

RAPPORT UIT-R M.760-3

**Bilans de puissance des liaisons d'un système
du service mobile maritime par satellite**

(1978-1982-1990-2004)

1 Introduction

L'objet du présent Rapport est fondamentalement double:

- établir la liste des paramètres dont il faut tenir compte lorsque l'on établit les bilans de puissance des liaisons d'un futur système du service mobile maritime par satellite, ainsi que les conditions dans lesquelles ces paramètres s'appliquent;
- donner des exemples de bilans de puissance de liaisons afin d'illustrer l'application de ces paramètres.

Des bilans de puissance de liaisons sont requis pour déterminer les besoins vraisemblables en puissance et les caractéristiques physiques du secteur spatial (satellite) et du secteur de Terre (stations terriennes côtières et stations terriennes de navire). La conception d'ensemble d'un futur système reposera dans une large mesure sur l'expérience acquise dans la réalisation et l'exploitation des systèmes maritimes à satellites, existants ou en projet; par conséquent, un bon nombre de directives sur le choix de paramètres de bilan de puissance peuvent être obtenues si l'on se réfère aux systèmes INMARSAT et MARISAT [Inmarsat, 1978; MARISAT, 1977].

Les exemples de bilans de liaison qui sont donnés dans le présent Rapport s'appliquent aux systèmes analogiques dont la couverture globale est assurée par un système à satellites utilisant un faisceau modelé. Les exemples de normes utilisées pour ces systèmes mobiles sont tirés des normes qui s'appliquent au système analogique INMARSAT de norme A. On trouvera des exemples de bilans de liaison applicables aux systèmes numériques dans le Rapport UIT-R M.921.

2 Principe d'un bilan de puissance

Le principe adopté dans le présent Rapport consiste à supposer une configuration d'un système «de référence» d'où l'on puisse déduire les paramètres à utiliser pour d'autres configurations. Du point de vue de la propagation, la qualité de voie obtenue avec un système maritime à satellites dépendra fortement de l'angle d'élévation du satellite; il semblerait donc raisonnable d'adopter l'angle d'élévation comme l'un des paramètres sur lesquels fonder le système de référence. La configuration de référence pour les bilans de puissance est supposée ici s'appliquer à des angles d'élévation du satellite de 5° pour les stations terriennes côtières et de 10° pour les stations terriennes de navire; on peut alors en déduire des paramètres correspondants et des qualités de voie en conséquence pour des angles d'élévation autres que ceux-ci.

Un autre critère adopté ici consiste à supposer que les paramètres pour le secteur de Terre sont les mêmes que pour les systèmes existants ou en projet. On suppose en particulier une station terrienne de navire INMARSAT de norme A.

3 Paramètres des voies téléphoniques

La téléphonie sera probablement le service dominant en termes de besoins de puissance du système; les bilans de puissance sont donc fondés sur le cas d'une voie téléphonique.

Afin de donner dans le présent Rapport, à titre de référence, des renseignements sur des exemples de bilans de puissance, nous avons supposé qu'il convient d'obtenir un rapport global de densité de puissance porteuse/bruit, C/N_0 , de 53 dB/Hz pendant au moins 80% du temps dans les deux sens de transmission, l'angle d'élévation du satellite étant de 5° aux stations terriennes côtières et de 10° aux stations terriennes de navire, sans évanouissements dus aux trajets multiples sur les liaisons navire/satellite. Cet objectif a été utilisé comme configuration de référence pour les bilans de puissance, ainsi que le montre la colonne d'extrême droite de chacun des Tableaux 1 et 2. L'objectif de qualité d'une voie téléphonique actuellement préconisé par l'UIT-R pour les voies du service mobile maritime par satellite correspond à un C/N_0 global d'environ 52 à 53 dB/Hz (voir la Recommandation UIT-R M.547).

En plus de la configuration de référence, les Tableaux 1 et 2 contiennent des exemples de bilans de puissance pour des angles d'élévation de 5° et 10° en cas d'évanouissements par trajets multiples sur les liaisons navire/satellite. Les paramètres d'évanouissement sont supposés s'appliquer à des conditions obtenues pendant au moins 99% du temps. Les données expérimentales disponibles ne suffisent cependant pas à établir fiablement, pour un niveau de confiance quelconque, les marges de protection contre les évanouissements à prévoir.

Le fonctionnement à une seule porteuse par voie dans l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) est envisagé pour la téléphonie, avec modulation de fréquence à bande étroite et traitement de la parole (par exemple, compression-extension syllabique 2:1). Avec un rapport C/N_0 de 53 dB/Hz à l'entrée du démodulateur, une largeur de bande de bruit du récepteur qui conviendrait serait de 30 kHz avec un espacement de 50 kHz entre les voies. Le rapport C/N correspondant serait d'environ 8 dB.

Des démodulateurs à extension de seuil seraient nécessaires, avec un seuil nominal d'environ 50 dB/Hz, pour faire en sorte que la qualité de la parole ne se réduise que lentement en fonction de la réduction du niveau du signal.

4 Paramètres du secteur spatial

La configuration du secteur spatial supposée ici est fondée sur une couverture globale aussi bien dans le sens de transmission station côtière-station de navire que dans le sens station de navire-station côtière. Les hypothèses concernant les caractéristiques de l'antenne à 1,5/1,6 GHz et la qualité de fonctionnement des répéteurs du point de vue du bruit d'intermodulation sont résumées ci-après.

4.1 Antenne à 1,5/1,6 GHz

Du point de vue des besoins en puissance du satellite, le trajet de transmission critique est le trajet satellite-station de navire à la fréquence de 1,5 GHz. On peut obtenir une utilisation efficace de la puissance dont dispose le satellite pour la couverture globale de la Terre en supposant que le faisceau de l'antenne est modelé [Wood et Boswell, 1974; Lancrenon et autres, 1976]. Avec une telle antenne, le compromis entre les gains au centre et en bordure du faisceau procure une densité surfacique de puissance presque constante à la surface de la Terre pour tous les angles d'élévation et il rend ainsi optimale la qualité de fonctionnement du système pour celles des stations terriennes de navire qui sont situées en bordure de la zone de couverture, là où les effets de propagation atteignent leur maximum de gravité. Une compensation similaire peut également exister sur le trajet Terre-vers-espace à la fréquence de 1,6 GHz.

4.2 Qualité de fonctionnement du point de vue du bruit d'intermodulation

Le Tableau 1 montre que le rapport porteuse/densité de bruit d'intermodulation, C/I_0 , de l'amplificateur du satellite est le facteur limitatif dans la détermination de la dégradation du rapport C/N_0 sur la liaison station côtière-station de navire, et qu'il faut par conséquent le rendre optimal par rapport au niveau de la puissance de sortie de l'amplificateur. Pour des amplificateurs types et des plans de fréquences appropriés qui aboutissent à une diminution du bruit d'intermodulation dans les voies en service, on peut raisonnablement prévoir, à saturation, une valeur de C/I d'environ 19 dB dans une bande large de 30 kHz avec une charge d'amplificateur de satellite considérable. C'est de là que découle la valeur de 63,8 dB/Hz du rapport C/I_0 , dans le sens station côtière-station de navire.

Dans le sens station de navire-station côtière, on a admis, comme le montre le Tableau 2, un rapport C/I_0 de 70 dB/Hz, étant donné que l'amplificateur de satellite ne sera probablement pas aussi limité en puissance que dans le sens station côtière-station de navire.

5 Paramètres du secteur de Terre

Les caractéristiques à fréquence radioélectrique suivantes pour les stations terriennes de navire et les stations terriennes côtières ont été adoptées comme base des bilans de puissance:

Rapport G/T de la station terrienne de navire:	-4 dB(K ⁻¹) (de norme A)
p.i.r.e. de la station terrienne de navire:	37 dBW
Rapport G/T de la station terrienne côtière:	32 dB(K ⁻¹)
p.i.r.e. de la station terrienne côtière:	60 dBW.

5.1 Station terrienne de navire

La valeur -4 dB(K⁻¹) admise pour G/T est une valeur nette qui comporte des marges pour les pertes de puissance dues à la précision du pointage, aux défauts d'alignement des ellipses de polarisation, au diplexeur et au radôme sec: une marge supplémentaire figure dans les budgets de liaison pour tenir compte des pertes dues à l'humidité du radôme. Cette sensibilité peut être obtenue avec une antenne dont le gain est 23 dBi et un amplificateur de réception à transistors tel que la température totale de bruit du système est 500 K. Une antenne appropriée serait un paraboloïde de 1,2 m de diamètre, avec un rendement d'éclairage de 60% et un faisceau d'émission d'environ 10° d'ouverture entre points à -3 dB; une ellipticité d'environ 2 dB a été admise. Aux fins du calcul du budget de la liaison, on a considéré séparément les affaiblissements dus au pointage et les affaiblissements dus à la polarisation.

Aucune marge n'a été introduite dans les bilans de puissance pour tenir compte des effets de blocage dus aux superstructures du navire; ces effets dépendent du navire en question et ils pourraient théoriquement être éliminés par le choix d'un emplacement dépourvu d'obstacles environnants.

5.2 Station terrienne côtière

Pour un rapport G/T par temps clair de 32 dB(K⁻¹) à un angle d'élévation de 5°, on a supposé une température totale de bruit du système de 100 K pour calculer la dégradation de la température de bruit en présence d'évanouissements. Les paramètres d'évanouissements pour des liaisons à 4/6 GHz sont supposés être applicables aux conditions de propagation obtenues pour 99,99%% du temps; la qualité de voie des liaisons globales entre stations terriennes côtières et stations terriennes de navire est donc essentiellement déterminée par les paramètres d'affaiblissement sur les liaisons navire, satellite à 1,5/1,6 GHz.

Une antenne de station terrienne côtière appropriée serait une antenne de 13 m de diamètre dans l'hypothèse d'un rendement d'éclairage de 60%. Une ellipticité de 0,5 dB a été admise. Aux fins du calcul du budget de la liaison, on a considéré séparément les affaiblissements dus à la polarisation et les affaiblissements dus au pointage.

On a admis que le bruit d'intermodulation sur le trajet montant, causé par tous les amplificateurs d'émission des stations terriennes côtières, donne sur le trajet montant un rapport C/I total de plus de 30 dB dans une largeur de bande de 30 kHz. Cette hypothèse est conforme aux actuelles spécifications techniques des stations terriennes côtières d'Inmarsat et à la performance attendue des plans de fréquences types qui pourraient être utilisés. C'est de là que découle la valeur de 75 dB/Hz du rapport C/I_0 indiqué au Tableau 1.

6 Calcul des marges applicables aux liaisons

Les marges nécessaires pour atteindre les objectifs de qualité désirés pour les liaisons par satellite dépendent de bien des facteurs, y compris les caractéristiques du satellite, les caractéristiques de la station terrienne de navire et de la station terrienne côtière, les conditions météorologiques, l'état de la mer et les emplacements géographiques du terminal de navire. Il convient que la conception globale du système comporte des marges de liaison compatibles avec les facteurs suivants:

- angle d'élévation minimal pris en considération pour le service;
- dégradation tolérable de la qualité de fonctionnement pour des angles d'élévation plus petits que le point minimal prévu dans la conception.

Le choix des marges de liaison en fonction de l'angle d'élévation, α , et la conception du système influenceront la qualité de fonctionnement du système tout entier (tel qu'il est vu du réseau terrestre). Un système conçu pour obtenir une qualité de fonctionnement déterminée pendant un certain pourcentage de temps avec des marges prévues pour les dégradations se produisant aux faibles angles d'élévation donnera cette qualité pendant des pourcentages de temps beaucoup plus élevés lorsqu'il s'agit d'appels à tous les navires situés à l'intérieur de la zone de couverture.

Les marges requises pour compenser des affaiblissements autres que l'affaiblissement en espace libre sur le trajet peuvent être groupées en catégories d'affaiblissements de longue durée (fixes et aléatoires) et de courte durée.

6.1 Affaiblissements de longue durée

On peut définir les affaiblissements de longue durée comme étant ceux qui tendraient à durer pendant une période d'au moins une minute par occurrence.

6.1.1 Affaiblissements fixes de longue durée

Il convient, pour tous les calculs, d'inclure dans l'affaiblissement sur le trajet les affaiblissements qui se produiront certainement. La marge composite (dB) pour ces affaiblissements est constituée par leur somme, par exemple:

$$L_f = \sum_j L_{f,j} \quad (1)$$

6.1.2 Affaiblissements aléatoires de longue durée

Plusieurs des affaiblissements de longue durée ont tendance à se produire au hasard et sont généralement indépendants les uns des autres. On peut obtenir les valeurs cumulatives de

l'affaiblissement moyen (\bar{L}_l) et la variance (σ_l^2) en faisant la somme des moyennes et des variances individuelles:

$$\bar{L} = \sum_j \bar{L}_{l,j} \quad (2)$$

$$\sigma_l^2 = \sum_j \sigma_{l,j}^2 \quad (3)$$

6.2 Affaiblissements de courte durée

On peut définir les affaiblissements de courte durée comme étant ceux qui tendraient à durer pendant une période de moins d'une minute par occurrence. Puisqu'il se peut que l'occurrence d'une période de profond évanouissement de courte durée soit peu fréquente et incertaine, ou bien qu'elle se produise uniquement à certains moments de la journée, il convient de prendre en considération les statistiques d'évanouissement lorsqu'on établit les marges d'évanouissement.

Les affaiblissements de courte durée ont tendance à être indépendants les uns des autres et à avoir des distributions statistiques différentes. Les marges cumulatives nécessaires pour ces affaiblissements peuvent dépendre très fortement de l'angle d'élévation α , puisque les affaiblissements indépendants de l'angle d'élévation sont relativement faibles ou peu fréquents.

La moyenne cumulative de l'affaiblissement (\bar{L}_s) et la variance (σ_s^2) pour les affaiblissements cumulatifs de courte durée peuvent être obtenues en faisant la somme des moyennes individuelles des affaiblissements et des variances:

$$\bar{L}_s = \sum_j \bar{L}_{s,j} \quad (4)$$

$$\sigma_s^2 = \sum_j \sigma_{s,j}^2 \quad (5)$$

6.3 Marges cumulatives pour tous les affaiblissements

Puisque les affaiblissements de longue durée et de courte durée sont raisonnablement nombreux et indépendants, les besoins en marges totales peuvent être calculés par approximation au moyen d'une distribution normale des marges dont la moyenne est donnée (dB) par:

$$L \simeq L_f + \bar{L}_l + \bar{L}_s \quad (6)$$

et l'écart type (dB) est donné par:

$$\sigma \simeq \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_s^2} \quad (7)$$

La marge cumulative appropriée (dB) correspondant à des pourcentages de temps de 80%, 99% et 99,99% serait alors donnée par:

$$\begin{aligned} M(80\%) &= L + 0,85\sigma \\ M(99\%) &= L + 2,33\sigma \\ M(99,99\%) &= L + 3,72\sigma \end{aligned} \quad (8)$$

7 Marges aux fréquences 1,5/1,6 GHz pour les liaisons navire/satellite

7.1 Affaiblissements de longue durée

Les affaiblissements de longue durée pour lesquels il se peut que des marges soient nécessaires sont les suivants:

- $L_a(\alpha)$: absorption atmosphérique (dB): elle est fonction de l'angle d'élévation navire-vers-satellite α ;
- $L_e(\alpha)$: supplément d'affaiblissement (dB), dépassé pendant pas plus de 20% ou 1% du temps: il est considéré comme négligeable pour les fréquences 1,5/1,6 GHz;
- L_r : affaiblissement de radôme (si un radôme est utilisé) (dB); il se peut que l'affaiblissement dû à un radôme sec (0,2 dB) soit déjà décompté dans la définition du gain de l'antenne et de la sensibilité du récepteur, G/T ; tel est le cas ici;
- L_p : affaiblissement de couplage de polarisation (dB); il est fonction des ellipticités de l'antenne du navire et de celle du satellite (2 dB et 3 dB respectivement); le cas le plus défavorable est celui où les ellipses de polarisation sont mal alignées;
- L_b : affaiblissement de blocage de la structure du navire (dB): il est fonction de l'emplacement de l'antenne, de la taille et de la forme de l'obstacle, de sa direction et de l'ouverture du faisceau de l'antenne du navire.

Des dégradations supplémentaires dues à un accroissement de la température de bruit du système sont dues à divers affaiblissements et sont les suivantes:

- DT_r : rapport (dB) entre la température de bruit du système lorsqu'il comporte un radôme et la température de bruit du système sans le radôme; il se peut qu'il en soit déjà tenu compte dans la valeur du rapport G/T , ainsi qu'on l'a admis ici, mais une marge est requise pour la dégradation due, dans le domaine de la température de bruit, à l'humidité d'un radôme;
- ΔT_a : accroissement de température dû à l'absorption atmosphérique; il est considéré comme négligeable par une température de bruit du système de 500 K.

7.1.1 Affaiblissements fixes de longue durée

La marge composite (dB) pour ces affaiblissements est donnée par la formule:

$$L_f(\alpha) = L_a(\alpha) + L_r(\text{sec}) \quad (9)$$

7.1.2 Affaiblissements aléatoires de longue durée

Les statistiques cumulatives pour les affaiblissements aléatoires de longue durée comprendraient, par exemple, L_p , et L_r (humide); des moyennes et des écarts types pour ces facteurs pourraient être les suivants:

Facteur d'affaiblissement	Affaiblissement moyen (dB)	Ecart type (dB)
L_p	0,2	0,09
L_r (humide)	0,2	0,13
DT_r (humide)	0,1	0,09 (température de bruit de référence = 500 K)

Il se peut que l'inclusion d'un affaiblissement de blocage, L_b , dans les calculs de marge ne soit pas cohérente avec la pratique des installations de station terrienne de navire et avec les objectifs d'exploitation. Il se peut que la pratique normale consiste à installer l'antenne de la station terrienne de navire avec une vision sans obstacle pour des angles d'élévation au-dessus du point conçu dans le système et non pas de prévoir une grande marge de système pour le blocage, ainsi qu'on l'a admis ici.

7.2 Affaiblissements de courte durée

Les affaiblissements de courte durée pour lesquels il se peut que des marges soient nécessaires sont les suivants:

- L_t : fluctuations du niveau de la puissance de l'émetteur de la station terrienne de navire, supposées ici être $\pm 0,5$ dB pour environ 95% du temps correspondant à un affaiblissement moyen de 0 dB et un écart type de 0,25 dB;
- ΔG : affaiblissement dû au pointage de l'antenne de la station terrienne de navire (dB); il est fonction de la qualité de fonctionnement du système de pointage de l'antenne du navire, qualité qui tend à être plus mauvaise dans les états de haute mer; certaines conceptions peuvent entraîner de fortes erreurs de poursuite pour certaines orientations de l'antenne, par exemple dans la direction du zénith;
- L_i : affaiblissement dû à la scintillation ionosphérique (dB); il est fonction de l'emplacement du navire, de la saison et de l'heure;
- $L_m(\alpha)$: affaiblissement d'évanouissement par trajets multiples (dB), dû aux réflexions sur la mer et la structure du navire: l'amplitude de l'affaiblissement pour un pourcentage de temps donné et la cadence à laquelle cet affaiblissement varie dépendront de l'état de la mer, de l'angle d'élévation, α , de la polarisation de la liaison, du diagramme de rayonnement de l'antenne du navire, de l'ellipticité de l'antenne du navire dans la direction de la zone de réflexion, de la hauteur de l'antenne au-dessus de la mer et de la précision du système de pointage de l'antenne.

7.2.1 Affaiblissement dû au pointage de l'antenne

Il se peut que l'affaiblissement dû au pointage de l'antenne (ΔG) soit faible, en particulier si les antennes de navire sont équipées du pointage automatique. Les erreurs de pointage type peuvent être normalement distribuées avec un écart normal d'au plus 0,1 fois l'angle d'ouverture du faisceau dans les conditions les plus défavorables, et la distribution serait en «carré de chi». Dans un souci de simplicité, on a admis un chiffre d'affaiblissement à 99% de 0,5 dB avec un affaiblissement moyen de 0,3 dB et un écart nominal 0,09 dB.

7.2.2 Affaiblissement dû à la scintillation ionosphérique

Les affaiblissements dus à l'évanouissement, qui se produisent dans la bande 9 en raison de la scintillation ionosphérique, ont tendance à n'être notables qu'aux époques d'équinoxes de printemps et d'automne, et surtout près de l'équateur magnétique et sous des latitudes géomagnétiques élevées [Canada, 1973; Golden et Sessions, 1972]. De plus, l'évanouissement au voisinage de l'équateur magnétique a tendance à être plus profond que sous les latitudes élevées, et ces évanouissements durent entre une heure et trois heures environ et surviennent peu de temps après le coucher local du soleil. Des mesures indiquent que les affaiblissements maximaux dus à l'évanouissement au-dessous du niveau de propagation en espace libre sont normalement de 3 à 5 dB pour les jours d'évanouissements les plus défavorables et que les évanouissements les plus profonds durent habituellement moins de 15 s. Pendant les périodes d'évanouissement, il faut s'attendre à ce qu'un affaiblissement d'environ 1,1 dB soit dépassé pendant au plus 1% du temps, et un affaiblissement

de 1,8 dB pendant au plus 0,1% du temps [Golden et Sessions, 1972]. Une estimation prudente de l'écart type correspondant donnerait 0,6 dB.

L'inclusion de statistiques de l'affaiblissement dû à la scintillation ionosphérique donnerait les statistiques du cas le plus défavorable qui seraient applicables pendant une courte durée pendant quelques jours de l'année et en des emplacements géographiques limités. Il se peut que pour certains systèmes ce soit l'affaiblissement de courte durée qui soit prépondérant et il convient par conséquent de le prendre en considération dans le choix des marges de «l'heure la plus défavorable», mais il ne sera pas inclus ici parce qu'il ne satisfait pas aux objectifs du présent Rapport.

7.2.3 Affaiblissement dû à l'évanouissement par trajets multiples

Les statistiques de l'affaiblissement dû à l'évanouissement par trajets multiples dépendent beaucoup de l'angle d'élévation et pourraient être le facteur dominant dans les besoins en marge de liaison. Un nombre considérable d'études et d'expériences ont été faites pour évaluer les effets de l'évanouissement par trajets multiples [CERS, 1974; OMCI, 1973; ASE, 1976].

Avec les conditions normales de la mer qui prévalent dans la plupart des zones océaniques, les réflexions par trajets multiples sur la surface de la mer seront à prédominance diffuse et le signal composite indirect aura des statistiques gaussiennes à bande étroite. Contrairement au bruit du récepteur de la station terrienne de navire, le rapport porteuse reçue/brouillage par trajets multiples, (C/I_{mp}), ne sera pas diminué si l'on accroît la puissance de l'émetteur du satellite. Par conséquent, les marges prévues pour tenir compte du brouillage diffus par trajets multiples servent non pas à accroître le rapport C/I_{mp} , mais seulement à donner un rapport C/N thermique du récepteur qui convienne et qui soit tel que la qualité de fonctionnement du récepteur de la station terrienne de navire soit encore acceptable lorsque l'évanouissement par trajets multiples se produit.

Une fois la valeur escomptée de C/I_{mp} établie pour l'angle d'élévation minimal prévu, on peut déterminer les profondeurs de l'évanouissement qui ne sont pas dépassées pendant plus de $p\%$ du temps. Par exemple, une extrapolation des mesures faites au cours des essais montre qu'une antenne directive avec un gain nominal de 24 dBi au centre du faisceau (ouverture du faisceau: 10°) dans une liaison à polarisation circulaire pour un angle d'élévation de 5° bénéficierait normalement d'un rapport C/I_{mp} d'environ 16 dB. On s'attendrait à ce que la profondeur de l'évanouissement soit inférieure à 2,5 dB pour 99% au moins du temps [CERS, 1974; Norton et autres, 1965]. Les hypothèses suivantes ont été faites au cours de la déduction de ce résultat:

- a) l'angle de discrimination sous lequel on voit la zone de réflexion est environ 10° ;
- b) en compensant le roulis et le tangage du navire, le système de pointage de l'antenne utilise une référence indépendante du signal reçu;
- c) le facteur de rendement de polarisation de l'antenne par rapport à l'énergie provenant des trajets multiples est l'unité (c'est-à-dire une réponse à polarisations croisées).

Il convient de traiter des extrapolations de cette nature avec certaines précautions, bien qu'elles soient utiles lorsqu'on calcule un ordre de grandeur des profondeurs types des évanouissements; en particulier, l'hypothèse c) ne s'appliquerait pratiquement pas puisque la réponse de l'antenne aux polarisations croisées est vraisemblablement plus défavorable loin de l'axe qu'au centre. De plus, la profondeur d'évanouissement correspondante adoptée dans les systèmes existants et en projet est de 4 dB pour l'angle d'élévation 5° et de 1,8 dB pour l'angle d'élévation 10° . Ces valeurs s'accordent raisonnablement avec les résultats expérimentaux donnés dans le Rapport UIT-R M.763.

D'après les analyses et certaines expériences, les marges requises pour les évanouissements à faible pourcentage ($p < 99\%$) avec des évanouissements diffus par trajets multiples seront plus étendues que l'évanouissement spéculaire maximal pour les mêmes conditions.

Les statistiques d'affaiblissement pour l'évanouissement diffus par trajets multiples sont approximativement gaussiennes pour les hauts rapports puissance directe/puissance indirecte ($C/I_{mp} > 10$ dB). L'approximation prudente adoptée ici consiste à utiliser une moyenne nulle ($L_m = 0$ dB) et une estimation de l'écart normal qui est fondée sur les valeurs de l'affaiblissement à 99% données ci-dessus.

7.3 Marges cumulatives

On peut constater que l'inclusion de marges pour l'affaiblissement dû au blocage et à la scintillation ionosphérique peut être fort importante; la méthode suivie ici consiste à n'admettre aucun affaiblissement normal dû au blocage et à la scintillation lorsqu'on établit de larges marges pour le système. Mais il convient d'inclure ces affaiblissements dans une marge du «cas le plus défavorable» qui peut être utilisé en même temps qu'un objectif de qualité «marginale acceptable» plus bas que le critère normal de qualité pour la téléphonie.

8 Marges pour les liaisons de connexion

8.1 Affaiblissements fixes de longue durée

Le seul affaiblissement fixe de longue durée qui figure dans le bilan de puissance est l'absorption atmosphérique $L_a(\alpha)$.

8.2 Affaiblissements aléatoires de longue durée

Les affaiblissements aléatoires de longue durée comprennent:

- L_p : affaiblissement de couplage de polarisation: affaiblissement moyen = 0,05 dB, écart type = 0,02 dB pour des ellipticités d'antenne de la station côtière et du satellite de 0,5 dB/3 dB respectivement;
- L_i : fluctuations de la puissance de l'émetteur pour l'utilisation de la fréquence 6 GHz: affaiblissement moyen = 0 dB, écart type = 0,12 dB;
- $L_e(\alpha)$: supplément d'affaiblissement dépassé pendant pas plus de 0,01% du temps: affaiblissement moyen = 0 dB; l'écart type est égal à 0,27 dB pour une exploitation à 6 GHz et à 0,14 dB pour une exploitation à 4 GHz.

8.3 Affaiblissements aléatoires de courte durée

L'affaiblissement dû au pointage de l'antenne de la station terrienne côtière est supposé ici être égal à 0,2 dB avec un affaiblissement moyen de 0 dB et un écart normal de 0,05 dB. Aucune marge n'a été prévue pour la scintillation ionosphérique dans les chiffres concernant l'affaiblissement à 99,99%.

- $DT_s(\alpha)$: dégradation due à un bruit atmosphérique excessif (dB); affaiblissement moyen = 0 dB; écart type = 0,32 dB.

9 Bilans de puissance des liaisons

Les marges aléatoires cumulatives qui figurent dans les Tableaux 1 et 2 ont été calculées d'après les valeurs de l'affaiblissement admises pour chaque paramètre et ont été calculées indépendamment pour chacune des parties de l'ensemble de la liaison. Les bilans de puissance peuvent être utilisés pour déterminer les besoins vraisemblables en puissance du système. Les bilans de puissance sont fondés sur une caractéristique admise de 53 dB/Hz pour le rapport C/N_0 pour le bilan de référence téléphonique; cela suppose un angle d'élévation de 5° pour les stations terriennes côtières, de 10°

pour les stations terriennes de navire et une absence d'évanouissements par trajets multiples sur les liaisons navire/satellite. Lorsque de tels évanouissements se produisent sur les liaisons précitées, les valeurs de C/N_0 sont également indiquées pour des angles d'élévation de 5° et de 10° . On admet que la contribution du bruit de phase total provenant des oscillateurs locaux de transfert est négligeable: elle n'est donc pas incluse dans les bilans de puissance des liaisons.

TABLEAU 1

Bilan de puissance de la liaison station côtière-station de navire

	Unités	Angle d'élévation du satellite		
		5°		
1 Station côtière-satellite (6,42 GHz, 99,99% du temps)				
p.i.r.e de la station terrienne côtière, par voie (valeur nominale)	dBw	60		
Affaiblissement dû aux fluctuations de la puissance de l'émetteur ⁽¹⁾	dB	0,5		
Affaiblissement dû aux erreurs de pointage ⁽¹⁾	dB	[0,2]		
Affaiblissement en espace libre sur le trajet	dB	200,9		
Affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique	dB	0,5		
Supplément d'affaiblissement dû aux précipitations ⁽¹⁾	dB	[1,0]		
Affaiblissement dû au couplage de polarisation ⁽¹⁾	dB	[0,1]		
Marge totale pour les affaiblissements aléatoires	dB	1,2		
Rapport G/T du satellite	dB(K ⁻¹)	-16		
Constante de Boltzmann	dB(J/K)	-228,6		
Rapport C/N_0 Terre vers espace (bruit thermique)	dB/Hz	70		
Rapport C/I_0 de la station terrienne côtière (bruit d'intermodulation)	dB/Hz	75		
Rapport C/I_0 du répéteur du satellite (bruit d'intermodulation)	dB/Hz	63,8		
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ émis	dB/Hz	62,6		
		99% du temps		80% du temps
		5°	10°	10°
2 Satellite-station de navire (1,54 GHz)				
p.i.r.e. du satellite, par voie (puissance utile)	dBw	18,0	18,1	18,1
Affaiblissement en espace libre sur le trajet	dB	188,5	188,4	188,4
Affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique	dB	0,4	0,2	0,2
Affaiblissement dû aux évanouissements par trajets multiples ⁽¹⁾	dB	[4,0]	[1,8]	[0]
Affaiblissement supplémentaire dû à l'humidité du radôme ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,4]
Dégradation de la température de bruit ⁽¹⁾	dB	[0,3]	[0,3]	[0,2]
Affaiblissement dû au couplage de polarisation ⁽¹⁾	dB	[0,4]	[0,4]	[0,3]
Affaiblissement dû aux erreurs de poursuite ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,4]
Marge totale pour les affaiblissements aléatoires	dB	4,8	2,7	1,1
Rapport G/T de la station terrienne de navire	dB(K ⁻¹)	-3,5	-3,5	-3,5
Constante de Boltzmann	dB(J/K)	-228,6	-228,6	-228,6
Rapport C/N_0 espace vers Terre	dB/Hz	49,4	51,9	53,5
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ émis	dB/Hz	62,6	62,6	62,6
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ résultant	dB/Hz	49,2	51,5	53,0

⁽¹⁾ Affaiblissement aléatoire: les chiffres inscrits entre crochets [] ne sont pas inclus directement dans le bilan, mais ils sont combinés comme l'indique le § 6.3.

TABLEAU 2

Bilan de puissance de la liaison station de navire-station côtière

	Unités	Angle d'élévation du satellite		
		99% du temps		80% du temps
		5°	10°	10°
1 Station de navire-satellite (1,64 GHz)				
p.i.r.e. de la station terrienne de navire (valeur nominale)	dBW	37	37	37
Affaiblissement dû aux fluctuations de la puissance de l'émetteur ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,5]
Affaiblissement dû aux erreurs de pointage ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,4]
Affaiblissement supplémentaire dû à l'humidité du radôme ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,4]
Affaiblissement en espace libre sur le trajet	dB	189,0	188,9	188,9
Affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique	dB	0,4	0,2	0,2
Affaiblissement dû aux évanouissements par trajets multiples ⁽¹⁾	dB	[4,0]	[1,8]	[0]
Affaiblissement dû au couplage de polarisation ⁽¹⁾	dB	[0,4]	[0,4]	[0,3]
Marge totale pour les affaiblissements aléatoires	dB	4,8	2,6	1,0
Rapport G/T du satellite	dB(K ⁻¹)	-12,2	-12,1	-12,1
Constante de Boltzmann	dB(J/K)	-228,6	-228,6	-228,6
Rapport C/N_0 Terre vers espace (bruit thermique)	dB/Hz	59,2	61,8	63,4
Rapport C/I_0 du répéteur du satellite (bruit d'intermodulation)	dB/Hz	65,8	68,4	70
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ émis	dB/Hz	58,3	60,9	62,5
		5°		5°
2 Satellite-station côtière (4,20 GHz, 99,99% du temps)				
p.i.r.e. du satellite, par voie (puissance utile)	dBW	-12,3	-9,7	-8,1
Affaiblissement en espace libre sur le trajet	dB	197,1	197,1	197,1
Affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique	dB	0,5	0,5	0,5
Supplément d'affaiblissement dû aux précipitations ⁽¹⁾	dB	[0,5]	[0,5]	[0,5]
Dégradation due à un supplément de bruit céleste ⁽¹⁾	dB	[1,2]	[1,2]	[1,2]
Affaiblissement dû au couplage de polarisation ⁽¹⁾	dB	[0,1]	[0,1]	[0,1]
Affaiblissement dû aux erreurs de poursuite ⁽¹⁾	dB	[0,2]	[0,2]	[0,2]
Marge totale pour les affaiblissements aléatoires	dB	1,4	1,4	1,4
Rapport G/T de la station côtière (ciel clair)	dB(K ⁻¹)	32	32	32
Constante de Boltzmann	dB(J/K)	-228,6	-228,6	-228,6
Rapport C/N_0 espace vers Terre	dB/Hz	49,3	51,9	53,5
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ émis	dB/Hz	58,3	60,9	62,5
Rapport $C/(N_0 + I_0)$ résultant	dB/Hz	48,8	51,4	53,0

⁽¹⁾ Affaiblissement aléatoire: les chiffres inscrits entre crochets [] ne sont pas inclus directement dans le bilan, mais ils sont combinés comme l'indique le § 6.3.

10 Autres facteurs affectant le bilan de puissance des liaisons

10.1 Charge relative des répéteurs

Puisque la capacité du satellite est conçue en fonction des besoins et d'une certaine qualité d'écoulement du trafic, le nombre des porteuses en service pendant l'heure la plus chargée sera, en moyenne, nettement inférieur à celui des porteuses à pleine charge. En raison du fonctionnement non linéaire de la plupart des amplificateurs de satellite lorsqu'on approche du niveau de saturation, l'augmentation de la p.i.r.e. par porteuse est presque directement proportionnelle à la diminution du nombre des porteuses par rapport à la pleine charge. C'est pourquoi la p.i.r.e. moyenne par porteuse pendant l'heure la plus chargée sera supérieure à la p.i.r.e. en pleine charge, sur une petite plage d'environ 1 dB.

Pour les systèmes de téléphonie à une seule voie par porteuse (SCPC) dans lesquels il y a libération des appels bloqués (B Erlang), la probabilité $P(n)$ pour qu'exactly n voies ou moins sur un nombre s de voies soient utilisées pendant l'heure chargée est donnée par la formule [Cooper, 1972]:

$$P(n) = 1 - \sum_{j=n}^s P_j$$

où P_j est la probabilité pour qu'exactly un nombre j de voies soit utilisé; cette probabilité est donnée par la formule:

$$P_j = \begin{cases} B(s, a) & \text{pour } j = s \\ \frac{B(s, a)}{\prod_{k=j+1}^s a/k} & \text{pour } j < s \end{cases}$$

où $B(s, a)$ est la probabilité de blocage pendant l'heure chargée [Dill et Gordon, 1978] et « a » est le trafic offert pendant l'heure chargée (Erlangs).

En admettant que l'émetteur fonctionne à saturation, l'augmentation de la p.i.r.e. par porteuse par rapport à la p.i.r.e. par porteuse en pleine charge est, avec la probabilité $P(n)$:

$$\Delta = 10 \log(s/n)$$

Le Tableau 3 donne plusieurs exemples numériques dans la gamme considérée; il convient d'observer que, pendant l'heure chargée, toutes les voies ou une partie des voies sont utilisées pendant $(1 - B(s, a)) \times 100\%$ du temps. Pour une probabilité de blocage de 2% ($B(s, a) = 0,02$), cela correspond à 98% du temps.

TABLEAU 3

p.i.r.e. relative par porteuse pour la probabilité de blocage de 2%

Trafic offert pendant l'heure chargée (Erlang) (<i>a</i>)	Nombre de voies (<i>s</i>)	Nombre de voies (<i>n</i>)	<i>P</i> (<i>n</i>) (%)	Δ (dB)
17,5	25	21	79,6	0,76
21,93	30	26	81,3	0,62
31,00	40	36	83,4	0,46
40,26	50	45	79,9	0,46
87,97	100	94	80,8	0,27

10.2 Réglage souple de la puissance d'émission des satellites

Dans les paragraphes qui précèdent, on admet une valeur fixe de la puissance d'émission de satellite. Toutefois, pour un système SCPC dans lequel la puissance d'émission des satellites peut être modifiée grâce à un réglage de la puissance d'émission de la station terrienne côtière pour chaque porteuse SCPC, on pourrait maintenir la qualité de la liaison par satellite dans le sens station côtière-station de navire (C/N ou S/N) à la valeur constante requise. Pour ce faire, on peut renvoyer les données relatives à la qualité de la liaison par satellite station côtière-station de navire (mesurée dans la station terrienne de navire), via la liaison station de navire-station côtière, et régler d'une façon souple la puissance d'émission de la station côtière terrienne au moyen des renseignements ainsi fournis.

Avec cette méthode de réglage de la puissance, on peut compenser presque entièrement les variations aléatoires lentes de la qualité des liaisons par satellite, variations dues aux différences de gain d'antenne du satellite, aux précipitations ou aux évanouissements. Cela permet d'accroître le nombre de voies SCPC dans le répéteur de satellite [Egami et autres, 1980].

L'étude des méthodes de réglage souple de la puissance, en tant que moyen de garantir une utilisation plus efficace de la puissance du satellite à long terme, doit aussi porter sur les effets pratiques, opérationnels et économiques exercés sur les modèles actuels de stations terriennes côtières, de stations côtières de navire et de systèmes de signalisation par satellite.

11 Résumé

Le présent Rapport montre comment on peut tenir compte des paramètres fixes et variables des liaisons pour établir des bilans de puissance des liaisons pour un système du service mobile maritime par satellite.

Les statistiques cumulatives des affaiblissements utilisées pour en déduire les marges ont été tenues approximativement pour normales, avec les moyennes et les variances considérées comme étant les sommes des moyennes et des variances des affaiblissements individuels.

Pour tout bilan relatif à la conception d'une liaison donnée, il convient de vérifier les hypothèses d'indépendance des facteurs d'affaiblissement et de distribution normale.

Des études complémentaires sont nécessaires en ce qui concerne les bilans de puissance pour des services autres que la téléphonie et pour des terminaux de navire ayant un rapport G/T de $-4 \text{ dB(K}^{-1})$. On doit aussi étudier la relation entre le trafic, la capacité du satellite et les caractéristiques en matière de p.i.r.e.

Références bibliographiques

- ASE [1976] European communications experiments in L-band with ATS-6 (Bulletin de l'Agence spatiale européenne). Vol. III (mars 1976) et Vol. IV (décembre 1975).
- CANADA, Gouvernement du [10 septembre 1973] High latitude ionospheric fading measurements at 254 MHz and 1550 MHz at Churchill, Manitoba. IMCO Panel of Experts on Maritime Satellites, troisième réunion, MARSAT III/3/4.
- CERS [février 1974] *A ship-balloon communication experiment 1973*. Vol. 1, (Centre européen de recherche spatiale/Agence spatiale européenne).
- COOPER, R. B. [1972] *Introduction to Queueing Theory*. MacMillan Co., New York, Etats-Unis d'Amérique.
- DILL, G. D. et GORDON, G. D. [automne 1978] Efficient Computation of erlang Loss Functions. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 8, 2 p. 353-370.
- EGAMI, S., OKAMOTO, T. et FUKETA, H. [février 1980] K-band mobile earth station for domestic satellite communication. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, p. 291-294.
- GOLDEN, T. S. et SESSIONS, W. V. [1972] Simultaneous L-band and ionospheric fading effects at the geomagnetic equator. Presented at International Union of Radio Science, 1972 Spring Meeting, Washington DC, Etats-Unis d'Amérique.
- Inmarsat [juillet 1978] Inmarsat Preparatory Committee Technical Panel, PREPCOM/TECH/RAPPORT 4, Annexe V.
- LANCRENON, B., STECIW, A. et VANDENKERCKHOVE, J. A. [mai 1976] Maritime satellite payloads. *ESA/ASE Bull.* (European Space Agency), 5, p. 50-53.
- MARISAT [mars 1977] MARSAT system description. COMSAT General Corporation, Washington DC. Presented at INMARSAT Preparatory Committee Technical Panel Meeting, 9-13 mai 1977, Paris.
- NORTON, K. A., VOGLER, L. E., MANSFIELD, W. V. et SHORT, P. J. [octobre 1965] The probability distribution of the amplitude of a constant vector plus a Rayleigh-distributed vector. *Proc. IRE*, Vol. 43, p. 1354-1361.
- OMCI [1973] Panel of Experts on Maritime Satellites - Seconde Réunion (30 avril-4 mai 1973). Theoretical estimates of multipath parameters for L-band satellite-ship links. MARSAT II/4/4, Note du Gouvernement des Etats-Unis d'Amérique.
- WOOD, P. J. et BOSWELL, A. [30 mai 1974] Optimization of antenna gain for earth coverage from a geostationary satellite. *Electron. Lett.*, Vol. 10, 11, p. 227-228.
-