphonique à bord des aéronefs aura deux origines: le poste de pilotage et la cabine passagers. Ces deux sources de trafic ne seront peut-être pas traitées de la même manière: par exemple, des taux de codage différents pourraient être utilisés pour le trafic de la cabine et pour celui du poste de pilotage mais, pour certaines applications, ils seront les mêmes. Plusieurs installations à bord de la cabine pourraient constituer la source du trafic émanant de la cabine; il sera nécessaire de choisir la source active parmi celles dont on dispose, éventuellement au moyen d'un commutateur privé d'aéronef.

3.3 Évanouissements par trajets multiples

3.3.1 Les effets des évanouissements par trajets multiples, surtout pour les trajets multiples dus à la réflexion sur la mer, dans les télécommunications aéronautiques par satellite représentent un important paramètre de voie qui a fait l'objet de recherches depuis le début des années 70. Il faut tenir compte des facteurs suivants:

- 1) temps de propagation différentiel entre un signal direct et les signaux réfléchis sur la mer ou la surface terrestre (voir le Rapport 1169);
- 2) évanouissement sélectif des fréquences dû à la navigation des aéronefs à grande vitesse et à haute altitude;
- 3) évaluation des effets des évanouissements compte tenu de l'emplacement de l'antenne sur le fuselage.

3.3.2 Des expériences relatives aux effets des évanouissements par trajets multiples ont été faites récemment en République fédérale d'Allemagne, au moyen d'un satellite INMARSAT; elles sont résumées dans le Rapport 1169.

3.3.3 Le Japon et beaucoup d'autres pays procèdent actuellement à des essais de propagation pour les télécommunications aéronautiques par satellite. Les résultats et les discussions auxquels ils donneront lieu permettront de mettre rapidement en place des télécommunications aéronautiques par satellite.

3.4 Effet Doppler

L'effet Doppler a des conséquences importantes sur la synchronisation des démodulateurs dans les télécommunications aéronautiques par satellite. Au Japon, on a effectué des essais de télécommunications aéronautiques par l'intermédiaire des satellites ETS-V et INMARSAT en utilisant un avion à réaction commercial sur des lignes transocéaniques [Hase, Y. et autres, 1989, Makita F. et autres, 1988]. Les résultats montrent que le déplacement de fréquence dû à l'effet Doppler est de 1,2 kHz à son maximum et qu'il varie de 1 à 4 Hz par minute lorsque l'aéronef est en régime de croisière mais que, lorsque l'aéronef change rapidement de direction, la variation du déplacement de fréquence atteint 15 Hz par seconde.



3.5 Modulation/codage de la parole

Les techniques numériques peuvent être intéressantes car elles permettent d'utiliser efficacement des puissances de signaux et une largeur de bande limitées. Le Comité FANS de l'OACI a adopté deux techniques de modulation [OACI, 1988]. Pour les débits de données sur fréquences radioélectriques allant jusqu'à 2 400 bits par seconde, on se servira de la modulation par déplacement de phase bivalente pour l'aviation (MDPB-A). Au-dessus de 2 400 bits par seconde, on se servira de la modulation par déplacement de phase quadrivalente pour l'aviation (MDPQ-A). Alors que la première est fondée sur la mise en forme ou le filtrage optimisé d'impulsions appliquées à une forme de MDPB dans laquelle chaque deuxième symbole est transmis dans le canal de quadrature, la MDPQ-A est basée sur la mise en forme ou le filtrage optimisé d'impulsions appliquées à une forme de MDPQ décalée non filtrée. A la suite d'essais subjectifs, un vocodeur fonctionnant à 9,6 kbit par seconde a été choisi par l'instance internationale des transports aériens, l'AEEC. Pour la correction d'erreur, la technique de codage à convolution/décodage de Viterbi avec $R = 1/2$ et $3/4$, et $K = 7$ est celle qui a été retenue par le Comité FANS de l'OACI [OACI, 1988]. Ces spécifications sont incluses dans les critères techniques de qualité de fonctionnement pour le système INMARSAT [INMARSAT, 1988].

3.6 Utilisation commune des bandes de fréquences et compatibilité entre réseaux de Terre et réseaux à satellite

Actuellement, les services mobiles de télécommunications aéronautiques sont assurés par des réseaux de Terre fonctionnant au-dessous de 1 GHz. Afin de simplifier les prescriptions futures de l'avionique, l'OACI envisage l'emploi d'éléments d'avionique communs aux systèmes mobiles de communications de sécurité aussi bien par satellite que de Terre. Compte tenu des études initiales de l'OACI, il semble difficile d'intégrer les systèmes de Terre et les systèmes à satellites dans la même bande de fréquences et dans des équipements communs.

3.7 Techniques d'accès

L'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) et l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) ont été retenus par le Comité FANS de l'OACI [OACI, 1988]. Lorsqu'un aéronef a besoin de relativement peu de voies, l'AMRF à une seule voie par porteuse (SCPC) pourrait constituer une technique efficace, simple à appliquer et bon marché. Dans un système mobile aéronautique par satellite, les facteurs importants sont la taille et le poids des équipements de télécommunication de bord ainsi que la dissipation d'énergie de l'émetteur; il convient, en conséquence, de choisir une technique d'accès multiple. En général, l'emploi de la technique AMRF SCPC pour des voies multiples réservées à la correspondance publique aéronautique peut exiger un amplificateur linéaire de la classe A en cas d'utilisation de porteuses multiples.

3.8 Architecture des systèmes

3.8.1 L'architecture des systèmes mobiles aéronautiques par satellite de l'OACI a une capacité minimale de niveau 1 qui est fondée sur l'utilisation d'une antenne d'aéronef dont le gain nominal est de 0 dBi et qui servira à assurer des services de base pour la transmission de données ATC et AOC à faible vitesse. Elle a été conçue de manière à permettre une croissance évolutive des possibilités fonctionnelles et de la capacité des systèmes pour assurer, si nécessaire, un service de transmission de données et de téléphonie numérique à plus grande vitesse. Tous les aéronefs exploités dans le cadre du système mondial doivent, au minimum, avoir la capacité de niveau 1. La capacité de

niveau 1 utilise des liaisons MRT-RF dans le sens sol-air et une combinaison de liaisons AMRT à accès aléatoire et organisées dans le sens air-sol, des services de transmission de données en mode paquets étant assurés dans les deux sens. Des capacités élargies permettent, entre autres, d'assurer des services de téléphonie en mode circuits pour lesquels le gain d'antenne nominal des aéronefs doit être de 12 dBi.

3.9 Surveillance

Dans l'aviation civile, la sécurité des vols est déterminante; c'est pourquoi la surveillance est une fonction essentielle. Deux types de surveillance sont pris en considération pour les besoins de l'exploitation. Le premier est la surveillance asservie automatique (ADS), dans lequel un aéronef transmet sa position, calculée au moyen des instruments de navigation de bord, à une station terrienne aéronautique. La technique de l'ADS devrait normalement constituer la base de la surveillance pour le contrôle de la circulation aérienne au-dessus de vastes zones océaniques et pourrait permettre d'accroître la densité du trafic aérien au-dessus de zones océaniques éloignées lorsqu'elle sera mise en oeuvre. Le second est la surveillance non asservie en coexploitation (CIS) qui est comparable au Radar de surveillance secondaire (SSR) et largement indépendant du traitement des signaux d'aéronefs.

3.10 Types d'antennes d'aéronef

3.10.1 Deux types d'antennes sont définis:

- a) à faible gain. Ces antennes ont un gain suffisant pour permettre d'obtenir un rapport gain-température de bruit (G/T) du sous-système de réception qui ne soit pas inférieur à $-26 \text{ dB(K}^{-1})$ dans la zone de couverture, excepté dans la région ± 20 degrés du zénith où un G/T aussi faible que $-28 \text{ dB(K}^{-1})$ est admis;
- b) à gain élevé. Ces antennes ont un gain suffisant pour permettre d'obtenir un rapport gain-température de bruit (G/T) du sous-système de réception qui ne soit pas inférieur à $-13 \text{ dB(K}^{-1})$ dans au moins 85 pour cent de la zone de couverture.

3.10.2 Les stations terriennes d'aéronef qu'on envisage d'exploiter à des débits supérieurs à 1 200 bit/s devront peut-être employer un système d'antenne à gain élevé, compte tenu des caractéristiques techniques du système à satellites. Plusieurs compagnies dans le monde mettent actuellement au point un certain nombre de types d'antenne répondant à ces besoins.

3.10.3 Zone de couverture

Les systèmes d'antenne doivent être installés de manière à répondre aux conditions opérationnelles de fonctionnement spécifiées pour l'émission et la réception dans une zone de couverture par rapport à la ligne de vol horizontal de l'aéronef. Le volume de couverture minimal doit permettre d'obtenir un rapport G/T de $-26 \text{ dB(K}^{-1})$ dans un azimut de 360 degrés et dans un angle de site de 10 à 90 degrés par rapport au plan horizontal, excepté dans le volume ± 20 degrés par rapport au zénith où un rapport G/T aussi faible que $-28 \text{ dB(K}^{-1})$ est admis.

3.10.4 Les antennes d'aéronef doivent non seulement présenter des caractéristiques électriques particulières mais aussi répondre à des conditions physiques en matière de résistance vibratoire, de résistance thermique et de résistance mécanique. Il est par ailleurs souhaitable que ces antennes puissent être installées sur de nombreux types d'aéronefs.

3.10.5 Les Etats-Unis d'Amérique, le Canada et la République fédérale d'Allemagne ont déjà procédé à des essais de télécommunications aéronautiques par satellite avec des types d'antennes à faible gain. Le Japon, pour sa part, utilise des types d'antennes à faible gain et à gain élevé pour faire des expériences de télécommunications ATC, AOC, AAC et APC au moyen de liaisons par satellite. Au Japon, les expériences faites par l'intermédiaire des satellites ETS-V et INMARSAT ont lieu à bord d'avions à réaction commerciaux desservant des lignes transocéaniques. Les résultats obtenus contribueront largement à la mise en place de télécommunications aéronautiques par satellite dans un proche avenir (voir également le Rapport 1047).

4. Aspects concernant l'exploitation

4.1 Types de communications et priorités

4.1.1 Communications relatives à la sécurité et à la régularité

4.1.1.1 Les règles spéciales relatives aux types de communications dans les services mobile aéronautique (R) et mobile aéronautique par satellite (R) figurent aux numéros 3630 (MOB-87) et 3633 (MOB-87) du Règlement des radiocommunications. Au titre du premier de ces numéros, les fréquences attribuées à ces services sont réservées aux "communications relatives à la sécurité et à la régularité des vols". Au titre du second de ces numéros, la transmission de correspondance publique est interdite dans toute bande attribuée en exclusivité aux services mobile aéronautique ou mobile aéronautique par satellite. Toutefois, la CAMR MOB-87 a adopté le RR729A dans lequel la correspondance publique avec les stations terriennes d'aéronef est autorisée dans les bandes 1 545 - 1 555 MHz et 1 646,5 - 1 656,5 MHz.

4.1.1.2 La sécurité et la régularité des vols sont des concepts relatifs à l'exploitation qui sont pris en considération et font l'objet d'une définition dans les documents de l'OACI, notamment dans la Convention de l'aviation civile internationale et les Annexes 6 et 10 à cette Convention. L'Article 37 de la Convention, en particulier, exige l'adoption de normes et de pratiques recommandées reconnues à l'échelle internationale en ce qui concerne la sécurité, la régularité et l'efficacité de la navigation aérienne. Les circonstances opérationnelles auxquelles la définition de la sécurité et de la régularité peut s'appliquer sont également énumérées dans l'Annexe 10, Vol. II. Les dispositions citées dans l'Annexe 10 sont des normes reconnues à l'échelle internationale qu'il est normalement obligatoire de respecter et auxquelles l'Etat concerné ne peut déroger que par une déclaration de non-conformité.

4.1.1.3 Les communications relatives à la sécurité et à la régularité peuvent être, en outre, classées dans les deux catégories d'exploitation suivantes:

a) Communications du service de la circulation aérienne (ATS)

Conformément aux règles de l'OACI, spécifiées dans l'Annexe 6 à la Convention de cette Organisation, et comme il est en outre stipulé dans les réglementations nationales, les aéronefs et les stations au sol doivent, dans le cadre d'un service de circulation aérienne, échanger des messages concernant la détresse, l'urgence, la sécurité et la

régularité des vols, ainsi que les conditions météorologiques. Ces communications sont obligatoires dans tout espace aérien promulgué par les autorités nationales comme étant réglementé pour les besoins du trafic aérien et elles visent tout particulièrement à assurer, à des fins de sécurité, la séparation des aéronefs en vol ainsi que l'atterrissage et le décollage de ceux-ci sur les aérodromes.

b) Contrôle de l'exploitation aéronautique (AOC)

L'exercice du contrôle de l'exploitation par les compagnies exploitantes d'aéronefs est une pratique reconnue et nécessaire qui est couverte par la Norme adoptée à l'échelle internationale et contenue dans l'Annexe 6 à la Convention susmentionnée. La définition du contrôle de l'exploitation donnée dans ce document prévoit l'exercice de ce contrôle au cours des "phases de commencement, de continuation, de déroutement ou d'achèvement d'un vol dans l'intérêt de la sécurité de l'aéronef et de la régularité du vol. Ce contrôle est normalement exercé par la compagnie exploitante de l'aéronef responsable du vol". Il est reconnu depuis longtemps que les communications du contrôle de l'exploitation entrent dans la catégorie de la sécurité et de la régularité visée par le RR3630 (voir également le numéro 27/194A dans l'Appendice 27 Aer2 au Règlement des radiocommunications).

4.1.2 Correspondance publique aéronautique (APC)

4.1.2.1 La correspondance publique est mentionnée au numéro 110 du Règlement des radiocommunications (repris du numéro 2004 de la Convention). La définition non exclusive qui figure dans ces documents identifie l'accès par le public comme une caractéristique essentielle liée à cette catégorie de correspondance. Dans le cadre du service mobile aéronautique et des dispositions récemment adoptées pour l'accès par la correspondance publique, on peut supposer que cette classification comprendra toutes les communications qui ne répondent pas à la définition de la sécurité et de la régularité des vols (voir OACI, Annexe 10, Vol. II, § 5.1.8.4 et 5.1.8.6). Ces communications peuvent comprendre la téléphonie vocale, la transmission de données téléphoniques ou d'autres données destinées à être retransmises sur des réseaux publics fixes; elles peuvent par ailleurs être liées aux besoins des passagers ou de l'équipage, ou encore aux besoins des compagnies aériennes qui ne concernent pas le contrôle de l'exploitation proprement dit.

4.1.2.2 Dans le cadre de la large définition des communications APC, les types suivants de communications ont été mentionnés et ont été pris en considération dans les discussions relatives à l'autorisation de la correspondance publique dans le service mobile aéronautique:

a) Communications des passagers d'aéronef

Cette catégorie comprendrait tous les services de communication utilisés par les passagers pour les communications avec le sol lorsque l'aéronef est en vol. Les communications téléphoniques, transmises à l'aide de moyens analogiques ou numériques, constitueraient l'élément principal de cette catégorie; toutefois, on peut également considérer que les besoins personnels des équipages et d'autres employés des compagnies appartiennent à cette catégorie. De même, les communications des passagers ou des équipages de petits aéronefs de services gouvernementaux pour des besoins autres que la navigation aérienne entreraient également dans cette classification.

b) Communications administratives aéronautiques (AAC)

Les compagnies exploitantes d'aéronefs doivent établir des communications relatives aux aspects commerciaux du vol et au service de transport aérien. Ces communications n'entrent pas dans la catégorie du contrôle de l'exploitation et peuvent se rapporter à des besoins divers tels que les réservations de places dans les avions ou dans les moyens de transport au sol, l'affectation des équipages et des aéronefs, l'organisation des fournitures et des services pour les vols aller et les vols retour, ou à tout autre besoin logistique susceptible de maintenir ou de renforcer l'efficacité de l'exploitation générale des aéronefs. Ces communications devraient répondre à une condition fondamentale, à savoir être établies pour des besoins associés à la compagnie, à l'aéronef, à l'équipage ou à un passager et à un vol ou à des vols particuliers.

4.2 Conditions requises pour les communications relatives aux services de sécurité aéronautiques

4.2.1 Ces communications peuvent être décrites comme suit:

- a) étant donné le caractère mondial de l'aviation civile et le fait qu'un même aéronef peut apparaître dans des parties très différentes du monde en l'espace de quelques heures, il est nécessaire d'établir des normes internationales (aussi bien techniques que d'exploitation) pour la sécurité aéronautique et la régularité des communications en vol;
- b) les paramètres et les pratiques des systèmes de communication doivent assurer un très haut niveau de qualité de fonctionnement, d'intégrité, de fiabilité et de disponibilité. Les mouvements du trafic aérien international s'opèrent essentiellement sur la base du vol aux instruments et font l'objet d'un contrôle au sol. En conséquence, il est nécessaire d'établir des communications jour après jour, minute par minute, pour ménager un espace de sécurité entre les aéronefs tout en assurant une exploitation régulière et économique. Il faut, par ailleurs, permettre un accès pratiquement immédiat au service tout en veillant à ce que les messages ne donnent pas lieu à de fausses interprétations car quelques secondes peuvent suffire pour éviter un accident;
- c) compte tenu des normes élevées imposées au point b) ci-dessus, il est indispensable de protéger ces services contre les brouillages préjudiciables conformément au Règlement des radiocommunications (RR953);
- d) étant donné la longue durée de vie des aéronefs et des systèmes de communication aéronautique, il est indispensable de disposer d'un spectre de fréquences adéquat pour mettre en oeuvre des services à brève échéance et établir, à l'échelle mondiale, des plans d'évolution future tout en maintenant, au minimum, le haut niveau de sécurité actuel.

4.2.2 Le service mobile aéronautique par satellite présente un certain nombre de traits distinctifs mis en relief par les spécifications suivantes:

- a) le délai nécessaire pour établir une communication doit être extrêmement court (de 2 à 5 secondes au maximum); cette exigence est liée à la nécessité d'assurer la sécurité des vols;
- b) la nécessité de transmettre un nombre important d'informations hautement prioritaires (ATS, AOC);
- c) la faible p.i.r.e. des stations de télécommunication par satellite des aéronefs; et
- d) les limitations importantes en ce qui concerne le poids et les dimensions hors-tout des stations de télécommunication par satellite des aéronefs, etc.

4.2.3 Priorité

4.2.3.1 On peut noter que des dispositions ont été prévues dans le renvoi 729A (MOB-87) du Règlement des radiocommunications afin que la priorité soit accordée, à tout moment, aux communications nécessaires pour l'exploitation des aéronefs (priorités 1 à 6 de l'Article 51 du RR). Alors que tous les types de messages décrits ci-dessus sont transmis sur un système commun, il convient de prévoir un moyen technique pour faire en sorte que les messages aéronautiques liés aux priorités 1 à 6 ne soient pas retardés par des messages ayant un rang de priorité inférieur.

4.2.3.2 L'ATS et l'AOC établissent des communications hautement prioritaires liées à la sécurité et à la régularité des vols. Les communications AAC et APC sont faiblement prioritaires et n'affectent pas la sécurité; elles peuvent être passées au second rang en cas de surcharge des systèmes ou en cas d'urgence. Les communications AAC et APC peuvent être interdites dans certaines conditions de vol et ne sont donc pas toujours utilisables.

4.2.4 Considérations relatives à la qualité de fonctionnement

La qualité des voies dépend des types de communications et on estime qu'il est nécessaire de ne pas dépasser un taux d'erreur binaire d'environ 10^{-5} pour les communications de données et d'environ 10^{-3} pour la téléphonie. On peut utiliser la correction d'erreur sans voie de retour (CED) et les techniques d'entrelacement pour réduire l'effet des erreurs binaires. Dans les voies de communication qui exigent une haute intégrité, on peut utiliser le codage supplémentaire par blocs. On peut également utiliser les techniques de demande automatique de répétition (ARQ) pour améliorer la probabilité de transmission des messages.

4.3 Zone desservie

4.3.1 La zone dans laquelle les services seront assurés par le satellite dépend d'un certain nombre de facteurs, à savoir:

- 1) gain effectif de l'antenne d'aéronef en direction du satellite lorsque l'aéronef manoeuvre;
- 2) niveau du signal reçu par le satellite depuis un aéronef avec lequel il est en communication, ce niveau dépendant des gains d'antenne de l'aéronef et du satellite ainsi que de l'affaiblissement sur le trajet en direction du satellite;

- 3) p.i.r.e. du signal émis par le satellite;
- 4) niveau du signal reçu par l'aéronef depuis le satellite avec lequel il est en communication.

4.3.2 L'une des principales raisons pour laquelle la zone desservie est limitée tient à la géométrie par rapport à l'orbite des satellites géostationnaires. Il en résulte une couverture insuffisante dans les régions polaires. Il serait possible d'utiliser des satellites sur d'autres orbites pour couvrir les zones non desservies par des satellites géostationnaires. Ces systèmes sont actuellement à l'étude.

4.4 Interconnexion des systèmes et des réseaux

Il faudra mettre au point des méthodes de connexion entre les systèmes et les réseaux publics et privés, en suivant les conseils des organismes compétents.

5. Conclusion

Lorsqu'on étudie les télécommunications aéronautiques par satellite, il faut tenir compte des besoins prioritaires pour la sécurité de fonctionnement de l'aéronef. Il est essentiel d'utiliser des équipements électroniques répondant aux prescriptions rigoureuses de l'aéronautique. Par ailleurs, il faudra étudier plus en détail la possibilité d'une utilisation commune des bandes de fréquences et d'une compatibilité avec d'autres systèmes de télécommunication par satellite, mobiles maritimes et mobiles terrestres par exemple, afin de profiter au maximum de certains aspects de ces systèmes, comme le partage de secteurs spatiaux, etc. Ces aspects sont étudiés plus en détail dans le Rapport BD/8) sur les questions de partage avec les divers services mobiles par satellite.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARINC/AEEC Characteristics 741 [août 1988] Aviation Satellite Communications System.

HASE, Y., OHMORI, S. et KOSAKA, K. [mai 1986] Experimental Mobile-Satellite System (EMSS) using ETS-V, 15th Int. Symp. on Space Technology and Science, Tokyo.

HASE, Y., TAIRA, S., WAKANA, H. et OHMORI, S. [juin 1988] ETS-V/EMSS Experiments on aeronautical Communications, IEE International Conference on Communications (ICC'89), Boston, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record.

INMARSAT [1988] INMARSAT Aeronautical System Definition Manual (40 Melton Street, Londres, NW1 2EQ, Angleterre).

OACI [mai 1988] Rapport, Comité spécial des systèmes futurs de navigation aérienne de l'OACI, quatrième réunion, Document OACI 9524, FANS/4.

MAKITA, F., KOSAKA, K., MAEKITA, K., NAKAMURA, H., KASHIWABARA, S. et SAITOH, H. [octobre 1988] Field Trials of Aeronautical Satellite Communication System, 4th International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation.

NEUL, A., HAGENAUER, J., PAPKE, W. et DOLAINSKY [juin 1987] Propagation Measurements for Aeronautical Satellite Channel, 37th IEEE Vehicular Technology Conference, Floride.

NIIMI, K., ITO, M., FUJITA, M., MIGAKI, M. et NASU, H. [juillet 1987] Airborne Equipment for Navigation Experiment Using ETS-V, SANE87-12, Tech. Rep. of IEICE.

OHMORI, S., HASE, Y., KOSAKA, K. et TANAKA, M. [1986] Aircraft earth station for Experimental Mobile-Satellite System, Toronto.

ROGARD, R. et PINELLE, M. [juin 1987] Produt Aeronautical Communication System: Overall Architecture and Preliminary Test Results, ICC'87.

SCHOENENBERGER, J.G. et McKINLAY, R.A. [1988] An Airline passenger telephone system - design development and early trials. Proc. IEE.

WACHIRA, M., SHOAMANESH, A. et AZARBAR, B. [juin 1987] Design Considerations for the Canadian First Satellite System, ICC'87.

ANNEXE I

CONSIDERATIONS RELATIVES AU PARTAGE DES FREQUENCES ENTRE LE
SERVICE MOBILE AERONAUTIQUE PAR SATELLITE ET LE
SERVICE FIXE DE TERRE DANS LES BANDES DES 1,5 - 1,6 GHz

1. Introduction

Dans le Tableau d'attribution des bandes de fréquences (Article 8) du Règlement des radiocommunications qui a été modifié par la CAMR pour les services mobiles de 1987, les bandes 1 545 - 1 555 MHz (espace-Terre) et 1 646,5 - 1 656,5 MHz (Terre-espace) sont attribuées à titre primaire au service mobile aéronautique par satellite (R). Dans les bandes de fréquences 1 555 - 1 559 MHz et 1 565,5 - 1 660,5 MHz attribuées au service mobile terrestre par satellite, le fonctionnement des stations terriennes d'aéronef est autorisé en vertu du RR730A. La CAMR pour les services mobiles de 1987 a autorisé la correspondance publique à partir des aéronefs dans des parties de ces bandes (RR729B). Les bandes de fréquences 1 550 - 1559 MHz et 1 646,5 - 1 660 MHz sont aussi attribuées au service fixe à titre primaire dans les pays indiqués au RR730. Il convient de noter que la plupart de ces attributions au SMAS sont partagées avec le service fixe fonctionnant à titre secondaire (RR727).

Les modes potentiels de brouillage entre le service fixe de Terre et le service mobile aéronautique par satellite (SMAS) dans les bandes des 1,5 - 1,6 GHz sont énumérés au Tableau I et sont accompagnés de références aux sections pertinentes de la présente Annexe.

TABLEAU I

Modes pertinents de brouillage

<u>Station brouilleuse</u>	<u>Station utile</u>	<u>Bande de fréquences (MHz)</u>	<u>Section de l'Annexe</u>
Fixe	Satellite	1 646,5 - 1 660	2
Satellite	Fixe	1 550 - 1 559	3
Station terrienne	Fixe	1 646,5 - 1 660	4
Fixe	Station terrienne	1 550 - 1 559	5

Puisque quelques caractéristiques essentielles des systèmes du SMAS ne sont pas encore définies ou connues, y compris un bilan de bruit pour le SMAS, on ne peut émettre de jugement d'ensemble sur les interactions mentionnées ci-dessus. Comme cela est indiqué dans le corps du texte, cette situation devrait se modifier dans un avenir proche. Par ailleurs, le service fixe est bien implanté. On pourra consulter le Rapport 379 qui donne les caractéristiques de certains systèmes représentatifs du service fixe, et plusieurs Recommandations de la Commission d'études 9 définissent et appliquent le bilan de brouillage du service fixe du point de vue du service fixe par satellite. On suppose que ce bilan du service fixe pour le brouillage causé par le service fixe par satellite comprend aussi le SMAS.

2. Brouillages causés aux récepteurs des stations spatiales du SMAS par les émissions du service fixe

L'Article 27 du Règlement des radiocommunications énonce les limites de pointage de l'antenne, de puissance d'entrée de l'antenne et de p.i.r.e. applicables aux stations fixes pour protéger les récepteurs de stations spatiales initialement prévus. Ces limites ont été fondées sur la Recommandation 406 et ont été tirées de considérations relatives aux systèmes fixes par satellite fonctionnant à des fréquences nettement supérieures à 1,6 GHz. La possibilité d'appliquer ces limites au SMAS est analysée ci-après; toutefois, il n'est pas possible de procéder à une analyse définitive tant que les bilans de bruit et de brouillage concernant le SMAS n'ont pas été établis (à titre d'exemple d'une analyse applicable au service mobile maritime par satellite, voir le Rapport 917).

Aux termes de l'Article 27 du Règlement des radiocommunications, il convient d'éviter d'utiliser des valeurs de p.i.r.e. supérieures à 35 dBW et un pointage d'antenne dans les limites de 2° de l'orbite des satellites géostationnaires. Lorsqu'il n'est pas possible de respecter ces valeurs dans la pratique, la limite est de 47 dBW pour pointage d'antenne de 0,5° de l'orbite des satellites géostationnaires; elle est assouplie (55 dBW), lorsque l'angle hors axe passe à 1,5°. Ces restrictions de pointage ont apparemment été définies pour des faisceaux hertziens types fonctionnant à des fréquences élevées lorsque la largeur du faisceau à demi-puissance est de l'ordre de 1°, ou inférieure à cette valeur. Toutefois, à 1 660 MHz, une largeur de faisceau de 1° impose un diamètre d'antenne d'au moins 12,8 mètres. Le plus souvent, les antennes de faisceaux hertziens utilisées dans la bande des 1,6 GHz ont un diamètre compris entre 1 et 3 mètres, et leur ouverture angulaire est comprise entre 12,8 et 2,6°. En conséquence, les restrictions actuelles concernant le pointage qui sont définies dans le Règlement des radiocommunications pour des angles hors axe compris entre 0,5 et 2° semblent dépourvues de signification.

Les limites de p.i.r.e. et de pointage mentionnées ci-dessus reposent sur une analyse de l'éclairement du faisceau principal du satellite; on suppose que les intersections sont peu nombreuses et que la moitié du brouillage observé dans ce mode résulte de ces sources "directes". L'autre moitié de la puissance de brouillage prise en compte est imputée aux sources "indirectes": les signaux brouilleurs proviennent de l'extrémité des lobes latéraux de la station fixe et pénètrent dans le faisceau principal du satellite (les effets de couplage entre lobes latéraux étant considérés comme négligeables). La limite de puissance fournie à l'antenne définie dans l'Article 27, à savoir 13 dBW, a été calculée à partir d'une analyse des sources "indirectes" et l'on peut supposer qu'elle correspond à une p.i.r.e., en direction du satellite, comprise entre 8 et 13 dBW. (Le Rapport 614 propose une valeur de gain d'antenne de station fixe de -5 dBi dans une telle situation, encore que le diagramme de référence de l'antenne utilisée présente une valeur de gain minimale de 0 dBi.)

Certains projets de système mobile aéronautique par satellite prévoient pour la station terrienne d'aéronef des valeurs de p.i.r.e. comprises entre 3 et 26 dBW approximativement, selon le type de service [AMSC, 1988], [Smith, 1987]. Apparemment, les limites actuellement définies dans l'Article 27 ne confèreraient pas une protection adéquate à un tel SMAS, les valeurs de p.i.r.e., et peut-être même les densités de puissance du signal brouilleur et du signal utile, étant comparables. Néanmoins, la situation actuelle, sous l'angle du partage, pourrait s'avérer acceptable, compte tenu des éléments suivants:



- Les limites de valeurs effectives de pointage de l'antenne de la station fixe, de niveau de puissance d'entrée et de p.i.r.e. pourraient suffire à exclure tout brouillage préjudiciable. (Un examen préliminaire des assignations de fréquence pertinentes du service fixe, qui ont été enregistrées par l'IFRB, indique que les niveaux de puissance d'entrée d'antenne oscillent entre 3 dBW et 10 dBW, et que les valeurs de p.i.r.e. varient généralement entre 38 dBW et 40 dBW. Bien que ces valeurs soient nettement inférieures aux limites fixées par l'Article 27 du Règlement des radiocommunications, elles n'en sont pas moins une source de préoccupation pour le SMAS. On se rend bien compte que les administrations peuvent ne pas notifier toutes les assignations du service fixe, par exemple celles des stations situées très à l'intérieur de leurs frontières territoriales, et que les caractéristiques citées ci-dessus ne sont peut-être pas représentatives de tous les systèmes en fonctionnement.)

- Il se peut qu'un grand nombre de satellites du SMAS soient mis en service mais, pour des raisons pratiques, les stations fixes pourraient respecter les restrictions de pointage appropriées relativement aux positions spécifiques des satellites et non pas à l'orbite des satellites géostationnaires en général.

- Lorsque la porteuse résiduelle d'une station fixe dépasse la limite de p.i.r.e. ou de densité de puissance pertinente, alors que le reste de l'émission n'excède pas cette valeur, on peut envisager, pendant les premières années du SMAS, d'assouplir provisoirement la limite dans le cas d'un SMAS fonctionnant en AMRF. Les systèmes SMAS employant une technique d'AMRT à large bande ne pourront pas tous offrir une telle possibilité. Une telle solution pourrait être envisageable dans la pratique, pour autant que le plan de fréquences du SMAS ne fasse pas l'objet de contraintes excessives et que les niveaux d'intermodulation et de rayonnements non essentiels dans le répéteur soient suffisamment faibles.

3. Brouillages causés aux récepteurs du service fixe par les émissions des stations spatiales du SMAS

L'Article 28 limite le brouillage des stations de Terre par les satellites en définissant les valeurs maximales de densité spectrale de puissance surfacique. Toutefois, les dispositions actuelles de l'Article 28 ne fixent aucune limite de ce type pour ce qui est de la bande de fréquences définie au numéro 730 du Règlement des radiocommunications.

A titre d'exemple de l'ordre de grandeur des puissances surfaciques maximales actuellement prévisibles dans le SMAS, on utilise les valeurs suivantes:

$$-165 \text{ dBW/m}^2 \cdot \text{Hz}$$

Ces valeurs sont fournies par l'équation représentative de la puissance surfacique requise:

$$\text{Puissance surfacique (dBW/m}^2 \cdot \text{Hz)} = E_b/N_o + T - 228,6 + 10 \log (R/B) - A_o + M \quad (1)$$

où:

E_b/N_o : rapport (en dB) de l'énergie par bit à la puissance de bruit par Hz, requis pour un taux d'erreur binaire donné;

T : température de bruit du système récepteur (en dB(K⁻¹));

- R : débit binaire (bits par seconde) avec MDP-2;
- B : largeur de bande (Hz) de l'émission du satellite du SMAS (par hypothèse, largeur de bande du lobe principal, égale à deux fois le débit binaire du MDP-2);
- A_o : surface équivalente de l'ouverture dB(m²) de l'antenne de la station terrienne d'aéronef;
- M : marge (dB) de dégradation due notamment aux trajets multiples et aux pertes de polarisation.

Plusieurs des valeurs de paramètre utilisées dans l'équation (1) ont été définies par l'OACI [OACI, 1986]; c'est ainsi que le taux d'erreur binaire ne doit pas être supérieur à 10^{-5} , que le rapport G/T du récepteur de l'aéronef doit présenter une valeur minimale de $-26 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$, avec un gain d'antenne de 0 dBi et que le débit binaire doit s'établir à 600 bit/s au minimum. On obtient alors une valeur de E_b/N_o de 9,5 dB avec une modulation par déplacement de phase bivalente; $T = 26 \text{ dBK}$ (400 K), $R = 600 \text{ bit/s}$ et $B = 1\ 200 \text{ Hz}$; enfin $A_o = -25,4 \text{ dB(m}^2\text{)}$. En conséquence, il faut une puissance surfacique de $-165 \text{ dBW/m}^2 \cdot \text{Hz}$ pour obtenir une marge M d'environ 6 dB qui fait partie des valeurs envisagées pour plusieurs systèmes opérationnels du SMAS [Smith, 1987].

Certes, la valeur de puissance surfacique obtenue dans cet exemple de SMAS dépasse sensiblement les limites établies pour le service fixe par satellite, mais les éléments suivants pourraient améliorer cette situation de partage.

- Certains systèmes SMAS pourront utiliser des faisceaux ponctuels ou sous-régionaux émis par l'antenne du satellite, ce qui permettra d'assurer la discrimination nécessaire relativement aux stations fixes situées à l'extérieur de la zone de couverture.

- Le nombre de satellites SMAS devrait être très inférieur à celui des satellites du service fixe pris comme hypothèse dans les analyses de puissance surfacique sur lesquelles est fondé l'Article 28 du Règlement des radiocommunications. Dans une région donnée, il est peu probable que plus d'une voie à forte puissance surfacique soit source de brouillage dans la même largeur de bande de référence de 4 kHz. Cette quasi-certitude découle du fait que l'antenne de la station terrienne d'aéronef prise comme référence (0 dBi) ne permettrait pas, dans la région considérée, de réutiliser les fréquences dans le même canal et avec la même polarité. Les voies SMAS de plus faible puissance surfacique pourraient produire deux brouillages dans la même largeur de bande de référence de 4 kHz dans la région considérée mais, dans ce cas, le niveau de brouillage serait sans doute inférieur à celui d'une voie à puissance surfacique élevée.

- Les systèmes fixes fonctionnant dans la bande des 12,5 GHz peuvent généralement être englobés dans des circuits comportant beaucoup moins de liaisons que prévu dans le circuit fictif de référence du service fixe. Un plus petit nombre de récepteurs du service fixe pourraient être exposés à la puissance surfacique du SMAS. Donc, la dégradation globale des circuits fixes due à une puissance surfacique donnée, dans cette gamme de fréquences, peut être inférieure à celle qui se produit à des fréquences supérieures, où le circuit fictif de référence est davantage représentatif des réseaux réels.

4. Brouillage des récepteurs du service fixe par des émissions de stations terriennes d'aéronef

Les émissions de stations terriennes d'aéronef risquent de brouiller les récepteurs du service fixe, comme indiqué dans le Rapport 773. Dans cette étude, cependant, des mesures ont montré que ce brouillage était momentané (voire acceptable d'un point de vue statistique), en raison de la faible ouverture de faisceau des stations fixes dont il était question dans le document (c'est-à-dire environ 8 GHz). Dans la bande de fréquences des 1,6 GHz, il faut supposer que l'ouverture de faisceau des stations fixes est nettement supérieure. Parmi les facteurs susceptibles de réduire l'éventualité, la durée et la gravité des brouillages préjudiciables sur 1,6 GHz, on peut citer:

- La solution du problème du brouillage causé par les stations fixes aux satellites SMAS, grâce à la planification des fréquences, parce qu'elle réduirait la probabilité d'un brouillage des stations fixes par les stations terriennes d'aéronef. Les dispositions des plans de fréquences qui atténueraient le premier type de brouillage pourraient aussi, dans une certaine mesure, atténuer le second type de brouillage, à condition de recourir à l'intercalage des canaux.

- Les distances d'espacement auxquelles se produisent des brouillages préjudiciables peuvent ne pas être grandes, puisque la p.i.r.e. du service fixe peut être nettement plus élevée que celle des stations terriennes d'aéronef brouilleuses (voir la section 2). Ce problème pourrait donc faire l'objet d'une coordination et d'une solution sur le plan national, mais on ne peut en préjuger.

- Dans un avenir proche, les configurations géométriques dans lesquelles il risque de se produire des brouillages préjudiciables correspondent peut-être à l'exploitation des aéronefs pour laquelle on prévoit un recours relativement limité au SMAS dans certaines zones, par exemple pour les aéronefs à voilure fixe volant à basse altitude et à faible vitesse. En revanche, certains aéronefs comme les hélicoptères se prêteraient tout à fait à une exploitation dans des configurations où risqueraient de se produire des brouillages préjudiciables.

5. Brouillages causés aux stations terriennes d'aéronef par des émissions du service fixe

La probabilité de brouillages causés par les émetteurs du service fixe à la réception des signaux SMAS à bord d'un aéronef est grande en raison des faibles p.i.r.e. émanant des satellites du SMAS et du niveau par conséquent faible des signaux reçus, comparés aux p.i.r.e. et au niveau des signaux de brouillage potentiel provenant des stations fixes. En outre, en volant à haute altitude, les aéronefs risquent de recevoir un brouillage causé par les émetteurs de Terre éloignés. D'après les relations géométriques de couplage relatives à l'antenne d'émission du faisceau hertzien et de l'antenne de l'aéronef pour la réception du satellite, on pourrait constater une discrimination de l'antenne de 0 dB. La distance, en visibilité directe, à laquelle un signal du faisceau hertzien de Terre pourrait être reçu, peut atteindre environ 400 km. En conséquence, le signal brouilleur reçu peut être supérieur de plus de 30 dB au signal du satellite, dans des conditions de visibilité directe, en fonction des densités spectrales de p.i.r.e. de la station fixe et du satellite.

Dans les zones de lignes aériennes à trafic intense, on peut pallier le brouillage potentiel par le choix des emplacements du service fixe, la réduction de la puissance des émetteurs avec des trajets plus courts, l'utilisation de l'effet d'écran du terrain, la planification des fréquences et l'espacement géographique. De nouvelles études sont nécessaires pour vérifier si ces mesures sont viables.

6. Résumé

On a procédé à une évaluation préliminaire du partage des fréquences entre le SMAS et le service fixe. Il en ressort qu'il existe de grandes possibilités de brouillage préjudiciable entre ces services. Néanmoins, une étude complémentaire devrait être menée dans les domaines suivants:

- bilans de bruit et de brouillage pour le SMAS;
- densité spectrale de puissance typique du service fixe;
- dérivation des limites de pointage d'antenne, de puissance d'entrée et de p.i.r.e. applicables aux stations fixes, nécessaires pour protéger les satellites du SMAS;
- dérivation de la puissance surfacique des satellites du SMAS nécessaire à la protection des stations fixes;
- brouillages entre les stations terriennes d'aéronef et les stations fixes, y compris l'application des principes relatifs à la zone de coordination et de protection énoncés dans le Rapport 773.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMSC [1er février 1988] - American Mobile Satellite Corporation - Application of the American Mobile Satellite Corporation to the Federal Communications Commission.

OACI [1986] - ICAO Special Committee on Future Air Navigation Systems, third meeting, [FANS/3, 1986], ICAO Document 9503, novembre 1986.

SMITH, G.K. [juin 1987] - INMARSAT plans for early introduction of aeronautical satellite communications - IEEE International Conference on Communications (ICC), Seattle, Etats-Unis d'Amérique, juin 1987.

ANNEXE II

PROJET DE SERVICE MONDIAL AIRCOM

1. Introduction

La présente Annexe décrit un projet de service mobile aéronautique mondial par satellite (AIRCOM) qui sera offert aux compagnies d'aviation commerciales et à leurs passagers.

L'OTC Australie, Teleglobe Canada, France Telecom et la SITA (Société internationale des télécommunications aéronautiques) participent à la planification et à la mise en oeuvre de ce service.

Les caractéristiques de réseau dans le cadre de ce service seront entièrement compatibles avec les spécifications d'INMARSAT relatives au service mobile aéronautique par satellite et la spécification 741 du Comité de l'électronique aérospatiale (AEEC).

2. Service AIRCOM par satellite

De nombreuses possibilités de communications de données air-sol ainsi que de téléphonie air-sol de haute qualité seront offertes par le service AIRCOM par satellite pour répondre aux besoins des applications suivantes:

- Communications du service de l'exploitation aéronautique (AOC)
- Communications administratives aéronautiques (AAC), et
- Correspondance publique aéronautique (APC).

Ce système assurera aussi des communications relatives aux services de la circulation aérienne (ATS), y compris la surveillance asservie automatique et des communications de données/téléphonie entre les équipages ou systèmes d'aéronef et le personnel ou les terminaux de l'ATS.

Au nombre des avantages offerts aux compagnies aériennes et aux exploitants d'aéronefs par ce service, on peut citer:

- un réseau coordonné de stations terriennes pour l'accès au secteur spatial disponible dans les trois régions océaniques, à savoir celles de l'océan Atlantique, de l'océan Indien et de l'océan Pacifique;
- une entière compatibilité avec les services de communications aériennes en ondes métriques aussi bien à bord des aéronefs qu'au sol;
- une uniformité des interfaces avec les réseaux publics pour assurer la commutation cohérente et efficace des communications de données et de téléphonie;
- une administration globale et centralisée du service, y compris la facturation des passagers pour le compte des transporteurs aériens;
- une assistance aux compagnies aériennes pour la planification et la mise en place du service, y compris la coordination et le soutien des programmes d'essai.

En ce qui concerne les communications de données, on peut envisager les applications AOC/AAC typiques suivantes:

- Bulletins météorologiques d'aéronefs transmis automatiquement aux stations météorologiques du monde entier et destinés à d'autres aéronefs volant dans la même zone.
- Accès facile et automatique de l'équipage aux installations au sol, par exemple pour la planification des vols, les conditions météorologiques au sol et les services d'"avis aux pilotes" (NOTAM), comme ceux qui sont assurés à la base principale de la compagnie d'aviation.
- Analyse en temps quasi-réel des données synthétisées par des Unités d'acquisition modernes de données numériques relatives aux vols (DFDAU) ou par des systèmes de contrôle des conditions aéronautiques (ACMS).
- Communications administratives aéronautiques afin d'ouvrir une nouvelle gamme de services en vol tels que réservations, formalités et assistance à l'arrivée, etc.

Du point de vue technique, les communications de données par l'intermédiaire du service AIRCOM par satellite seront offertes aux aéronefs équipés:

- d'une antenne d'aéronef à faible gain (0 dBi) permettant d'assurer des services de transmission de données à faible débit à partir de 600 bit/s, avec la possibilité d'aller jusqu'à 1 200 bit/s à l'aide de satellites de la future génération;
- d'une antenne à gain élevé (12 dBi), au moyen de laquelle le système peut acheminer divers trains de données allant jusqu'à 10,5 kbit/s et des communications téléphoniques de haute qualité codées à 9,6 kbit/s.

En ce qui concerne les communications téléphoniques, les possibilités suivantes seront offertes:

- communications téléphoniques de l'équipage avec les RTPC, les réseaux privés des compagnies aériennes et les centres ATC, etc.;
- communications aéronautiques des passagers (APC), à l'aide de la numérotation directe à partir des aéronefs; communications vers toute destination du monde entier par l'intermédiaire des RTPC internationaux avec paiement par carte de crédit sans assistance de l'équipage.

Une priorité absolue sera accordée au trafic de détresse et aux communications ATS et AOC de sécurité par l'électronique de bord et l'équipement des stations terriennes au sol (GES).

3. Caractéristiques du réseau à satellite AIRCOM

La configuration du système en projet comprendra initialement cinq stations terriennes au sol (GES) couvrant les trois régions océaniques. Les stations terriennes au sol fonctionneront dans les bandes des 3/6 GHz et 1,5/1,6 GHz avec le satellite et assureront l'interface avec le réseau de Terre pour les communications, publiques et privées, de téléphonie et de données.

Les stations terriennes d'aéronef (AES) communiqueront avec le secteur spatial dans la bande des 1,5/1,6 GHz et assureront, à l'aide des équipements d'aéronef, l'interface pour les communications des passagers et de l'équipage.

Les Tableaux II, III et IV ci-après résument respectivement les principales caractéristiques aéronautiques du système, les caractéristiques typiques des stations terriennes au sol et les caractéristiques typiques des stations terriennes d'aéronef.

4. Résumé

Le système à satellites AIRCOM doit entrer en exploitation au milieu des années 90; il sera le premier à assurer un service mobile aéronautique mondial par satellite conforme aux normes d'INMARSAT, de l'OACI et de l'AEEC. Ce système devrait, dans les prochaines années, contribuer largement à améliorer la sécurité et l'économie du transport aérien et à assurer des services de communication aux passagers des compagnies aériennes.

TABLEAU II

Principales caractéristiques du système à satellites AIRCOM P

CARACTERISTIQUES DU SYSTEME	SYSTEME ENTIEREMENT OPERATIONNEL
Gain d'antenne de la station terrienne d'aéronef	0 dBi et 12 dBi
Services de communication	
- Téléphonie et données ATS	Air-sol et sol-air
- Correspondance publique de téléphonie	Air-sol et sol-air
- Correspondance publique de données	Air-sol et sol-air
- Exploitation de la compagnie aérienne	Air-sol et sol-air
Interconnexion des stations	Interconnexion totale dans et entre les régions océaniques (c'est-à-dire liaisons entre stations terriennes au sol et entre stations de coordination de réseaux)
Assignation des voies	Voies préassignées et utilisation commune des stations de coordination de réseaux
Débits sur les voies de données et de signalisation	débit moyen et débit élevé
- Voies d'aller	600, 1 200, 2 400, 4 800 et 10 500 bit/s (au choix)
- Voies de retour	600, 1 200, 2 400 et 10 500 bit/s
Débit sur la voie téléphonique	Débit 1/2 codé: 21 000 bit/s
Largeur de bande des voies	2,5 - 17,5 kHz
Débit du codage téléphonique	9,6 kbit/s initialement (d'autres débits binaires pourront être utilisés dans le futur, par exemple 2,4 à 16 kbit/s)
Méthode d'accès aux voies:	
- Téléphonie	SCPC
- Données et signalisation sur la voie d'aller	MRT
- Données et signalisation sur la voie de retour	Accès aléatoire (système Aloha crénelé) et MRT-Réservation
Méthode de modulation/codage des voies:	
- téléphonie	MDP-4-A, débit 3/4 ou 1/2 CED
- données/signalisation	MDP-2-A (MDP-4-A aux débits de voie supérieurs) débit 1/2 CED (la méthode CED consiste en un codage à convolution avec décodage Viterbi et $k = 7$)

TABLEAU III

Caractéristiques typiques des stations terriennes au sol

G/T	(ondes centimétriques)	32,0 dB(K ⁻¹) min.
	(ondes décimétriques)	2,0 dB(K ⁻¹) min.
Gain d'antenne	(ondes centimétriques)	54 dBi min., émission 50,5 dBi min., réception
	(ondes décimétriques)	29,5 dBi min., émission 29,0 dBi min., réception
Polarisation	(ondes centimétriques)	circulaire dextrogyre émission/ circulaire lévogyre réception
	(ondes décimétriques)	dextrogyre émission et réception
Bandes de fonctionnement:	(ondes centimétriques)	6 425 - 6 443,0 MHz émission 3 600 - 3 623,0 MHz réception
	(ondes décimétriques)*	1 530 - 1 559 MHz réception 1626,5 - 1 660,5 MHz émission
Systeme de poursuite		POURSUITE PAS A PAS précision 0,01 degré efficace ou meilleure
Diagramme d'émission des lobes latéraux	(ondes centimétriques)	$G = 32 - 25 \log \theta$ pour $1^\circ \leq \theta \leq 48^\circ$
		$G = -10$ pour $\theta > 48$
	(ondes décimétriques)	$G = 40 - 25 \log \theta$ pour $6^\circ < \theta \leq 40^\circ$
		$G = 0$ pour $\theta > 4\theta$
Equipement des terminaux aéronautiques au sol (AGT) (stations terriennes)		Conforme aux spécifications INMARSAT et 741 AEEC

* Ces bandes ne pourront être utilisées par la station terrienne au sol que pour les essais de contrôle automatique des fréquences et à des fins de surveillance.

TABLEAU IV

Caractéristiques typiques des stations terriennes d'aéronef

G/T	-26 dB(K ⁻¹) avec faible gain d'antenne -13 dB(K ⁻¹) avec gain d'antenne élevé
Gain d'antenne: (réception/émission)	0 dBi avec faible gain d'antenne 12 dBi avec gain d'antenne élevé
Polarisation:	Circulaire dextrogyre pour la réception et l'émission
Bandes de fonctionnement*:	1 530 - 1 559 MHz (réception) 1 626,5 - 1 660,5 MHz (émission)
Zone de couverture:	Azimut: 360° Angle de site: entre 5° et 90°
Équipement de communication de l'avionique des aéronefs	Conforme aux spécifications INMARSAT et 741 AEEC (variante AMRF)

* Les bandes 1 530 - 1 544 MHz et 1 626,5 - 1 645,5 MHz ne pourront être utilisées par les stations à bord d'aéronefs que pour la détresse et la correspondance publique (RR963 et 3571).

ANNEXE III

PRESENTATION SOMMAIRE DU SYSTEME AERONAUTIQUE
PAR SATELLITE INMARSAT

Cette Annexe contient une présentation technique sommaire du système aéronautique par satellite actuellement mis en oeuvre par INMARSAT et ses signataires.

1. Introduction

La description définitive du système est contenue dans le document de INMARSAT: "Aeronautical System Definition Manual (SDM)" [INMARSAT, 1989].

INMARSAT s'est engagé à ce que le SDM soit compatible avec les caractéristiques techniques et de fonctionnement des systèmes de communications relatives à la sécurité et à la régularité des vols, telles qu'elles sont définies par le Comité spécial des futurs systèmes de navigation aérienne de l'OACI (FANS), par les Normes et pratiques recommandées (Standards and Recommended Practices, SARPS) préparées par les experts de l'OACI pour les services mobiles aéronautiques par satellite (SMAS), et par les Normes de qualité minimale de fonctionnement (Minimum Operating Performance Standards, MOPS) qu'élabore actuellement la RTCA.

La conception du système INMARSAT est destinée à faire face aux besoins prévus pour les dix prochaines années au moins, et possède donc des caractéristiques dont il est peu vraisemblable qu'il soit tiré immédiatement parti. INMARSAT a choisi, pour la première mise en oeuvre du système, un sous-ensemble de ses possibilités totales, appelé "Système initial". Ce sous-ensemble sert de base aux premières acquisitions de matériel au sol et de bord. D'autres caractéristiques de la conception du système seront mises en oeuvre en réponse à la demande des usagers. Les extensions des capacités initiales seront incorporées progressivement dans le "Système étendu".

INMARSAT a mis au point une conception détaillée de système aéronautique par satellite, capable d'utiliser aussi bien ses satellites existants que ceux qui sont en construction et dont le lancement est prévu pour 1989-1990. Outre cela, il tire parti des capacités étendues de futurs satellites, comme les faisceaux ponctuels. Le système prévoit, au début, des services de téléphonie et de données, et diverses dispositions permettront de futures extensions, comme les moyens de navigation.

Le début de l'exploitation complète à l'échelle mondiale est prévu pour 1989. Parmi les usagers des services de téléphonie et de données figureront les compagnies aériennes (pour le contrôle d'exploitation et les communications administratives), les services de la circulation aérienne (pour la régulation du trafic aérien et la diffusion d'informations de sécurité), les cadres et les dirigeants de sociétés utilisant l'avion (pour le télex, la télécopie et la communication entre ordinateurs) et le public des voyageurs. Des techniques nouvelles pour l'aviation, comme la surveillance asservie automatique (ADS, signalement automatique de position par les aéronefs) seront applicables à l'échelle mondiale.

2. Capacités du service

2.1 Besoins en services

La conception du système est fondée sur les exigences en matière de trafic de communications aéronautiques, définies par les usagers en puissance. Ces exigences continueront de s'affiner à mesure que l'on se familiarisera avec les télécommunications aéronautiques par satellite, et que l'expérience de leur utilisation se répandra. Il faut des services pour tous les types d'aéronefs, du plus gros long courrier des compagnies aériennes jusqu'aux petits appareils des sociétés et de l'aviation civile.

2.2 Communications pour l'exploitation et la circulation aérienne

Les exigences en communications destinées à satisfaire les besoins du contrôle d'exploitation et de la régulation du trafic aérien comprennent:

- Des communications de données air-sol. Un message peut être lancé automatiquement, ou à la demande de l'équipage. Les longueurs typiques de messages sont de 100 à 2 000 bits, avec un taux caractéristique d'erreurs dans les messages non détectées au moins égal à 10^{-9} (E-9). Pour les compagnies d'aviation, de 5 à 30 messages à l'heure seront nécessaires mais, pour la surveillance asservie automatique (ADS), le volume pourrait atteindre 2 messages à la minute, ou même davantage pendant de courtes périodes.
- Le trafic de sécurité a obligatoirement priorité, et le délai de traitement devrait être maintenu au minimum, un délai maximal de 3 à 5 secondes entre le début d'un message et sa réception étant typique pour les messages urgents.
- Des communications de données sol-air. On peut penser que les messages seront typiquement moins nombreux et plus courts que dans le sens air-sol. Ces messages compteraient de 100 à 1 000 bits, dont une large part seraient des interrogations ou des invitations à émettre. Il y aura aussi un nombre important de messages radiodiffusés.
- Des communications téléphoniques. Des communications téléphoniques de bonne qualité (intelligibilité élevée) avec l'équipage sont nécessaires pour la régulation du trafic aérien (ATC) et le contrôle de l'exploitation aéronautique (AOC). Il faut des communications duplex et, dans certains cas, il pourra être nécessaire que deux membres de l'équipage communiquent simultanément.

2.3 Communications des passagers

Les exigences en matière de communications pour les passagers comprennent :

- Des communications téléphoniques. Des communications téléphoniques d'une qualité "proche de l'interurbain", avec connexion automatique au réseau téléphonique commuté international.
- Des communications de données. Capacité d'émettre et de recevoir des données, télex et télécopie compris.

Jusqu'à six voies téléphoniques à l'usage des passagers, par aéronef.



2.4 Types de services

Plusieurs types de services de données seront disponibles. Ils comprennent entre autres:

Service "orienté vers la connexion" en mode paquets

Ce mode convient à l'acheminement de messages longs ou aux échanges de données bidirectionnels. Il se caractérise par l'échange d'informations de commande de réseau lors de l'établissement de la liaison, entre les équipements de l'utilisateur appelant et de l'utilisateur appelé et les réseaux de Terre et à satellite qui servent d'intermédiaires. Après l'établissement initial de la liaison, tous les paquets de données suivants contiennent des informations abrégées d'adresse et de commande, et comportent, à titre individuel, beaucoup moins de transmissions de servitude que les paquets sans connexion. Ce type de service convient aux dialogues par questions et réponses, et la longueur des messages individuels n'est pas limitée.

Services en "mode circuit"

Les connexions de données en mode circuit offrent un "canal" transparent de transmission de données de bout en bout, d'un débit binaire donné, et auquel l'utilisateur doit appliquer ses propres protocoles (par exemple, à l'aide d'un télécopieur). La transmission en mode circuit ne comporte donc aucune interface normalisée du système pour les données par paquets, ni procédure de protection contre les erreurs, mais peut être utile pour certaines applications comme la télécopie.

2.5 Services de données particuliers à certaines applications

Les services spéciaux de données comprennent les techniques d'invitation à émettre et les techniques associées. Dans le cas de l'invitation à émettre, un usager au sol ordonne à un aéronef de signaler des données spécifiées, soit en une fois, soit à intervalles réguliers. Des exemples sont les messages de surveillance asservie automatique (ADS) et le compte rendu de la condition technique de l'aéronef.

On prévoit que l'invitation à émettre sera une application fondamentale des services de régulation du trafic aérien. Dans son sens le plus simple, l'invitation à émettre permet à un contrôleur au sol d'ordonner à un aéronef de signaler immédiatement sa position. D'autres modes d'utilisation de l'invitation à émettre sont "à base cyclique": les aéronefs ont ordre d'émettre périodiquement en séquence. Les aéronefs peuvent aussi rendre compte en désordre, à leur gré. L'application de chacun de ces modes de fonctionnement sera choisie en temps utile, compte tenu des résultats des travaux du Comité FANS. La conception du système INMARSAT lui permet de prendre en charge tous les modes identifiés par le Comité FANS.

3. Possibilités de services téléphoniques

Des services téléphoniques peuvent être utilisés depuis le poste de pilotage et la cabine. Les appels téléphoniques depuis la cabine peuvent être évincés par les appels depuis le poste de pilotage, au gré du pilote.

Le système achemine la voix sous une forme numérique. Le débit de codage de la voix a été fixé initialement à 9,6 kbit/s, bien que la conception du système permette de mettre en oeuvre une large plage de débits, selon la qualité désirée et les capacités techniques. Le codage de la voix est décrit plus en détail ci-dessous.

3.1 Téléphonie publique: air-sol

Pour tous les usagers à bord d'aéronefs, l'utilisation du téléphone public est exactement la même que celle d'un poste téléphonique courant de bureau. On appelle un numéro international, qui commence par le préfixe international, suivi de l'indicatif du pays et du numéro demandé, et le système à satellites établit automatiquement la communication. La numérotation et la progression consécutive de l'appel, telles que les perçoivent le demandeur et le demandé, suivent le même scénario qu'un appel sur la Terre. Dans le cas d'appels par des passagers de compagnies aériennes, un dispositif de taxation de la communication figurera dans le poste téléphonique; ce sera le plus souvent un lecteur de cartes de paiement. En cas d'utilisation d'une carte de paiement, le système transfère les détails pertinents de la carte vers le sol, où ils sont combinés, pour facturation, avec les détails enregistrés de la communication; les vérifications d'autorisation et de validité de la carte peuvent se faire à bord ou au sol.

Pour l'utilisation à partir du poste de pilotage (ou de la cabine, pour les appareils appartenant à des entreprises), la taxation se fait automatiquement, par enregistrement, à la station terrienne au sol (STS), de l'utilisation du satellite. L'identification de l'aéronef et la durée de la communication sont les principaux paramètres retenus à cet effet, et on les enregistre en contrôlant les signaux internes au système employés dans l'établissement et la libération des appels.

3.2 Téléphonie publique: sol-air

Bien qu'ils puissent être limités par le système, les appels de correspondance publique sol-air ne sont actuellement pas autorisés pour les passagers des compagnies aériennes. Les raisons en sont: la difficulté de trouver la personne demandée à bord de l'aéronef, l'absence actuelle d'un moyen défini d'identification d'un vol ou d'un aéronef précis par un numéro téléphonique public, et des considérations de sécurité. Les appels sol-air destinés au poste de pilotage (ou à la cabine des aéronefs autres que ceux des compagnies aériennes) se font soit à partir de lignes privées soit par convention particulière (authentification de l'appel par la STS), à partir du réseau public.

4. Aspects techniques de la conception du système

Cette section contient un examen détaillé des aspects techniques de la conception du système.

4.1 Antennes d'aéronefs

Les terminaux d'aéronefs fonctionneront dans la bande 1,5/1,6 GHz. Dans les télécommunications par satellite, la puissance de la liaison prime et cela est accentué, pour les aéronefs, par les limitations de la qualité de fonctionnement des antennes de bord, conséquence des problèmes de support, de pénétration dans l'air et de poids. Il faut réaliser un compromis qui assure un gain d'antenne maximal (donc des charges minimales pour le segment spatial) pour un coût de transport acceptable (coût de l'investissement initial, auquel s'ajoutent ceux des mises à jour et de l'entretien de l'équipement).

Pour la conception du système, on est parti de l'hypothèse que les services pouvaient être regroupés schématiquement en deux catégories: les transferts de données à faible volume et une combinaison de transferts fréquents de données et de trafic téléphonique intense.

Pour la première catégorie de services, le propriétaire d'un aéronef devrait pouvoir faire poser une antenne en cherchant à être le moins pénalisé du point de vue de la capacité de transport, étant entendu que cela pourra lui faire encourir des frais d'utilisation plus élevés qu'un système d'antenne à gain plus élevé. Un gain d'antenne minimal de 0 dBiC garantira la possibilité de transférer des données à des débits de 300 bit/s en utilisant tous les satellites actuels et prévus du service mobile dans la bande 1,5/1,6 GHz, et il peut être obtenu avec une petite antenne d'aéronef non orientée, sous forme d'hélice, d'assemblage de microlignes à ruban, ou de doublets infléchis, avec des radômes appropriés. Un assemblage de microlignes à ruban devrait mesurer environ 15 x 15 cm, et une hélice pourrait être logée dans une lame haute de 20 cm environ. Un système d'antenne de ce type pourrait être monté pour faire face à des besoins de redondance ou à des exigences réglementaires, ou dans d'autres situations où l'on s'attend à un trafic peu intense.

La transmission de données à un débit plus élevé, et les services téléphoniques de bonne qualité (proche de la qualité de l'interurbain), devraient être accessibles sur tous les aéronefs existants et en préparation, soit, essentiellement, par le service dans la bande 1,5/1,6 GHz avec faisceau à couverture globale. Au terme d'une longue période de choix de compromis techniques, on a déduit qu'un gain d'antenne minimal de 12 dBiC est celui qui entraînera une pénalisation acceptable du point de vue de la capacité de transport, eu égard aux nouveaux services de téléphonie et de données, tout en permettant un coût d'utilisation assez bas pour encourager une large adoption du système. La mise en place progressive de nouveaux engins spatiaux, qui utilisent des faisceaux ponctuels pour servir des zones à forte densité de trafic, crée un potentiel de nature à permettre des réductions graduelles du coût de prestation des services.

Les antennes d'un gain de 12 dBiC ont une ouverture de faisceau de 60° environ et doivent être orientées pour compenser les mouvements de l'aéronef (valeurs typiques: roulis, $\pm 30^\circ$; tangage, $\pm 15^\circ$). Un certain nombre de constructions sont possibles, parmi lesquelles: l'élément à orientation mécanique; le réseau à commande de phase, monté sur le sommet du fuselage; la lame contenant plusieurs réseaux à commande de phase. Il est à prévoir que différents types d'antennes trouveront application sur différents types d'aéronefs.

On s'attend à ce que la plupart des services, notamment les communications téléphoniques des passagers, soient assurés au moyen de l'antenne "à gain élevé" de 12 dBiC, à polarisation circulaire (taux d'ellipticité meilleur que 6 dBO) et niveau de crête des lobes latéraux, dans toutes les conditions d'orientation, inférieur de 13 dB au faisceau principal dans la direction de tout satellite séparé en orbite du satellite utile par 45° ou davantage.

4.2 Caractéristiques de la voie physique

La voie physique des satellites du service aéronautique comprend des liaisons dans la bande 1,5/1,6 GHz entre l'aéronef et le satellite, et les liaisons de connexion entre le satellite et les stations terriennes aéronautiques fixes. En raison des limitations des antennes d'aéronefs, les liaisons dans la bande 1,5/1,6 GHz se caractérisent par un rapport signal/bruit thermique peu élevé, et par la présence d'évanouissements par trajets multiples. Les liaisons de connexion ne présentent pas d'évanouissements par trajets multiples, mais subissent des évanouissements causés par les précipitations, selon les fréquences employées. Ce sont les liaisons de connexion dans la

bande 3/6 GHz qui en souffrent le moins, alors que les liaisons dans la bande 11/14 GHz peuvent être gravement dégradées. (La conception actuelle du système présuppose des liaisons de connexion dans la bande 3/6 GHz parce que tous les satellites INMARSAT en sont équipés, mais cette hypothèse n'est pas essentielle et le système peut facilement accueillir des liaisons de connexion sur d'autres fréquences).

Dans la bande 1,5/1,6 GHz, les trajets multiples résultent de réflexions du signal par la mer (à un moindre degré, par le sol) ou par la cellule de l'aéronef; ils ont été étudiés et mesurés de façon approfondie au cours des 20 dernières années. Parmi les études récentes figurent [ASE, 1985; DFVLR, 1987]. La conclusion à tirer de ces travaux, ainsi que d'autres, est que les effets de la propagation par trajets multiples deviennent appréciables à des angles de site égaux ou inférieurs à 15°, et que la conception du système doit permettre d'admettre des rapports porteuse/propagation par trajets multiples (C/M) de 10 dB environ, avec une largeur de bande d'évanouissement de 30 Hz et plus.

4.3 Débits binaires de transmission

Pour faire face à cette grande diversité de besoins de services, aux deux types d'antennes d'aéronef et aux différentes capacités des satellites qui seront à la disposition des usagers au fur et à mesure de l'évolution du système aéronautique, il faut une gamme de débits binaires. Une contrainte fondamentale réside dans la nécessité de pouvoir faire fonctionner tous les services au moyen de satellites à couverture globale, ce qui limite les débits de transmission par porteuse RF à quelques dizaines de kbits/s avec une antenne d'aéronef à gain élevé, et à quelques centaines de bits/s avec une antenne d'aéronef à faible gain. Dans le sens sol-air, les voies peuvent être groupées sur une voie à multiplexage dans le temps à débit élevé, mais cela impose une capacité fixe et conduit à utiliser une largeur de bande correspondante fixe qui doit être acceptée pour toute la durée de vie du système. Pour cette raison, ainsi que pour d'autres, cette solution n'a pas été adoptée dans la définition du système.

4.4 Qualité téléphonique

L'économie de la prestation de services téléphoniques aux passagers ou à l'équipage impose un débit de transmission compris dans une plage de 4 800 à 9 600 kbit/s. Il n'existe actuellement pas de norme du CCITT, ni de norme généralement reconnue, pour le codage de la voix à ces débits, et il faudra quelques années avant qu'une technique particulière de codage de la voix soit reconnue comme norme pour cette application. Aux fins de la prestation de services initiale, INMARSAT a adopté un codec à fréquences vocales d'un débit de 9 600 bit/s. L'on s'est aussi beaucoup intéressé au débit de 8 000 bit/s. Le travail dans ce domaine se poursuit très activement, et il se peut que des codeurs à 4 800 bit/s, qui auront une qualité téléphonique adéquate, apparaissent au cours des 2 ou 3 prochaines années.

4.5 Modulation et codage

Ceci correspond à la "couche physique" de la liaison par satellite. Deux techniques de modulation ont été retenues, pour assurer des débits de canaux radioélectriques de 600 à 2 400 bit/s, et au-dessus de 2 400 bit/s, respectivement. Jusqu'à 2 400 bit/s, on privilégie un schéma binaire pour sa résistance au bruit de phase, à la distorsion due à la propagation par trajets multiples et aux imperfections du filtre, même au prix du rendement de la largeur de bande. Cela, parce qu'il est probable qu'un tel débit soit surtout



utilisé pour des procédures d'accès initial, ou en redondance avec un canal à débit plus élevé (par exemple, en cas de perte de l'antenne à gain élevé). Le schéma retenu est la MDP-2 différentielle "symétrique", où une phase de porteuse de 90° est successivement insérée et supprimée avec chaque bit transmis, de façon à limiter les variations de l'enveloppe du signal radioélectrique [Winters, 1984]. Cela permet le filtrage du signal avant un amplificateur de puissance non linéaire, tout en limitant l'étalement du spectre après l'amplificateur. Lorsque cette méthode de modulation est combinée avec le filtrage de voie particulier défini pour ces débits binaires (racine de cosinus majoré de 40%), elle est nommée "modulation par déplacement de phase bivalente pour l'aviation" (MDP-2-A).

Au-dessus de 2 400 bit/s, on a adopté une technique de quadrature de phase pour obtenir un meilleur rendement de la largeur de bande, conformément aux caractéristiques d'évanouissements rapides du canal. Il s'agit d'une forme de MDP-4 avec décalage des trains binaires [Fang, 1981] qui, comme le schéma binaire, limite les fluctuations de l'enveloppe du signal radioélectrique et permet d'incorporer un amplificateur non linéaire dans la voie de transmission. Pour son utilisation dans l'application aéronautique, on a défini un filtre de voie normalisé (racine de cosinus majoré de 100%), et la technique qui en découle a été normalisée sous le nom de MDP-4-A (modulation par déplacement de phase quadrivalente pour l'aviation). La conception de modulateurs MDP-2-A et MDP-4-A ainsi que la détermination de leurs caractéristiques associées de filtre de mise en forme des impulsions et leurs limites de densité spectrale de puissance sont illustrées sur les Figures 4 à 9.

4.6 Codage et entrelacement des voies

C'est là aussi une partie intégrante de la couche physique de la liaison par satellite. Les gains d'antennes d'aéronefs (0 et 12 dBiC), associés à la nécessité d'opérer avec des antennes d'engin spatial "à couverture globale" (ouverture de faisceau de 17° environ, gain d'environ 17,5 dBiC au bord de la zone de couverture, angle de site de -5°), conduisent à des liaisons aux marges très faibles entre le satellite et l'aéronef, si bien qu'il est nécessaire de protéger les transmissions par un codage de correction d'erreur directe. La disponibilité de futurs engins spatiaux à faisceaux ponctuels à gain élevé augmentera ces marges et rendra possible un choix de compromis entre largeur de bande et puissance d'émission, mais actuellement la voix et les données sont protégées par la CED.

La technique est celle d'un codage à convolution au taux de $1/2$, à longueur de contrainte de 7, et à entrelacement, pour tenir compte de ce que les erreurs, sur une voie dominée par la propagation par trajets multiples, se produisent par rafales. Il est prévu de ne pas appliquer ce codage dans les situations où la puissance n'est pas limitée et de faire passer le taux à $3/4$ dans les situations intermédiaires.

Les critères d'erreur sur la voie de transmission de bout en bout diffèrent pour les transmissions téléphoniques et les transmissions de données. La sécurité des données doit être élevée, et cela implique un taux maximal d'erreur binaire pour l'utilisateur de 1×10^{-5} après décodage en CED. Pour la voix, par contre, un taux d'erreur de 1×10^{-3} conviendra pour procurer une qualité proche de celle de l'interurbain. (Beaucoup de codeurs vocaux peuvent fonctionner en fait avec un TEB moyen qui peut atteindre 1×10^{-2} , du fait que leurs constructeurs incorporent une protection contre les erreurs pour les parties critiques de la trame de codage de la voix.)

Le codage à convolution ne sera efficace que si les rafales d'erreurs sur la voie sont rendues aléatoires par l'entrelacement. Ce procédé a été adopté dans la conception du système, et la conception de la liaison autorise de multiples débits binaires en utilisant une structure commune d'entrelaceur afin d'obtenir une "profondeur" (capacité de rangement aléatoire) constante de l'entrelaceur pour tous les débits binaires employés pour la transmission de données. L'entrelacement introduit toutefois des retards de l'ordre d'une seconde, ce qui n'est pas acceptable pour la transmission téléphonique, de sorte que, pour cette dernière, on a adopté un retard d'entrelaceur plus court, de l'ordre de 30 ms, en acceptant que l'efficacité de l'entrelaceur en soit limitée.

4.7 Format de transmission dans la couche liaison de données - Unités de signalisation

Etant donnée la nature de la voie soumise aux évanouissements par trajets multiples, il est essentiel de concevoir le format de transmission de façon à garantir une résistance maximale à de courtes et fréquentes interruptions. Ceci implique que soient conséquentes la détection des erreurs de la liaison et les procédures de correction qui lui sont associées. La solution adoptée dans la conception du système au niveau de la liaison consiste à formater toutes les données, commandes et signalisation du système comprises, en plus des données d'utilisateurs, en paquets normalisés de longueur prédéfinie, que l'on appelle "unités de signalisation". Ce procédé est bien connu en tant que technique normale d'envoi de messages de signalisation entre centraux des réseaux publics de Terre.

Dans le contexte actuel, une unité de signalisation normalisée présente les avantages d'un taux d'erreur global connu et susceptible d'être régulé, applicable à toutes les données, et d'une technique normalisée de désassemblage de tous les paquets de données, qu'ils contiennent des données d'utilisateur ou des données de commande ou de signalisation du système. Avec des unités de signalisation de taille définie d'avance, les caractéristiques d'erreur deviennent bien plus faciles à prévoir qu'avec des paquets de longueur variable.

4.8 Applications de données (interface de la couche réseau)

C'est une exigence normale de nos jours, pour toute nouvelle conception de liaison de données, que de vouloir qu'elle prenne en charge le modèle de transmission à plusieurs couches de l'ISO. En pratique, plus on introduit de souplesse dans la conception du système afin d'accepter ce modèle, et plus la charge en temps système pour les données d'adressage et de commande est lourde. La puissance et la largeur de bande ont une telle importance dans une liaison par satellite que quelques compromis avec l'organisation en couches peuvent être nécessaires, du moins quant aux couches 4 et supérieures du modèle. Comme partie intégrante de la conception du système à satellites, on a accepté que la structure en couches soit pleinement prise en charge jusqu'à la couche 3 (la couche réseau) incluse. Ceci a été obtenu par des paquets de longueur variable dans la couche réseau, pour transporter des données d'utilisateurs et d'adressage, et par la capacité d'établir des circuits virtuels. La couche réseau-transport normalisée présentée par le système est conforme à la norme ISO 8202.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASE [1985] Agence spatiale européenne - Final Report on the PROSAT Phase 1 experiments.

DFVLR [mai 1987] (Institut de recherche aérospatiale de la RFA) - Final Report on Characterization of the Aeronautical Satellite Communication Channel.

FANG, Russell J.F. [mai 1981] "Quaternary Transmission over Satellite Channels with Cascaded Nonlinear Elements and Adjacent Channel Interference", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-29, N° 5, p. 567-581.

INMARSAT [juillet 1989] Inmarsat Aeronautical System Definition Manual, Module 1, Version 1.12: System Definition.

WINTERS, Jack H. [janvier 1984] "Differential Detection with Intersymbol Interference and Frequency Uncertainty", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-32, N° 1, p. 25-33.

TABLEAU V

Principaux paramètres pour la bande 1.5/1.6 GHz des satellites INMARSAT
des 1ère et 2ème générations

Satellite/lot	P.i.r.e. dBW	G/T dB(K ⁻¹)
MARECS	34,5	-11,2
MCS	33,0	-13,0
MARISAT	27,0	-17,0
INMARSAT 2	39,0	-12,5

TABLEAU VI

Résumé des caractéristiques de transmission de la voie

Débit (bit/s)	Espacement (kHz)	Modulation	Durée de symbole de modulation	
			Microsecondes	Echantillons/Symb. avec horloge à 5,04 MHz
28 000	22,5	MDP-4-A(1)	71,43	360
21 000	17,5	MDP-4-A	95,24	480
14 000	12,5	MDP-4-A	142,86	720
10 500	7,5	MDP-4-A	190,48	960
7 200	7,5	MDP-4-A	277,78	1 400
6 000	5,0	MDP-4-A	333,33	1 680
5 250	5,0	MDP-4-A	380,95	1 920
4 800	5,0	MDP-4-A	416,67	2 100
2 400	5,0	MDP-2-A(1)	416,67	2 100
1 200	5,0/2,5 (2)	MDP-2-A	833,33	4 200
600	5,0/2,5	MDP-2-A	1 666,67	8 400

(1) Voir § 4.5.

(2) Il est possible d'atteindre 2,5 kHz dans le sens air-sol.

TABLEAU VII

Exemples de bilans de liaison pour les voies P, R et T

Bilan de liaison aller pour voies de données
à 600 bit/s (voie P) pour un angle de site de 5°Bilan de liaison retour pour voies de données à
600 bit/s (voies R et T) pour un angle de site de 5°

Satellite	MCS	MARECS	INM-II	Exemple faisceau ponctuel
Caractéristique de la liaison				
C/No requis pour la liaison (dBHz)	35.7	35.7	35.7	35.7
Liaison montante (station terrienne au sol vers satellite)				
Fréquence (GHz)	6.42	6.42	6.42	6.42
Angle de site de la st. terr. au sol (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	201.3	201.3	201.3	201.3
G/T du satellite (dB(K ⁻¹))	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0
P.i.r.e. de la st. terr. au sol (dBW)	62.0	62.0	62.0	62.0
C/No de la liaison montante (dBHz)	75.3	75.3	75.3	75.3
Satellite				
Gain du satellite (dB)	161.3	161.3	161.3	174.3
C/Imo du satellite (dBHz)	67.8	67.8	67.0	48.0
Liaison descendante (satellite vers station terrienne d'aéronef)				
Fréquence (GHz)	1.64	1.64	1.64	1.64
Angle de site de st. terr. d'aéronef (degrés)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	188.9	188.9	188.9	188.9
G/T du satellite (dB(K ⁻¹))	-26	-26	-26	-26
P.i.r.e. du satellite (dBW)	22	22	22	23
C/No de la liaison descendante (dBHz)	35.7	35.7	35.7	36.7
Qualité de fonctionnement de la liaison				
C/No obtenu (dBHz)	35.7	35.7	35.7	36.4
Marge (dB)	0.0	0.0	0.0	0.7

Satellite	MCS	MARECS	INM-II	Exemple faisceau ponctuel
Caractéristique de la liaison				
C/No requis pour la liaison (dBHz)	35.7	35.7	35.7	35.7
Liaison montante (station terrienne d'aéronef vers satellite)				
Fréquence (GHz)	1.64	1.64	1.64	1.64
Angle de site de la st. terr. d'aéronef (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	189.4	189.4	189.4	189.4
G/T du satellite (dB(K ⁻¹))	-13.0	-11.0	-12.5	-3
P.i.r.e. de la st. terr. d'aéronef (dBW)	13.5	13.5	13.5	13.5
C/No de la liaison montante (dBHz)	39.7	41.7	40.2	49.7
Satellite				
Gain du satellite	150.9	151.3	158.0	167
C/Imo du satellite (dBHz)	43.8	46.5	59.8	60
Liaison descendante (satellite vers station terrienne au sol)				
Fréquence (GHz)	4.2	4.2	3.6	3.6
Angle de site de la st. terr. au sol (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	197.6	197.6	197.6	196.3
G/T de la station terrienne au sol (dB(K ⁻¹))	32.0	32.0	30.7	30.7
P.i.r.e. du satellite (dBW)	-25.0	-24.6	-17.9	-17.9
C/No de la liaison descendante (dBHz)	38.0	38.4	45.1	54.1
Qualité de fonctionnement de la liaison				
C/No obtenu (dBHz)	31.1	36.3	38.9	48.1
Marge (dB)	-0.6	0.6	3.2	12.4

Note - Dans la réception par une station terrienne d'aéronef avec antenne à gain élevé et G/T de -13 dB(K⁻¹), la marge de la liaison sera appréciablement plus grande.

TABLEAU VIII

Exemples de bilans de liaison pour la voie C

Bilan de liaison aller pour voies téléphoniques
à 21 000 bit/s (Voie C) pour un angle de site de 5°

Bilan de liaison retour pour voies téléphoniques à
21 000 bit/s (Voie C) pour un angle de site de 5°

Satellite	MCS	MARECS	INM-II	Exemple faisceau ponctuel
Caractéristique de la liaison				
C/No requis pour la liaison (dBHz)	47.9	47.9	47.9	47.9
Liaison montante (station terrienne au sol vers satellite)				
Fréquence (GHz)	6.42	6.42	6.42	6.42
Angle de site de la st. terr. au sol (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	201.3	201.3	201.3	201.3
G/T du satellite (dB(K ⁻¹))	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0
P.i.r.e. de la station terr. au sol (dBW)	62.0	62.0	62.0	62.0
C/No de la liaison montante (dBHz)	75.3	75.3	75.3	75.3
Satellite				
Gain du satellite (dB)	161.3	161.3	161.3	161.3
C/Imo du satellite (dBHz)	67.8	69.0	67.0	60
Liaison descendante (satellite vers station terrienne d'aéronef)				
Fréquence (GHz)	1.54	1.54	1.54	1.54
Angle de site de la st. terr. d'aéronef (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	188.9	188.9	188.9	188.9
G/T de la station terr. d'aéronef (dB(K ⁻¹))	-13	-13	-13	-13
P.i.r.e. du satellite (dBW)	22	22	22	22
C/No de la liaison descendante (dBHz)	48.7	48.7	48.7	48.7
Qualité de fonctionnement de la liaison				
C/No obtenu (dBHz)	48.6	48.6	48.6	48.6
Marge (dB)	0.7	0.7	0.7	0.7

Satellite	MCS	MARECS	INM-II	Exemple faisceau ponctuel
Caractéristiques de la liaison				
C/No requis pour la liaison (dBHz)	47.9	47.9	47.9	47.9
Liaison montante (station terrienne d'aéronef vers satellite)				
Fréquence (GHz)	1.64	1.64	1.64	1.64
Angle de site de la st. terr. d'aéronef (deg)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	189.4	189.4	189.4	189.4
G/T du satellite (dB(K ⁻¹))	-13.0	-11.0	-12.5	-3
P.i.r.e. de la station terr. d'aéronef (dBW)	25.5	25.5	22.5	13.5
C/No de la liaison montante (dBHz)	51.7	53.7	49.2	49.7
Satellite				
Gain du satellite (dB)	150.9	151.3	158.0	167
C/Imo du satellite (dBHz)	55.0	57.5	60.8	60
Liaison descendante (satellite vers station terrienne au sol)				
Fréquence (GHz)	4.2	4.2	3.6	3.6(?)
Angle de site de la st. terr. au sol (degrés)	5	5	5	5
Aff. sur le trajet (y compris atmosph.) (dB)	197.6	197.6	196.3	196.3
G/T de la station terr. au sol (dB(K ⁻¹))	-32.0	-32.0	-30.7	-30.7
P.i.r.e. du satellite (dBW)	-13.0	-12.6	-8.9	-8.9
C/No de la liaison descendante (dBHz)	50.0	50.4	54.1	54.1
Qualité de fonctionnement de la liaison				
C/No obtenu (dBHz)	47.0	48.2	47.8	48.1
Marge (dB)	-0.9	+0.3	-0.1	+0.2

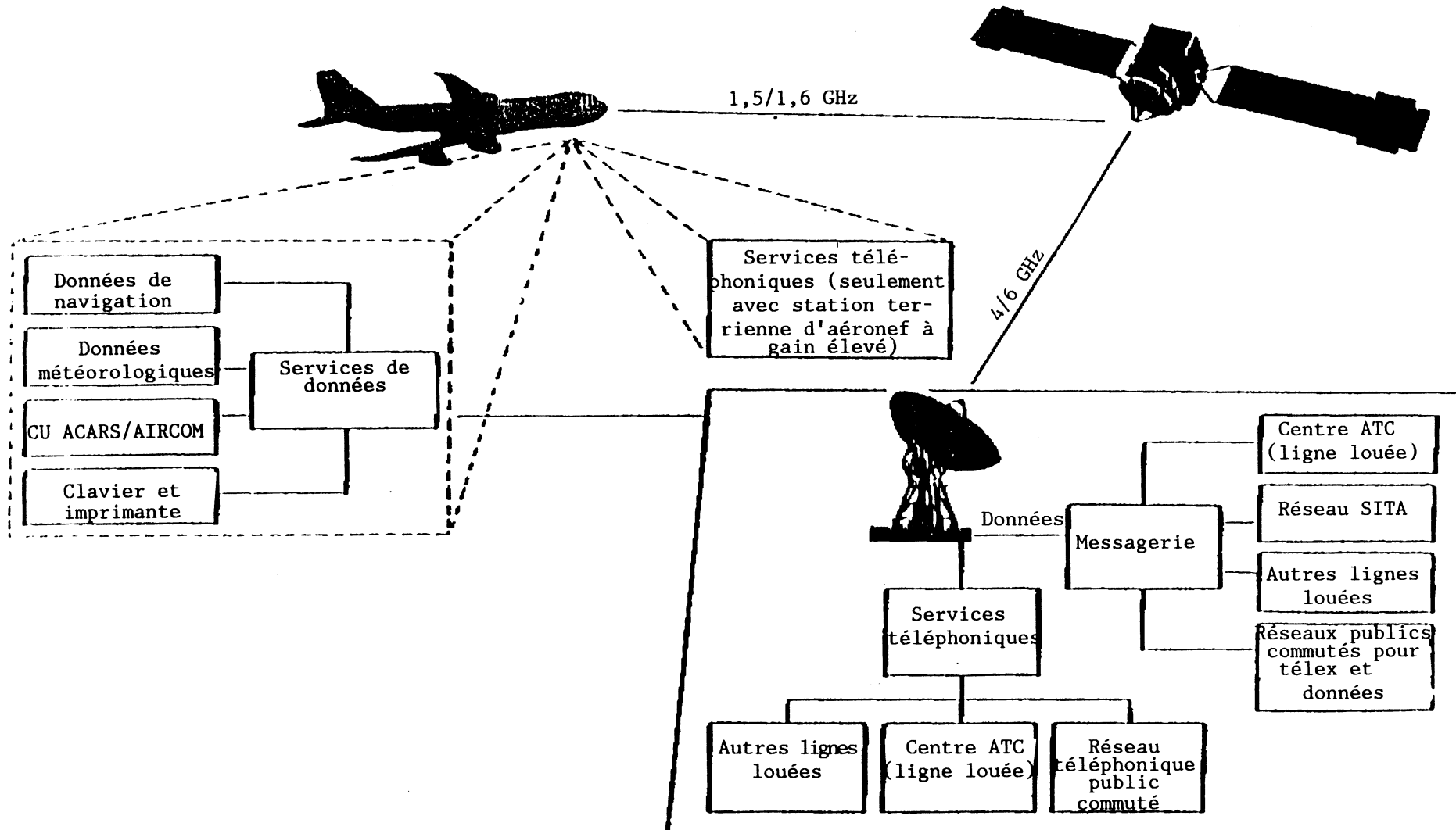


FIGURE 1

Système aéronautique par satellite

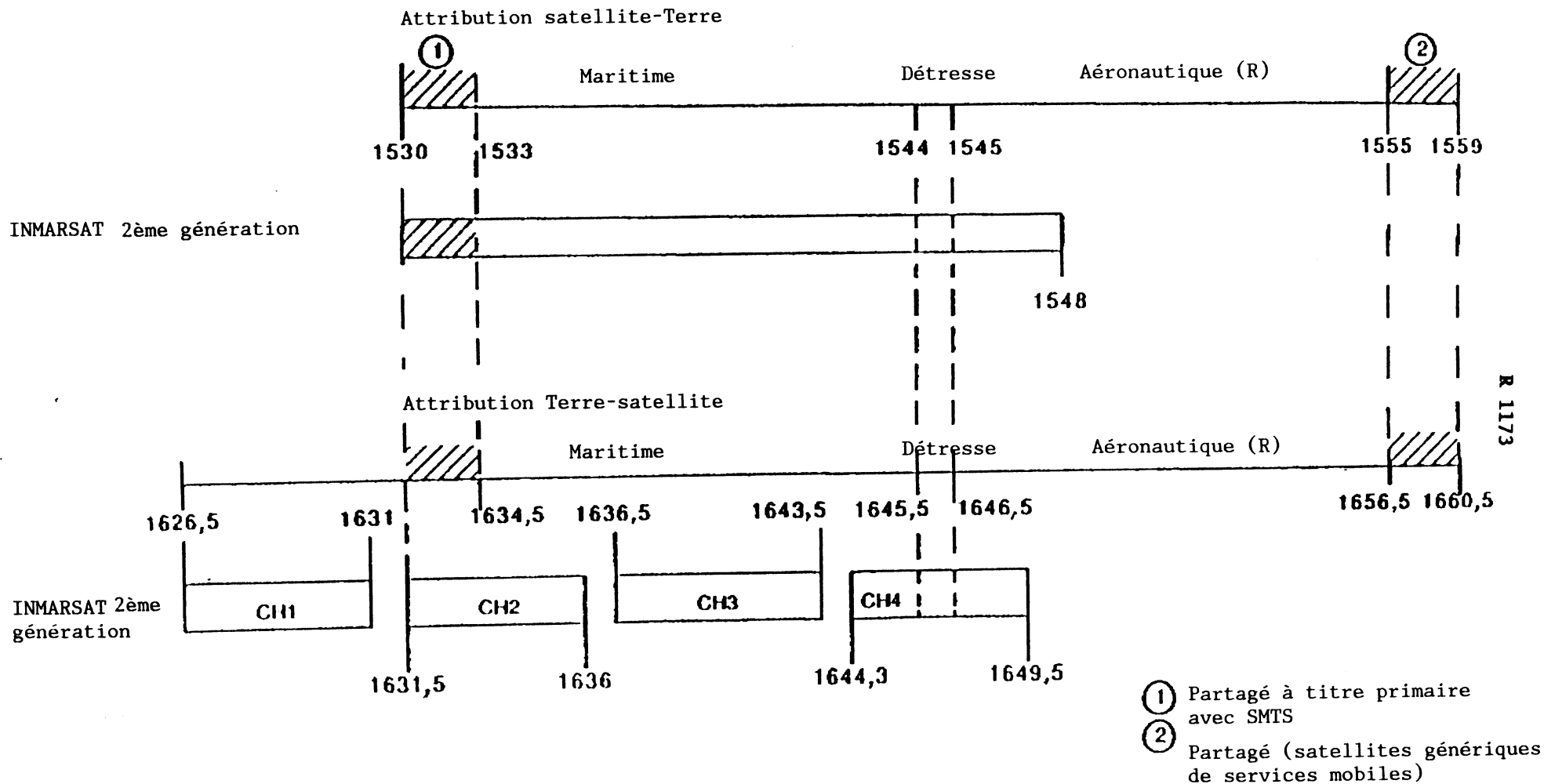


FIGURE 2

Spectre des fréquences aéronautiques (en GHz)



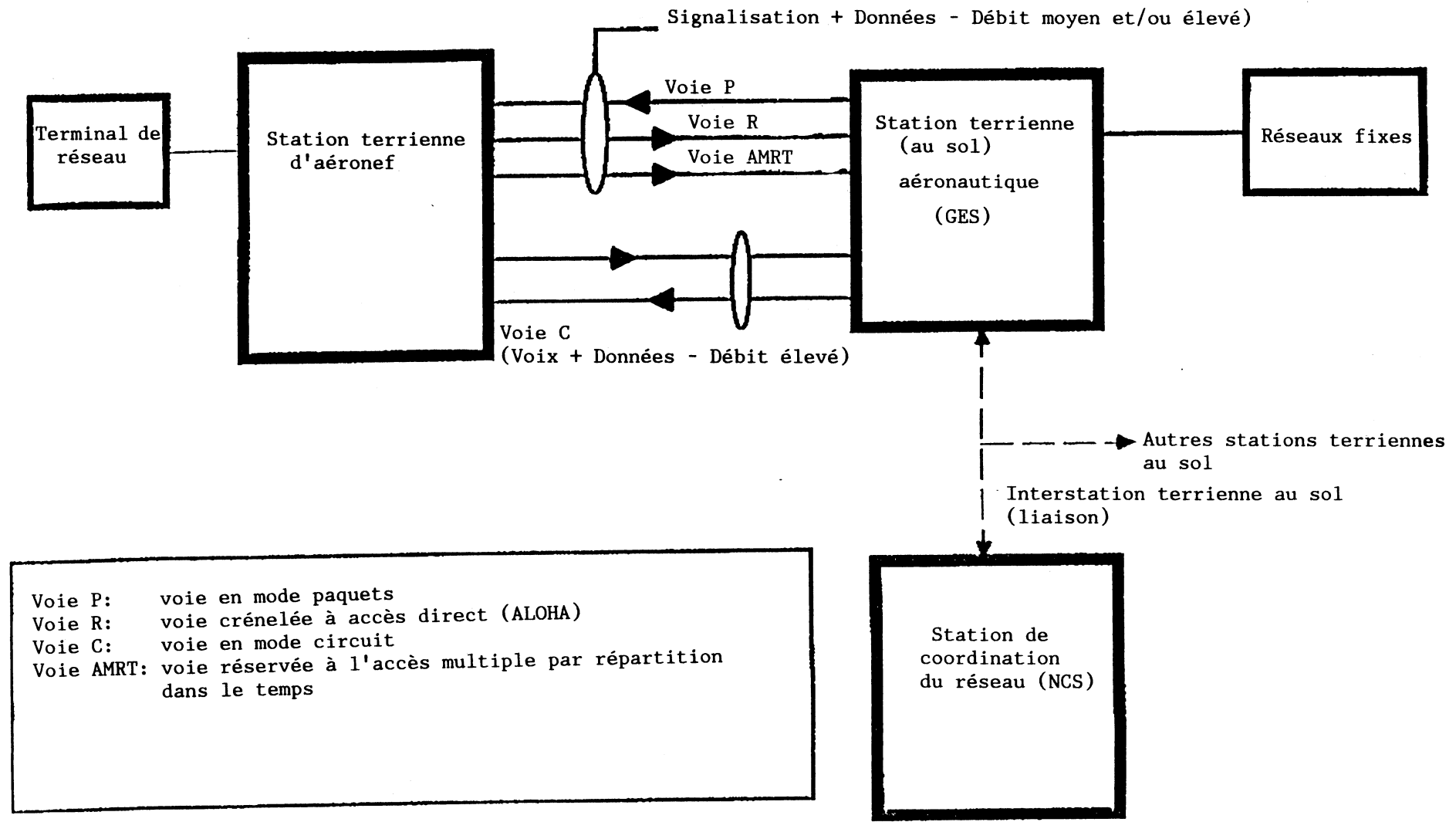
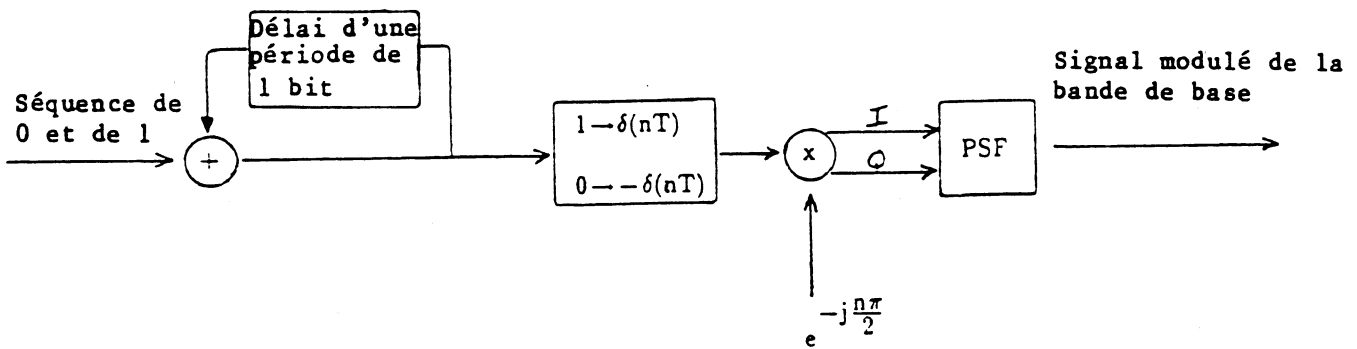
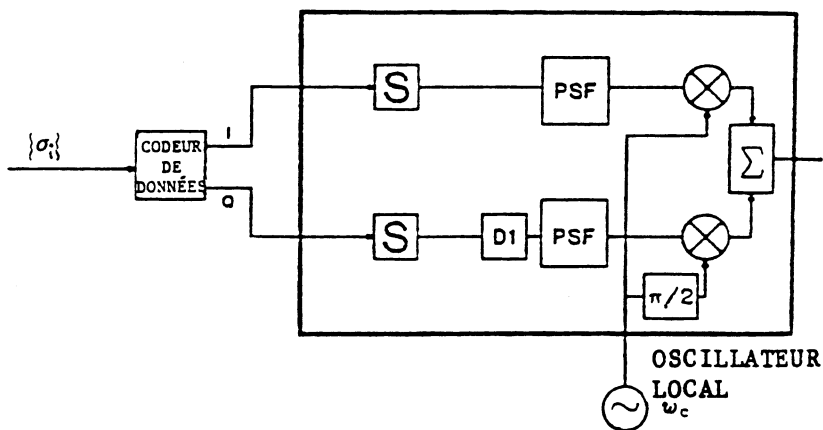


FIGURE 3
Configuration d'un réseau aéronautique
Système étendu



⊕ Addition modulo 2
 PSF filtre de mise en forme d'impulsion
 $\delta(t)$ impulsion idéale

FIGURE 4 .- Modulateur MDP-2-A



$\{\sigma_i\}$ est la séquence de données d'entrée. Débit binaire = $2/T$ pour MDP-4-A

$\{\sigma_i\}$ est divisé en deux trains de bits sur les lignes I et Q, chacun avec un débit binaire de $1/T$

L'échantillonneur S est synchrone des bits de données I et Q et produit des impulsions idéales au débit de $1/T$

Délai $D1 = T/2$ pour MDP-4-A

FIGURE 5 .- Modulateur MDP-4-A

MDP-2-A : LIMITES DES CARACTÉRISTIQUES D'AMPLITUDE DE LA RÉPONSE FRÉQUENCE DU FILTRE DE MISE EN FORME D'IMPULSION

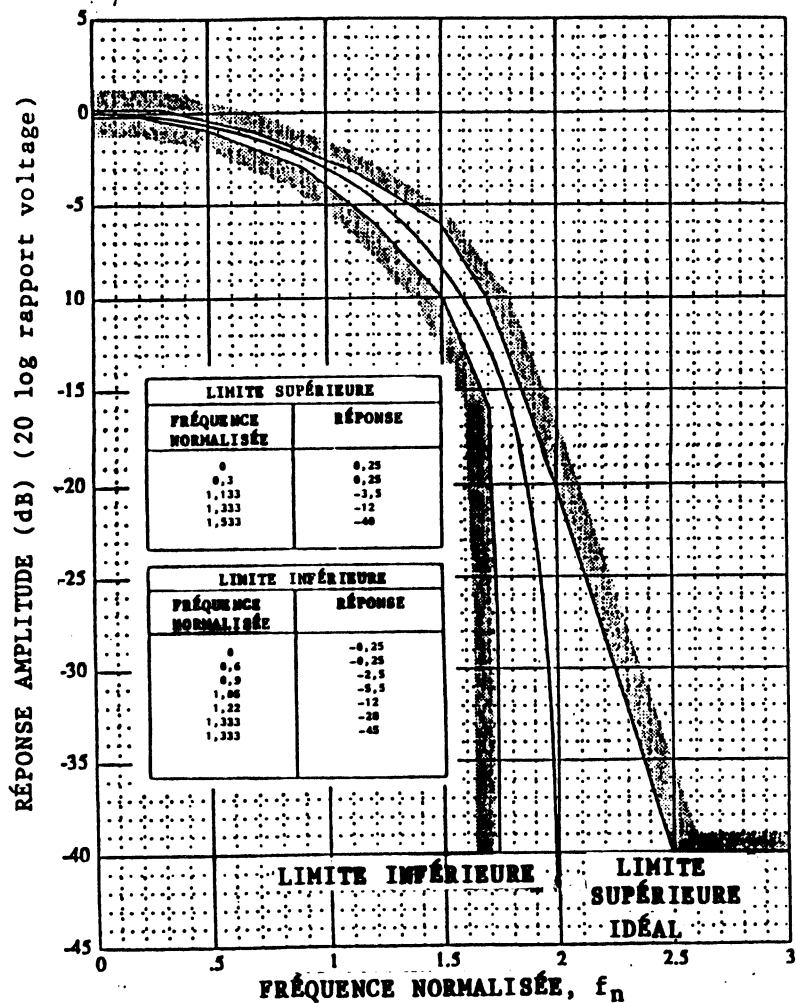


FIGURE 6

MDP-4-A : LIMITES DES CARACTÉRISTIQUES D'AMPLITUDE DE LA RÉPONSE FRÉQUENCE DU FILTRE DE MISE EN FORME D'IMPULSION

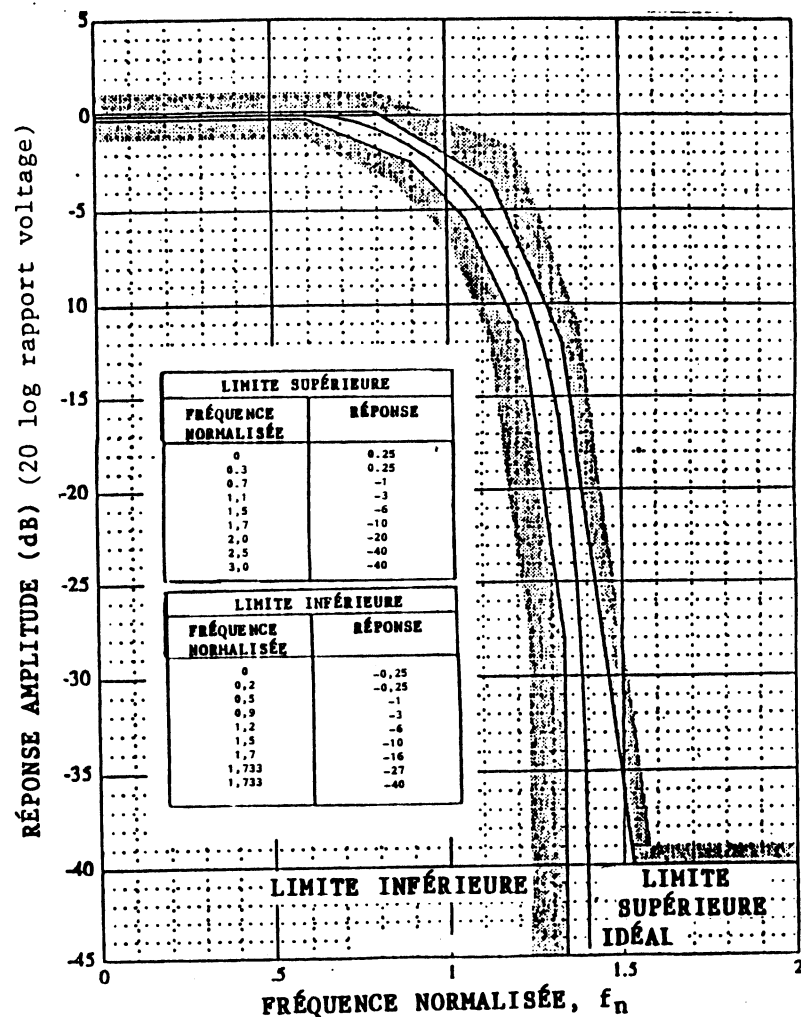


FIGURE 7

MDP-2-A et MDP-4-A : LIMITES D'EXCURSION DE PHASE PROVENANT DE LA LINÉARITÉ DE LA RÉPONSE FRÉQUENCE DU FILTRE DE MISE EN FORME D'IMPULSION

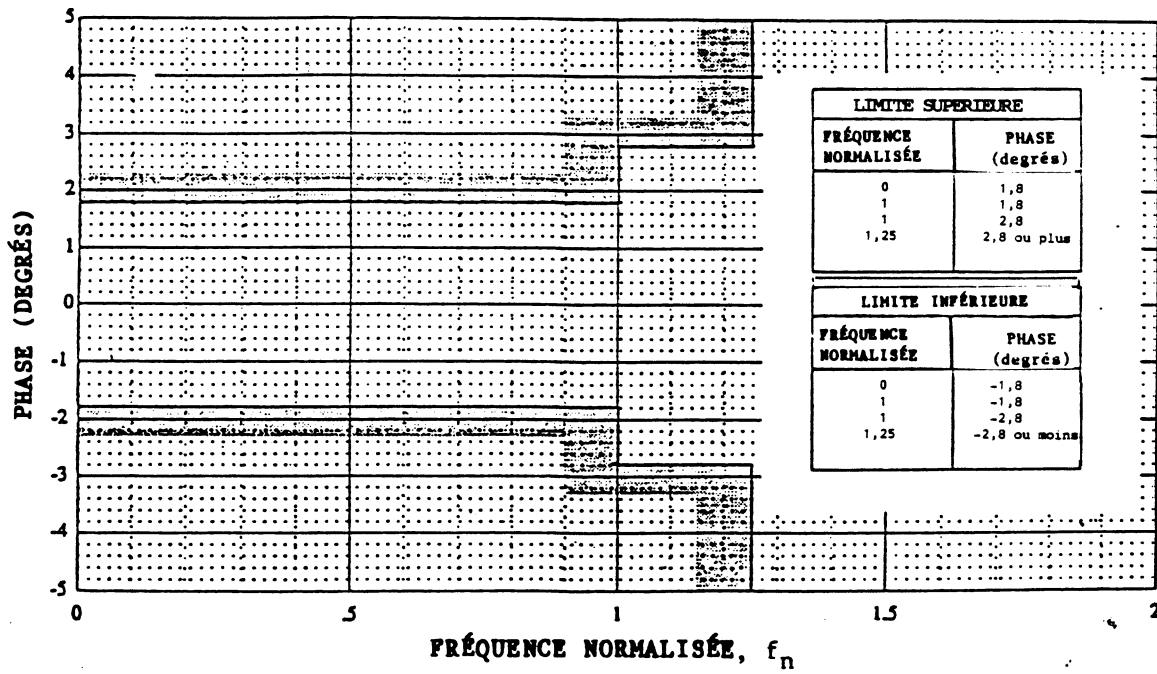


FIGURE 8

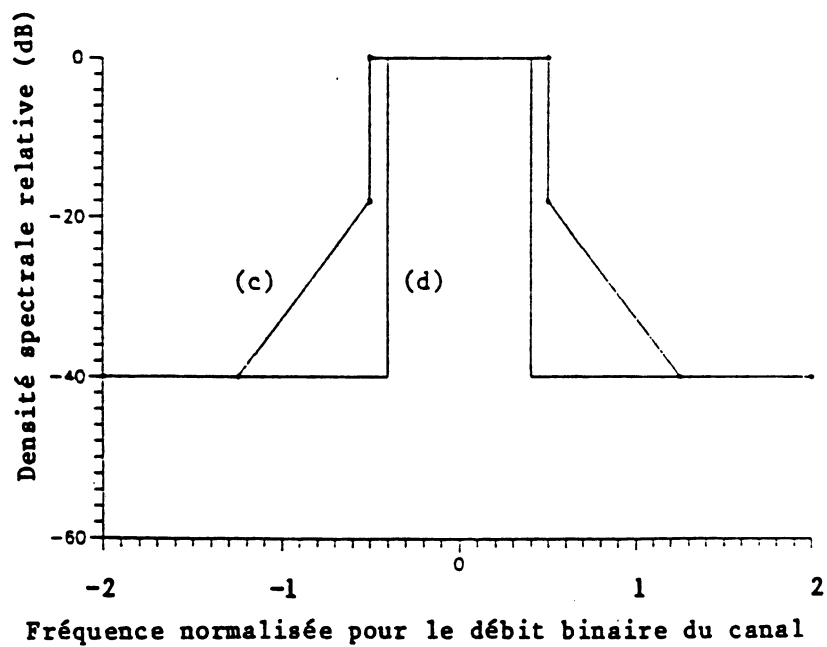
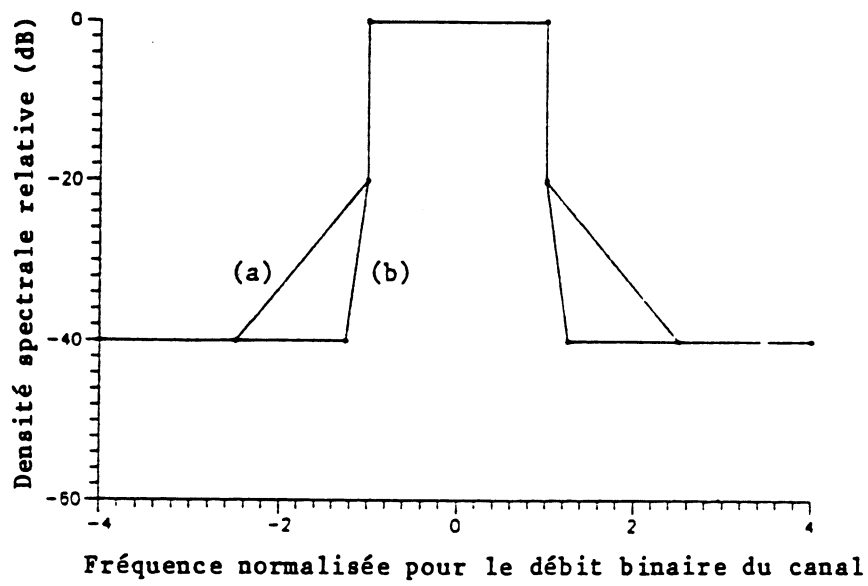


Figure 9 Limites de la densité spectrale de la puissance rayonnée

- a) MDP-2-A en provenance de l'aéronef
- b) MDP-2-A en provenance du sol
- c) MDP-4-A en provenance de l'aéronef
- b) MDP-4-A en provenance du sol