

Zeitschrift: Comtec : Informations- und Telekommunikationstechnologie = information and telecommunication technology

Herausgeber: Swisscom

Band: 75 (1997)

Heft: 8

Artikel: La desserte à large bande des clients via satellite

Autor: Denzler, Victor

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876954>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LA COMMUNICATION À LARGE BANDE PAR SATELLITE



**LA DESSERTE À LARGE BANDE
DES CLIENTS VIA SATELLITE**

A l'aire du multimédia, la communication à large bande prend de plus en plus d'importance. En effet, les systèmes de satellites actuels permettent de transmettre des signaux à large bande. Ces signaux, émis selon le principe de la hiérarchie numérique synchrone, exigent de nouvelles solutions. Dans cet article, l'auteur traite les problèmes y relatifs après avoir passé en revue quelques détails de la technique des satellites qui peuvent avoir des répercussions sur les débits de transmission numériques.

Au cours des années écoulées, les satellites et les stations terriennes ont considérablement évolué. Certains critères, spécifiques aux satellites, sont cependant restés inchangés, notam-

VICTOR DENZLER, BERNE

ment le temps de propagation relativement lent de la communication avec le satellite géostationnaire. Or ce temps de propagation de longue durée caractérise aujourd'hui non seulement les liaisons par satellites, mais peut aussi être observé dans les réseaux numériques terrestres modernes. Ces réseaux et les réseaux par satellite présentent de ce fait aujourd'hui une certaine analogie.

INTRODUCTION

Les liaisons par satellite de l'ancienne génération exigeaient des stations terriennes équipées d'antennes paraboliques d'un diamètre d'environ 30 mètres, afin que la qualité de transmission souhaitée soit assurée. Les nouveaux satellites possèdent de meilleures caractéristiques de transmission, grâce aux progrès de la technique. Il est de ce fait possible d'utiliser des stations terriennes pourvues d'antennes d'un diamètre toujours plus petit, sans que la qualité de transmission n'en souffre. Les dimensions et les coûts des stations terriennes étaient jusqu'ici fonction de la gran-

deur de l'antenne. Ces stations étaient en règle générale destinées à un emplacement fixe et ne pouvaient être déplacées, vu leur volume et leur poids, qu'au prix de grandes difficultés. Grâce à la réduction des dimensions des antennes, les stations terriennes sont devenues mobiles et les liaisons par satellites peuvent être établies de manière toujours plus rapide et plus économique. Cette remarque s'applique aussi aux stations terriennes qui transmettent des signaux à large bande. Il est aujourd'hui déjà possible de transmettre une porteuse de 8 Mbit/s par le biais d'une station terrienne équipée d'une antenne parabolique de 2 m. Les effets des nouvelles technologies sont particulièrement impressionnantes dans les systèmes de radiodiffusion par satellite. Les grandes porteuses MPEG-2, dont les débits peuvent atteindre 33 Mbit/s et qui serviront à transmettre dans un proche avenir des signaux de télévision via satellite, procurent des images de bonne qualité à l'aide d'une parabole de réception ne mesurant que 60 cm de diamètre.

La normalisation du mode de hiérarchie numérique synchrone (SDH) a atteint un tel point que des liaisons SDH sont aujourd'hui prévues à l'échelle mondiale ou sont déjà opérationnelles.

Ces liaisons remplaceront les réseaux actuels de la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH). A l'époque, on a choisi comme élément clé un débit de 2 Mbit/s pour l'architecture des systèmes PDH, ce qui a défini le «profil de la configuration PDH». Les constructeurs de systèmes SDH se proposent de

mettre en place un système de transmission à large bande d'où leur choix du module de transport synchrone (STM-1) d'une capacité d'environ 155 Mbit/s comme unité. La conséquence en est que l'exploitant d'un système de satellite doit aujourd'hui pouvoir transmettre une porteuse d'au moins 155 Mbit/s au lieu du débit actuellement souvent utilisé de 2 Mbit/s. Cette situation a incité l'Agence spatiale européenne (ESA) à procéder une étude sur la communication à large bande par satellite [1], étude dont l'auteur s'est inspiré pour rédiger cet article. Il s'est cependant borné à en résumer ici le volumineux contenu.

Systèmes par satellite

Dans ce qui suit, on explique le principe d'un système par satellite d'une manière aussi condensée et claire que possible, de sorte que même les non-spécialistes puissent en comprendre les particularités. Une caractéristique des liaisons par satellites, qui n'exige aucun commentaire, réside dans le fait que ces engins peuvent distribuer des signaux provenant d'une station terrienne à plusieurs autres (fig. 1).

Le répéteur

Le répéteur est l'unité fonctionnelle du satellite ou, en d'autres termes, tout simplement un convertisseur de fréquences. Le signal Terre-espace émis par la station terrienne est

PRINCIPE DE LA COMMUNICATION PAR SATELLITE

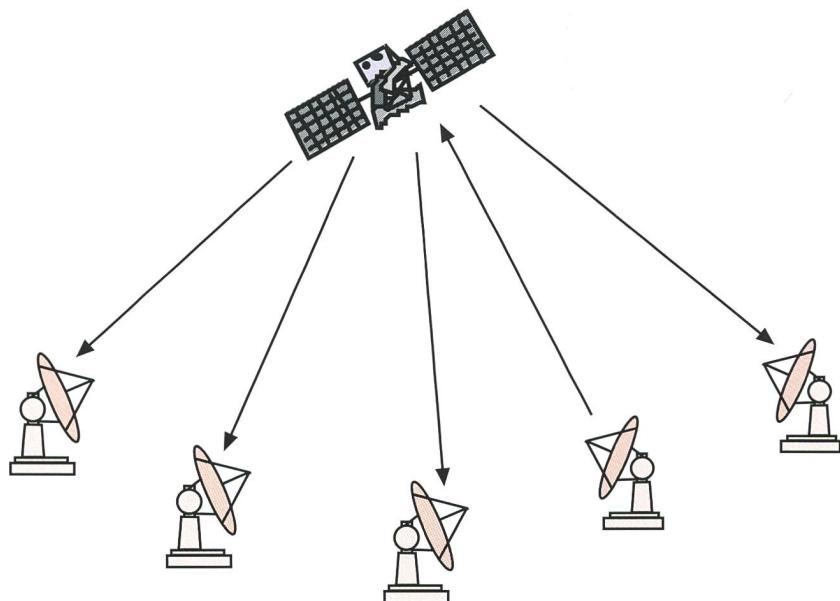


Fig. 1. Le satellite est prédestiné à distribuer un signal provenant d'une station terrienne à plusieurs autres.

converti par le répéteur dans la bande descendante, amplifié et émis vers la station terrienne partenaire. Les bandes montantes et descendantes sont des bandes de fréquences dans lesquelles les signaux sont émis par la station terrienne en direction du satellite puis réémis par le satellite à destination de la station terrienne. Le répéteur convertit tous les signaux reçus, indépendamment du fait qu'il s'agisse d'informations numériques ou analogiques. La désignation aujourd'hui souvent utilisée de «satellite numérique» n'a de ce fait aucun sens.

Les satellites actuels sont équipés de 15 à 30 répéteurs recevant et émettant les signaux sur deux plans de polarisation. La largeur de bande des répéteurs de satellites de communication (Intelsat et Eutelsat) est de 36 ou de 72 MHz. Cependant, Eutelsat envisage d'utiliser, pour ses futurs satellites, des répéteurs opérant à une largeur de bande de 106 MHz. Les satellites de radiodiffusion (par exemple Astra et Hotbird) possèdent quant à eux des répéteurs d'une largeur de bande de 27 MHz. Le répéteur limite les possibilités de la communication à large bande. Il détermine la largeur de bande maximale d'un signal. Dans le cas d'un service multivoie, la non-linéarité (produits

d'intermodulation) du répéteur restreint dans de nombreux cas le nombre des porteuses que le répéteur peut encore transmettre sans perturbation.

L'orbite du satellite et ses effets sur la transmission

L'orbite idéale d'un satellite géostationnaire est une circonférence sur le plan de l'équateur dont le centre serait le milieu de la Terre. Or, une orbite géostationnaire ne peut être réalisée que lorsque la vitesse angulaire du satellite sur cette circonférence ainsi que la vitesse angulaire de la rotation de la Terre autour de son axe coïncident. Pour des raisons physiques, le rayon de l'orbite idéale est de 42 108 km [2]. Un satellite géostationnaire gravite donc autour de la Terre au niveau de l'équateur à une altitude d'environ 36 000 km. L'orbite réelle diffère toutefois de l'orbite idéale. De plus, le satellite dérive de sa position orbitale, étant donné que la Terre est inhomogène (continents, océans, montagnes, etc.) et parce que d'autres astres, notamment le soleil et la lune, exercent une influence sur la trajectoire du satellite par un effet d'attraction de masse.

C'est pourquoi l'exploitant du satellite doit ramener périodiquement le satellite dans sa position orbitale assignée au moyen de fusées de commande montées à bord.

Pour cette raison, les orbites ne sont pas parfaitement circulaires, mais généralement elliptiques. La distance entre une station terrienne et un satellite varie au rythme d'un cycle de rotation. Un satellite géostationnaire se déplace donc par rapport à sa station terrienne.

Les exploitants de satellites garantissent la stabilité de la position orbitale de leur engin sur son orbite. Selon des indications d'Intelsat [3], on sait que les satellites de cet organisme sont stabilisés à environ 100 km, en d'autres termes que la distance par rapport au centre de la Terre varie de moins de 200 km pendant une période de révolution. En outre, Intelsat garantit une précision orbitale de 0,1 degré, tant dans l'axe est-ouest que nord-sud. D'autres exploitants de satellites, par exemple Deutsche Telekom garantissent pour leurs satellites une stabilité orbitale de ± 16 km et de $\pm 0,05^\circ$.

Temps de propagation

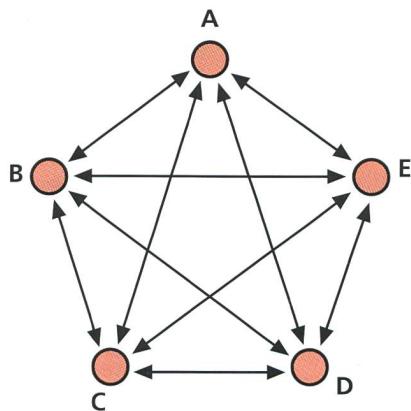
Dans une liaison par satellite, le signal emprunte une voie montante (Terre-espace) et une voie descendante (espace-Terre). Etant donné que ces voies ont une longueur différente (de 36 000 à env. 42 000 km), suivant les emplacements des stations terriennes et la position orbitale du satellite, les temps de propagation varient entre 240 et 280 ms environ.

Si on les compare à de nombreuses liaisons terrestres, les liaisons par satellites se caractérisent par des temps de propagation longs. Dans une liaison par satellite, l'utilisation de protocoles ARQ implique la prise en compte de la longue durée des temps de propagation. Les protocoles optimisés pour les liaisons terriennes limitent en général fortement le débit de données d'une liaison par satellite. Les documents [4] et [5] décrivent des protocoles pour satellites convenant à des débits allant jusqu'à 2 Mbit/s.

Fluctuations périodiques des temps de propagation

L'orbite elliptique du satellite a pour effet que la longueur des liaisons mon-

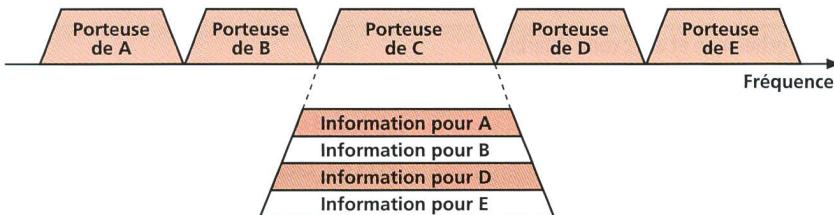
RÉSEAU MAILLÉ



Réseau maillé complet comprenant cinq stations (A, B, C, D et E). Chaque station est en communication avec les quatre autres.

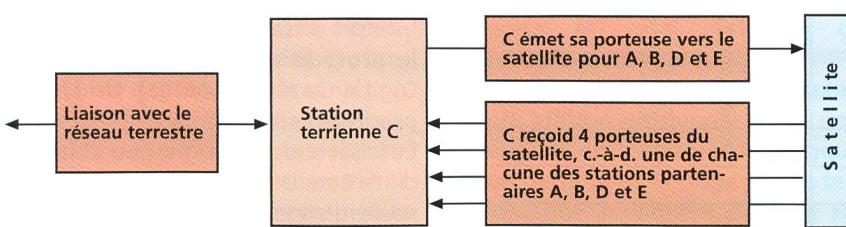
Fig. 2a, b, c. Exemple d'un réseau maillé complet comprenant cinq stations terriennes à débit binaire intermédiaire IDR (AMRF).

DISPOSITION DES PORTEUSES



Disposition possible des porteuses dans un système AMRF. Une porteuse contient les informations destinées à toutes les stations partenaires de sa station émettrice. La figure représente la porteuse émise par la station terrière C. Les diverses informations sont entrelacées dans la porteuse selon un principe de multiplexage dans le temps.

STATION TERRIENNE



Chaque station terrière émet une porteuse contenant des informations pour toutes les stations terriennes partenaires et reçoit quatre porteuses, soit une provenant de chaque partenaire.

tantes et descendantes varie et, de ce fait, que les temps de propagation subissent des fluctuations périodiques d'un ordre de grandeur se mesurant en millisecondes.

Les mouvements du satellite par rapport aux stations terriennes entraînent des décalages périodiques du signal transmis (effet Doppler). Cet effet n'influe pas sur un signal numérique. L'instabilité en fréquence d'une cadence d'horloge stable, dérivée par exemple d'un étalon de fréquences, est d'environ 10^{-8} .

Contre-mesures

Les temps de propagation de longue durée doivent être pris en compte dans le cas des satellites géostationnaires, car il n'existe pas de moyen pour y remédier.

En revanche, des mesures efficaces peuvent être prises contre les modifications de temps de propagation et les conséquences de l'effet Doppler. Les récepteurs d'une station terrière peuvent éliminer ces fluctuations, car elles sont équipées de mémoires-tampon Doppler ou de mémoires-tampon élastiques. La recommandation T-G.811 de l'UIT [6] en matière de stabilité de la fréquence horloge et de la fréquence d'apparition admissible de glissements pour les interfaces (par ex. pour les réseaux SDH) peut ainsi être respectée.

Influences des variations atmosphériques

L'atmosphère exerce une influence sur l'affaiblissement des liaisons montantes et descendantes. Les bandes de fréquences utilisables pour les liaisons par satellites sont principalement déterminées par la résonance de la vapeur d'eau (~ 22,5 GHz) et de l'oxygène (~ 60 GHz). Aujourd'hui, on utilise surtout des bandes (de 1 à 18 GHz) situées au-dessous de la résonance de la vapeur d'eau.

Les variations atmosphériques (modification de la teneur de l'air en vapeur d'eau, pluie, etc.) modifient l'affaiblissement atmosphérique et exercent de ce fait aussi une influence sur la qualité de transmission.

Les affaiblissements atmosphériques sont les plus faibles lorsque le ciel est clair et exempt de nuage; ils s'accroissent en revanche lors de pluies dilu-

Débit binaire	Taux d'erreurs moyen sur les bits par paquet d'erreurs	Longueur moyenne du paquet d'erreurs
8 Mbit/s	12	30 bits
34 Mbit/s	13	52 bits

Tableau 1. Paquets d'erreurs dans une transmission IDR protégée par un code Viterbi.

BER	Temps, en pour cent	Durée pendant laquelle le BER	Durée pendant laquelle le BER d'une année moyenne n'est pas atteint
$\leq 10^{-10}$	95,90 %	21 564	15,0
$\leq 10^{-9}$	99,36 %	3366	2,3
$\leq 10^{-6}$	99,96 %	210	0,14
$\leq 10^{-3}$	99,98 %	105	0,07

Tableau 2. Fréquences typiques pour différents taux d'erreurs sur les bits (BER) et durée pendant laquelle le taux d'erreurs sur les bits n'est pas atteint au cours d'une année moyenne dans une liaison IDR.

Liaison	Durée d'une liaison au cours Avec code échelonné d'une année moyenne avec (minutes)	le code Viterbi (minutes)
Non disponible	216	241
Perturbée	5472	120
Quasi exempte d'erreurs	519 912	525 238

Tableau 3. Comparaison d'une transmission IDR avec code échelonné et avec code Viterbi.

BER	Durée en pour cent au cours d'un mois quelconque
$\leq 10^{-6}$, valeur moyenne supérieure à 10 minutes	80,00 %
$\leq 10^{-4}$, valeur moyenne supérieure à 1 minute	99,70 %
$\leq 10^{-3}$, valeur moyenne supérieure à 1 seconde	99,95 %

Tableau 4. Taux d'erreurs sur les bits garanti pendant une durée déterminée d'un mois quelconque pour une liaison téléphonique AMRT, selon Rec. UIT-R p. 522.

BER	Temps en pour cent d'un mois quelconque
$\leq 10^{-7}$	90,00 %
$\leq 10^{-6}$	98,00 %
$\leq 10^{-3}$	99,97 %
$\leq 10^{-6}$, valeur moyenne pour 1 minute	98,00 %
$\leq 10^{-4}$, valeur moyenne pour 1 minute	99,70 %
$\leq 10^{-3}$, valeur moyenne pour 1 seconde	99,95 %

Tableau 5. Quotient du taux d'erreurs sur les bits pendant un temps déterminé d'un mois quelconque dans une liaison AMRT pour signaux RNIS selon la Rec. UIT-R p. 614. Les trois critères inférieurs se fondent sur les exigences posées à une liaison par satellite satisfaisant aux recommandations T de G. 821 de l'UIT.

viennes. De violents orages peuvent accroître brièvement l'affaiblissement atmosphérique, de manière que les liaisons sont interrompues. Les influences atmosphériques sont comparables à celles qui s'exercent sur les liaisons hertziennes terrestres. Les liaisons terrestres sont cependant encore entravées par ce que l'on appelle l'affaiblissement dû à la propagation par trajets multiples, qui est la cause de l'affaiblissement sélectif dans les transmissions à large bande. Dans les radiocommunications par satellites ces phénomènes sont négligeables. En effet, le planificateur d'une liaison par satellite prend en compte les influences atmosphériques dans une mesure économiquement raisonnable. L'exploitant de satellite garantit en règle générale une disponibilité de la liaison de 99,8 % du temps d'une année moyenne, dans la mesure où les stations terriennes satisfont à certaines exigences de qualité. En l'occurrence, ces exigences sont dictées par le climat du lieu d'implantation de la station terrienne. Les expériences montrent que les disponibilités sont supérieures aux valeurs garanties, à savoir de 99,98 % environ.

Systèmes des satellites actuels pour signaux à large bande

Pour la transmission de signaux à large bande, on recourt généralement à l'accès multiple par répartition en fréquence (AMRF) ou à l'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT). Les porteuses de ces deux procédures d'accès sont généralement modulées selon le mode 4-PSK.

Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF)

Intelsat offre un système AMRF selon le procédé «Intermediate Data Rate Digital Carriers» (IDR) [8]. Un système pratiquement identique est offert par Eutelsat sous la désignation «Intermediate Rate Digital Carrier» (IDC) [9]. La seule distinction entre ces deux systèmes réside dans les débits binaires différents qu'ils peuvent transmettre. Intelsat spécifie une porteuse IDR (sauf pour 98 et 140 Mbit/s) pour chaque débit binaire de la hiérarchie numérique

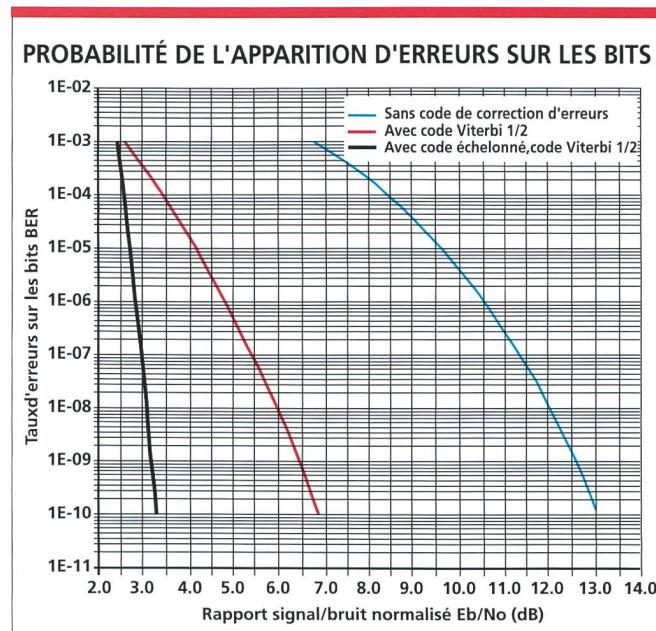


Fig. 3. Probabilité du taux d'erreurs sur les bits BER en fonction du rapport signal/bruit E_b/N_0 normalisé pour trois cas: transmission sans correction d'erreurs, transmission protégée par un code Viterbi $1/2$ et transmission protégée par un code échelonné (code R-S à l'extérieur et code Viterbi $1/2$ à l'intérieur). Les courbes s'appliquent à des démodulateurs 4-PSK idéaux, E_b (énergie par bit) se rapportant au débit binaire composite et à une position orbitale spécifique du satellite. Dans le cas de démodulateurs réels, les résultats sont inférieurs de $\frac{1}{2}$ à environ $2\frac{1}{2}$ dB, c'est-à-dire qu'ils se situent à droite des courbes représentées, suivant la qualité du démodulateur.

plésiochrone (PDH). En revanche, Eutelsat se limite à 2 et à 8 Mbit/s. Intelsat et Eutelsat exploitent plusieurs porteuses par répéteur.

La station terrière qui émet ajoute aux signaux PDH qu'elle reçoit du réseau terrestre une capacité supplémentaire spécifique au satellite. Cette capacité permet une signalisation pour la liaison et une supervision de la qualité de transmission. On peut ainsi transmettre par exemple des rétrosignalisations d'alarmes à quatre destinations au maximum et deux canaux de service. Le débit d'information et la capacité supplémentaire constituent ce que l'on appelle le débit binaire composite (composite rate). Il est dispersé de manière aléatoire (scrambled) et pourvu d'un code de canal corrigeant vers l'avant (FEC). Ce code correcteur d'erreurs protège le débit binaire composite, mais y ajoute des bits supplémentaires. La somme des débits binaires (appelée débit de transmission = transmission rate) est dirigée sur un modulateur 4-PSK. La porteuse modulée, transposée dans la bande des hautes fréquences, est amplifiée puis

transmise au satellite au moyen d'une antenne parabolique.

Réseau maillé

Grâce à la capacité supplémentaire du satellite qui permet de transmettre en arrière quatre alarmes, une porteuse IDR peut contenir des informations destinées à quatre destinations différentes.

Une porteuse IDR peut en conséquence se rapporter à cinq stations terriennes au plus: une station émettrice et quatre stations réceptrices. Un réseau maillé complet pour cinq stations terriennes est ainsi réalisable, ce qu'illustre le dessin de la figure 2. Dans un réseau maillé complet, chaque station terrière émet une porteuse et en reçoit une de chaque station partenaire. Si cinq stations terriennes sont impliquées dans ce réseau, chaque station doit posséder quatre démodulateurs. Chaque récepteur prélève les informations qui lui sont destinées des signaux démodulés et les achemine sur le réseau terrestre.

Qualité d'une liaison IDR

Le bruit thermique de l'affaiblissement atmosphérique est une source perturbatrice déterminante pour un canal de satellite. La structure d'erreurs du débit binaire perturbé par le bruit thermique peut être caractérisée par un écart moyen entre deux erreurs individuelles, ce qui signifie que des erreurs doubles ou des paquets d'erreurs se produisent très rarement. Pour de tels types d'erreurs, il existe aujourd'hui des codes correcteurs d'erreurs corrigeant vers l'avant (Forward Error Correction, FEC) très efficaces. Des codes correcteurs d'erreurs fréquemment utilisés présentant les caractéristiques susmentionnées sont les codes Viterbi, du nom de leur inventeur qui les a appelés codes convolutifs [7]. Or, cette correction d'erreurs a son prix, car une transmission corrigée par un code exige une plus grande largeur de bande qu'une transmission non protégée. Dans le réseau IDR, deux codes Viterbi sont normalisés. Le code Viterbi $1/2$ a une efficacité correctrice supérieure, mais il double le débit binaire

transmis; le code Viterbi $\frac{3}{4}$ est moins efficace, et il n'augmente le débit binaire que d'un tiers.

Les erreurs triples ou les paquets d'erreurs contenant plus de 3 bits erronés ne peuvent pas être corrigés par les algorithmes de décodage Viterbi. Dans de tels cas fort rares, le décodeur Vi-

terbi engendre des erreurs supplémentaires. L'article [10] décrit des mesures qui s'appliquent aux paquets d'erreurs, et effectuées sur deux démodulateurs équipés d'un décodeur Viterbi. L'un des démodulateurs était prévu pour une transmission à 8 Mbit/s et l'autre à 34 Mbit/s. Les principaux ré-

sultats sont récapitulés au tableau 1. Parmi les quelque 400 paquets d'erreurs mesurés par démodulateur, on a décelé en moyenne 12 ou 13 erreurs par paquet, pour une longueur moyenne de paquet de 30 bits (8 Mbit/s) et de 52 bits (34 Mbit/s). Les valeurs extrêmes sont nettement supérieures et se situent vers 80 erreurs par paquet pour une longueur allant jusqu'à 220 bits.

Intelsat indique des valeurs d'occurrence typiques pour une année moyenne et différents taux d'erreurs sur les bits (BER), paramètres qui sont récapitulés au tableau 2. En outre, on indique aussi la durée d'une année moyenne durant laquelle les quotients d'erreurs sur les bits ne sont pas atteints.

Comme évoqué précédemment, les variations atmosphériques à l'emplacement de la station terrienne influent sur la qualité de transmission de la liaison par satellite. Les indications du tableau 2 doivent être considérées comme des valeurs typiques d'un réseau Intelsat à l'échelon mondial.

Intelsat offre depuis 1995 la possibilité d'éliminer, dans une large mesure, les paquets d'erreurs au moyen de code «Reed-Solomon» (R-S Code). Ces codes R-S normalisés par Intelsat ont une longueur de 126 à 225 symboles de code (1 symbole = 8 bits) et sont en mesure de corriger de sept à dix symboles erronés.

Le code exige une augmentation de la largeur de bande de 8 à 10 % seulement, d'où la nécessité d'une capacité de calcul très poussée au décodage. Le temps nécessaire pour la correction d'un mot de code, peut atteindre 7 ms pour un débit de 2 Mbit/s. Les durées de temporisation pour des débits binaires plus élevés en conséquence sont plus brèves; pour un débit binaire de 34 Mbit/s, elles sont inférieures à 2 ms. Un code Viterbi et un code R-S constituent ensemble ce que l'on appelle un code de concaténation (concatenation code); les deux codes sont utilisés en cascade. Côté émission, le signal traverse d'abord le codeur R-S puis le codeur Viterbi monté en aval. Les décodeurs sont disposés en sens inverse dans le récepteur, le signal étant tout d'abord décodé en mode Viterbi puis en mode R-S. Intelsat désigne aussi le code Viterbi par code intérieur et le code R-S par code extérieur.

Les codes de concaténation sont d'une efficacité supérieure: les erreurs se produisant le plus souvent peuvent

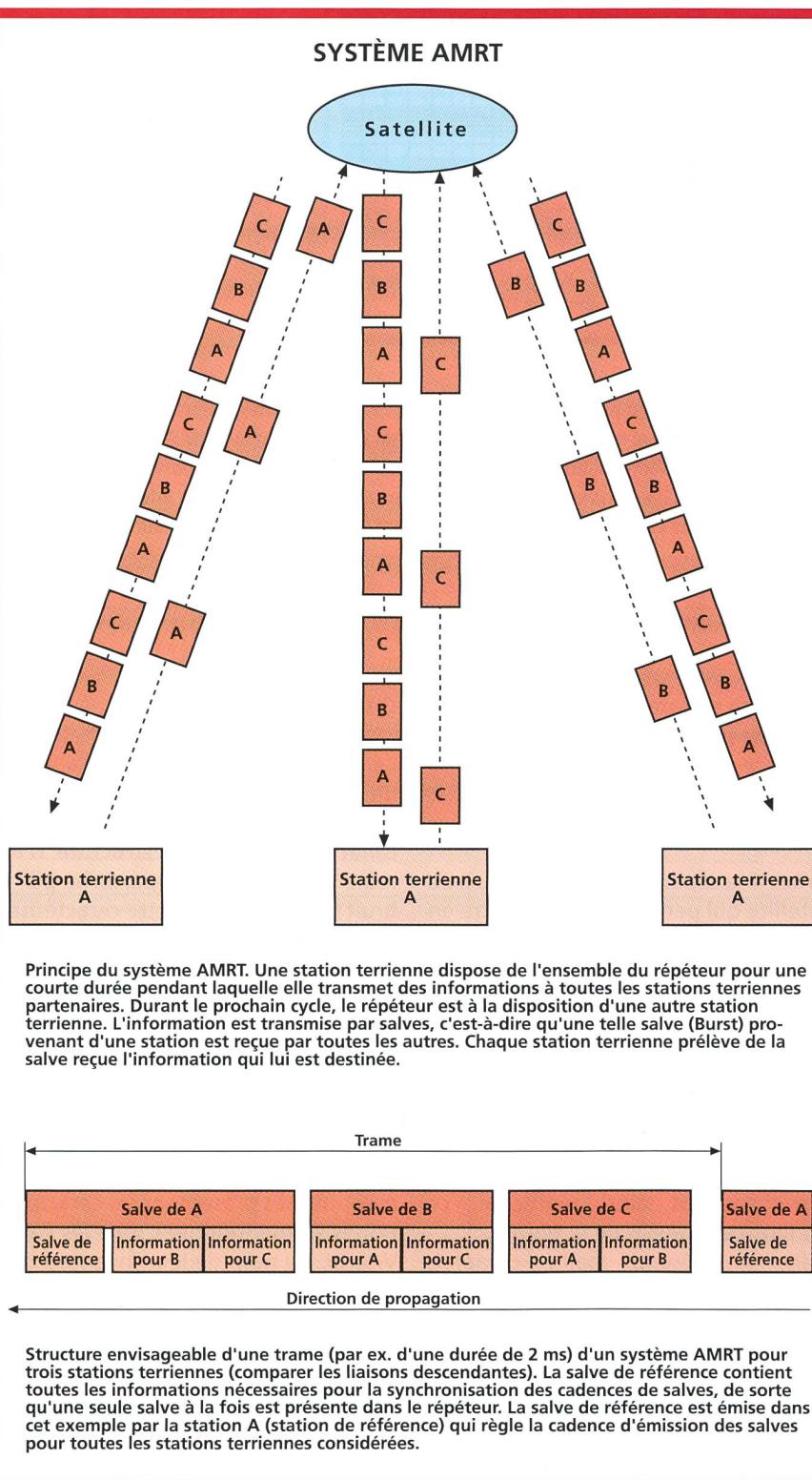


Fig. 4. Exemple d'un système AMRT comprenant trois stations terriennes.

être corrigées. Si des configurations d'erreurs incorrigibles se produisent dans le flux binaire reçu, l'algorithme de décodage peut accroître le nombre des erreurs. Le débit d'informations décodé peut alors contenir plus d'erreurs que le débit de transmission reçu. En pratique, cela signifie que l'on dispose soit d'une transmission exempte d'erreurs ou qu'il y a coupure de la liaison. Pour l'évaluation d'une liaison numérique, on utilise souvent la probabilité d'erreurs sur les bits (BER) en fonction du rapport signal/bruit E_b/N_0 normalisé. La figure 3 montre ces trois fonctions pour le démodulateur idéal. L'efficacité de la correction réalisée y apparaît clairement. Plus l'efficacité de la correction d'un code est élevée, plus la courbe est raide. La durée entre le rapport signal/bruit E_b/N_0 normalisé pour une transmission à très faible taux d'erreurs ($BER < 10^{-10}$) et entre le rapport E_b/N_0 pour une probabilité d'erreurs $BER > 10^{-3}$ (coupure) devient inférieure. Cette durée est ramenée d'environ de 6,5 dB lors d'une transmission non protégée à environ 1 dB lors de l'utilisation d'un code de concaténation.

Une étude théorique [11] compare une liaison IDR, protégée par une code de concaténation, avec une liaison IDR protégée par un code Viterbi. On distingue ici trois qualités: une transmission quasi exempte d'erreurs ($BER \leq 10^{-10}$), une transmission perturbée ($10^{-3} \geq BER > 10^{-10}$) et la non-disponibilité de la transmission ($BER > 10^{-3}$). Cet examen tient compte de liaisons par satellite dans la bande Ku (fréquence montante dans la bande de 14 GHz,

fréquence descendante dans la bande de 11 GHz); on suppose dans ce cas que la station terrière émet ses signaux en direction du satellite avec un angle d'élévation de 36° et qu'elle se trouve en Suisse (zone climatique K selon modèle de propagation R de l'UIT). Les principaux résultats pour une année moyenne sont récapitulés au tableau 3. La comparaison montre que la non-disponibilité de la liaison est pratiquement indépendante du code choisi, ce qui n'est pas le cas de la durée de la transmission perturbée. La liaison protégée par un code Viterbi est perturbée 64 fois plus longtemps que celle protégée par un code de concaténation.

Les liaisons IDR protégées par le code Viterbi sont utilisées depuis longtemps. La standardisation du code de concaténation est relativement récente, raison pour laquelle cette méthode n'est pas encore fréquemment appliquée. Sur le marché, peu de fabricants offrent des modulateurs et des démodulateurs équipés pour le code de concaténation. Les avantages de ce code étant cependant évidents, il devrait bientôt s'imposer pour la transmission numérique à large bande.

Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT)

Dans un système multiplexé AMRT, les intervalles de temps d'une trame sont attribués aux stations terriennes concernées. La station terrière n'émet ses informations en direction du satellite que pendant la durée de l'intervalle de temps qui lui est accordée. Durant l'intervalle de temps suivant, une autre station envoie ses données, et ainsi de suite. À l'intérieur d'une trame, chaque station terrière émet donc pendant une courte durée, la succession de l'activité des stations émettrices étant la même pour chaque trame.

L'information est transmise par salves (en anglais «burst»). La figure 4 représente la fonction d'un système AMRT pour 3 stations terriennes.

Le débit binaire de transmission et d'information des stations terriennes détermine pour l'essentiel le nombre possible de stations terriennes pouvant faire partie du réseau.

Les systèmes AMRT actuellement utilisés commercialement ont un débit binaire de transmission des salves de 120 Mbit/s. Les porteuses sont modu-

lées en 4-PSK et transmises avec une largeur de bande de 72 MHz. La largeur de bande des répéteurs (également 72 MHz) est pleinement utilisée par les salves. Une exploitation multivoie dans un répéteur est de ce fait impossible.

Le débit binaire d'information peut être adapté aux besoins de l'exploitant de la station terrière en ce sens que les intervalles de temps peuvent être raccourcis ou prolongés. Une adaptation dynamique des systèmes actuels est toutefois impossible. Le plan de trame (burst time plan), établi par l'exploitant du satellite, qui tient largement compte des désirs de l'exploitant de la station terrière, est déterminant pour la radiocommunication. L'implémentation d'un nouveau plan de trame exige aujourd'hui encore un travail de plusieurs heures dans chaque station terrière. Un satellite permet d'exploiter plusieurs systèmes AMRT en parallèle par le biais de plusieurs répéteurs.

Comme nous l'avons évoqué au début, les liaisons montantes et descendantes ont une longueur différente, d'où des modifications du temps de propagation pour chaque voie ayant une autre longueur.

La cadence d'émission des salves doit de ce fait être continuellement post-synchronisée par les stations terriennes. Le mécanisme de synchronisation doit garantir que chaque station terrière choisisse l'instant d'émission de manière que la salve atteigne le satellite lors de l'occurrence de l'intervalle de temps correct. Le répéteur ne doit recevoir chaque fois qu'une seule salve, ce qui signifie qu'aucune salve ne doit en chevaucher une autre. Une station, dite de référence, est responsable de cette synchronisation dans un réseau de stations terriennes AMRT. Elle surveille chaque salve; en d'autres termes, le début et la longueur de la salve reçue sont mesurés à l'instant de leur émission et comparés avec les valeurs de consigne du plan de trame.

Toute correction éventuellement nécessaire est communiquée au moyen d'une salve dite de référence à la station terrière qui n'aurait pas envoyé sa salve de manière parfaitement synchrone. Cette station, selon l'avis de correction reçu, émettra alors ses informations ou salves de données un peu plus tôt ou un peu plus tard. La station de référence émet toujours une salve de référence au début de chaque trame.

SSTM	Débit binaire pour SSTM (kbit/s)
SSTM – 11	2 432
SSTM – 12	4 736
SSTM – 21	7 040
SSTM – 22	13 952
SSTM – 23	20 864
SSTM – 24	27 776
SSTM – 25	34 6882
SSTM – 26	41 600

Tableau 6. Modules de transport synchrones imaginables (SSTM) pour des parties des STM-1 selon l'étude UIT-R Groupe 4; projet de recommandation UIT-RXX/4 et UIT-R S.XY/4.

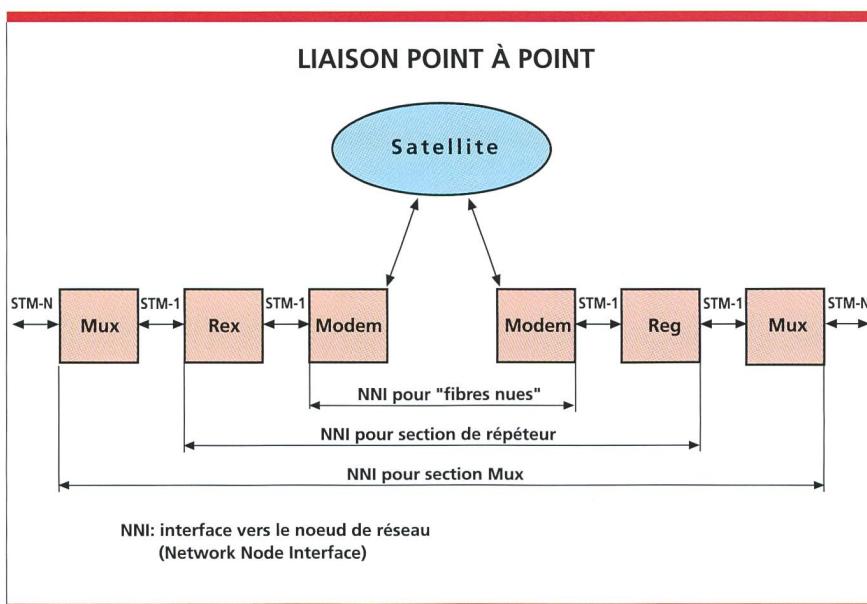


Fig. 5. Scénarios d'une liaison point à point avec STM-1.

Les systèmes AMRT exploités par Intelsat et Eutelsat sont d'une structure identique et fonctionnent avec une longueur de trame de 2 ms.

Les signaux d'information des diverses stations terriennes consistent également, comme dans le système IDR, en un signal multiplexé, qui peut contenir des informations pour plusieurs destinations.

Une station terrienne reçoit et démodule chaque salve, mais ne traite que les informations qui lui sont destinées. C'est pourquoi on peut aussi réaliser des réseaux maillés avec le système AMRT.

Qualité d'une liaison AMRT

Etant donné que le répéteur n'amplifie qu'un signal à la fois, son amplificateur de puissance n'engendre pas de produits d'intermodulation gênants. Il peut donc être exploité à la limite de sa saturation (exploitation non linéaire du satellite), ce qui signifie que la performance maximale du répéteur est pratiquement entièrement utilisée. Le rapport signal/bruit E_b/N_0 normalisé du signal AMRT reçu par la station terrienne a de ce fait une valeur pratiquement aussi grande qu'il est possible d'atteindre sur le trajet par satellite considéré.

Un récepteur AMRT ne peut décoder une salve que lorsque le récepteur s'est

synchronisé tant sur la porteuse que sur le débit binaire de la salve incidente. Si cette synchronisation, qui doit être réalisée dans les délais les plus brefs (p. ex. $< 3 \mu s$ chez Eutelsat ainsi que dans le mode AMRT Intelsat), échoue, des salves ou même des trames entières sont perdues. Les liaisons AMRT présentent cependant une disponibilité élevée malgré cette faiblesse due au système, d'où le fait qu'Intelsat garantit par exemple le respect des qualités de transmission internationalement recommandées par les recommandations de l'UIT [12 et 13] (tableaux 4 et 5).

SDH par satellite

La hiérarchie numérique plésiochrome (PDH) est aujourd'hui complétée par la hiérarchie numérique synchrone (SDH). A longue échéance, les liaisons SDH remplaceront probablement les réseaux PDH. La normalisation du mode SDH est actuellement si avancée que des liaisons SDH sont déjà opérationnelles ou planifiées à l'échelle mondiale.

Les modules de transport synchrones (STM) sont des débits de transmission du mode SDH. Leur largeur de bande est adaptée à la technique des fibres optiques, ce qui signifie que les débits binaires sont élevés en conséquence.

Un système STM-1 (155,52 Mbit/s) peut être transmis via satellite au moyen d'un répéteur de 70 MHz de largeur de bande. A cet effet, il faut cependant utiliser une modulation à 8 positions en phase (8-PSK). De tels modulateurs et démodulateurs sont déjà sur le marché. Les modèles STM-4 (622,08 Mbit/s) ou STM-16 (2488,32 Mbit/s) sont trop puissants pour les capacités actuelles des satellites. Dans de nombreuses liaisons par satellites, on peut toutefois se contenter d'une capacité nettement inférieure à celle offerte par STM-1. Un groupe d'étude R de l'UIT planifie de ce fait des modules de transport synchrones pour satellites (SSTM). Il s'agit de neuf modules de transport différents opérant à des débits binaires allant de 2 à 52 Mbit/s; la base pour la détermination des débits binaires est la capacité du conteneur virtuel [14]. Des liaisons par satellites pour STM-1 sont aujourd'hui envisagées. Le satellite doit surtout assurer une fonction de redondance (voie de secours) pour les circuits à fibres optiques, fonction pour laquelle des liaisons point à point suffisent. Il est cependant aussi possible d'établir des réseaux maillés STM-1, ce qui nécessite alors plusieurs répéteurs de 70 MHz.

A l'heure actuelle, il n'existe ni un standard international, ni un standard pour exploitant de satellite pour des transmissions STM-1 via satellite; des liaisons d'essai ont cependant été mises en place avec succès par Intelsat.

Liaisons pour STM-1 via satellites

Les modulations par déplacement de phase à plusieurs positions sont plus sensibles aux erreurs que les modulations dont la position en phase subit moins de déplacements. Une porteuse modulée 8-PSK exige de ce fait pour un BER déterminé un rapport signal/bruit plus grand qu'une porteuse modulée 4-PSK. Une transmission quasi exempte d'erreurs ($BER > 10^{-10}$) d'une liaison STM-1 exige un rapport signal/bruit normalisé de $E_b/N_0 = 10$ à 11 dB, bien que l'information soit protégée par un code de concaténation. Le code échelonné utilisé ici (7/8 Trellis à l'intérieur et code R-S à l'extérieur) corrige cependant moins efficacement les erreurs que celui qui est représenté à la figure 3. Les rapports signal/bruit évoqués sont des valeurs empiriques d'où la nécessité de faire preuve d'une certaine prudence lors d'une comparaison.

son avec les courbes de la figure 3. Le fait que le répéteur ne doit transmettre qu'une porteuse STM-1 permet d'utiliser un amplificateur d'émission dans le satellite dont les caractéristiques ne sont pas linéaires. Les rapports signal/bruit des porteuses dans la station terrienne réceptrice sont donc importants et les qualités de transmission résultantes correspondent à celles des liaisons IDR protégées par un code de concaténation.

Liaisons point à point

Dans [1], on présente et commente trois scénarios différents pour une liaison STM-1 point à point. Deux sont caractérisés par l'ordonnancement de la trame de base SDH. Le troisième correspond au principe de transmission également utilisé dans le mode IDR, ce qui signifie que le débit linéaire de la station terrienne est complété par une capacité supplémentaire. Les trois scénarios ressortent de la figure 5.

La trame de base de STM-1 possède ce que l'on appelle une capacité supplémentaire (section overhead = SOH) qui se subdivise en deux éléments: la «Regenerator Section Overhead» (RSOH) et la «Multiplex Section Overhead» (MSOH). RSOH permet un échange d'informations entre deux répéteurs voisins, une section de répéteurs étant surveillée à l'aide du RSOH. MSOH permet un contrôle dans une section du multiplexeur. Dans un régénérateur, seul le RSOH est traité et entre en jeu. Un multiplexeur, en revanche, traite l'ensemble SOH de manière que RSOH et MSOH soient pris en compte. Comme le montre la figure 5, une station terrienne pourrait aussi assurer la fonction d'un multiplexeur (Mux), d'un régénérateur (Reg) ou la fonction actuellement courante d'un modem. Les modems font en quelque sorte partie de la station terrienne et se chargent du codage du canal en vue de la transmission. Les circuits de sortie des modems sont équipés des mémoires-tampon Doppler ou des mémoires-tampon élastiques. Le débit binaire parvenant au satellite demeure ainsi à la lecture en synchronisme avec la fréquence d'horloge SDH du réseau terrestre.

La liaison par satellite désignée par «fibre nue» dans la figure 5 possède une interface entre le réseau par satellite et le réseau terrestre SDH (NNI) directement connectée aux modems.

Dans ce scénario, la liaison par satellite est entièrement transparente. L'exploitant SDH ne remarque en aucun cas si une liaison par satellite est intercalée ou non dans sa communication, d'où le nom de «fibre nue». La transparence accroît la souplesse de la station terrienne. Au prix d'une complexité relativement modeste, l'interface peut être utilisée pour un autre service, p. ex. pour ce que l'on appelle l'«ATM». Un autre avantage réside dans le fait que les mêmes équipements peuvent être employés tant pour des liaisons point à point que pour la distribution multipoint. Il est cependant nécessaire que l'exploitant de la station terrienne dispose d'une capacité supplémentaire (overhead): celle-ci pourrait posséder la même configuration que pour IDR (94 kbit/s supplémentaires); cette «overhead» est générée par le modulateur de la station émettrice et analysée puis éliminée dans le démodulateur de la station terrienne partenaire.

Dans le prochain scénario, les régénérateurs font partie de la liaison par satellite, du fait que celle-ci constitue une section de régénération dans le réseau SDH. L'exploitant de la station terrienne peut accéder à RSOH et utiliser les fonctions standardisées de la capacité supplémentaire, par exemple le canal de données pour la section de régénérateur. Environ la moitié de la capacité supplémentaire n'est pas définie, ce qui signifie que les bits concernés sont «réservés pour une utilisation internationale» ou «réservés pour l'utilisation nationale». Une grande partie de la capacité RSOH supplémentaire de 1,278 Mbit/s est à la disposition de l'exploitant de la station terrienne pour ses applications. Un autre aspect concerne les multiplexeurs des liaisons par satellites. Ils deviennent en fait des sections de multiplexage. Dans ce scénario, l'exploitant de la station terrienne peut accéder à l'ensemble du SOH. Il dispose du canal de données pour la section de ré-

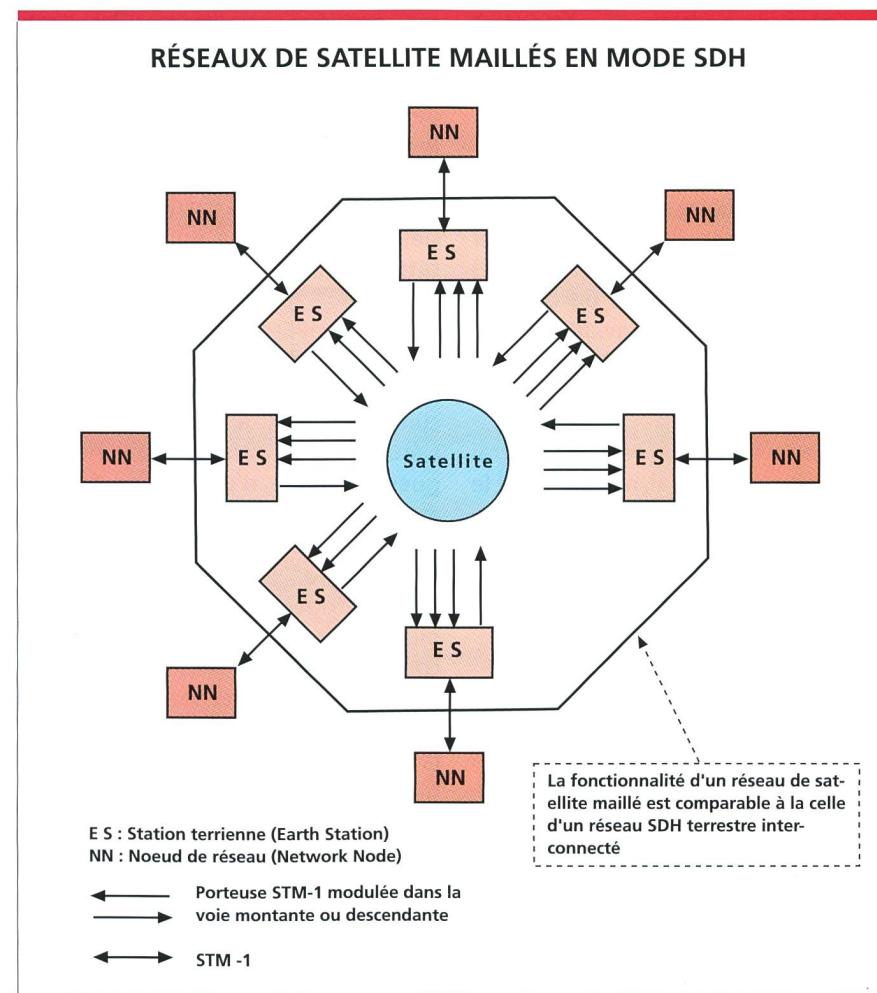


Fig. 6. Exemple d'un réseau maillé de satellite SDH comprenant sept stations terriennes.

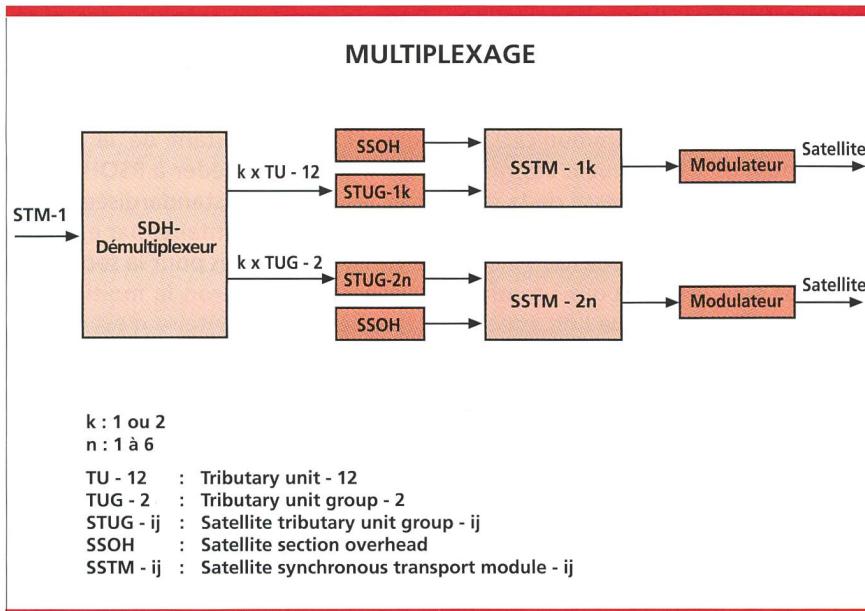


Fig. 7. Démultiplexage de STM-1 dans des sous-unités et remultiplexage à destination de modules de transport synchrones pour satellites.

génération, du canal de données dans la section de multiplexage MSOH et des bits réservés pour l'usage national et/ou international des deux sections «overhead» pour l'échange des données avec une station terrienne partenaire. Environ la moitié du débit de 4,6 Mbit/s peut être choisie à cet effet. Les solutions consistant à considérer les sections par satellites comme les sections de régénération ou de multiplexage présentent l'avantage que des capacités supplémentaires «overhead» du satellite deviennent superflues.

Le scénario «fibre nue» exige il est vrai un «overhead» spécial, mais possède le grand avantage d'une ligne entièrement transparente. Dans [1], on recommande de ce fait la solution «fibre nue».

Un réseau maillé

Un exemple marquant d'un réseau maillé SDH possible, réalisé par un réseau de satellites, est présenté à la figure 6. Un réseau maillé comprenant sept stations terriennes au plus pourrait par exemple être mis en place au moyen d'un satellite Eutelsat II, car les satellites de ce type possèdent sept répéteurs à 72 MHz et, en plus, neuf répéteurs à 36 MHz.

La fonctionnalité d'un système de réseau maillé par satellite peut être comparée à une interconnexion STM-1 géographiquement distribuée. Les deux systèmes par satellites ainsi que le «cross-connect» de STM-1 connecte des parties de STM-1 (unités de transport ou conteneurs virtuels) entre plusieurs points. En ce qui concerne les satellites, il s'agit d'interfaces STM-1 distantes géographiquement de quelques milliers de kilomètres. Dans le cas de l'interconnexion «cross-connect», il s'agit en revanche de circuits raccordés à un commutateur. L'étude de [1] montre qu'il ne sera guère possible d'utiliser les équipements SDH actuels dans un réseau maillé par satellite sans extension supplémentaire. Les structures asymétriques exigent une conception complexe de ce que l'on appelle «fault conditions and consequent actions». Les premières esquisses de solutions sont décrites dans l'étude, mais exigeront toutefois des examens supplémentaires.

Sous-ensembles STM-1

Dans les recommandations R provisoires XX/4 et S.XY/4 de l'UIT [14], on propose un certain nombre de solutions d'architectures de réseaux et de

fonctions d'équipements pour la transmission synchrone par sous-ensembles STM-1 (sub-STM-1) dans des systèmes par satellite. Des parties de STM-1 sont de ce fait entrelacées par un procédé de multiplexage spécial de manière à assurer ce que l'on appelle les «fonctions du module de transport synchrone pour satellite» (satellite synchronous transport module = SSTM). Dans ce qui suit, on décrit brièvement une solution dérivée des propositions précitées, solution qui est également traitée dans [1].

Le procédé de multiplexage pour SSTM tient compte des principes SDH suivants.

- Le multiplexeur entrelace les signaux octet par octet, un octet étant à chaque fois suivi d'un premier secteur SDH (virtual combiner, VC; Tributary Unit, TU; etc.), l'octet suivant par un deuxième secteur SDH et ainsi de suite.
- La section par satellite doit être entièrement transparente pour les secteurs SDH.
- Il doit être garanti que les fonctions dans les SOH puissent être transmises de manière appropriée via le satellite.

Pour que les fonctions SOH puissent être transmises, le sous-ensemble de multiplexage doit être pourvu d'une capacité supplémentaire «Satellite Section Overhead = SSOH». Le schéma de principe de la figure 7 montre le multiplexage et le remultiplexage. Le signal STM-1 entrant est démultiplexé jusqu'au niveau TUG-2 (Tributary Unit Group-2) ou TU-12 (Tributary Unit-12). Un ou deux TU-12 ou un à six TUG-2 sont remultiplexés et il en résulte le STUG (Satellite Tributary Unit Group). Le SSOH et un STUG constituent ensemble un module de transport synchrone pour satellite (SSTM) lorsqu'ils sont multiplexés. Le tableau 6 montre quelques possibilités SSTM ainsi que les débits binaires associés. La capacité supplémentaire «Overhead» du satellite (SSOH) est contenue dans le débit binaire. Les STUG représentent une nouvelle succession multiplexée comparable aux TUG terrestres, situés entre TUG-12 et TUG-3/VC-3. Les modules de transport synchrones pour satellites peuvent être comparés aux STM-N, une solution fondée sur une nouvelle hiérarchie de multiplexage.

8.3, 9.3

Bibliographie

- [1] R. Brönnimann, P. Meuret B. Perrin, U Denzler. Studie für die European Space Agency (ESA), Teil: Broadband Communications by Satellite.
- [2] H. Dodel, M. Baumgart. Satellitensysteme für Kommunikation, Fernsehen und Rundfunk. Verlag Hüthig.
- [3] Intelsat Earth Station Standards (IESS). Document IESS-308.
- [4] H. Gold, M. Kahnt, S. Ramseier. Performance of network protocols over satellite. Doc. of COST226.
- [5] H. Gold, S. Remesch, M. Kahnt. Handbook for the parametrization of network protocols over satellite. Doc. of COST226.
- [6] ITU-T G.811.
- [7] Andrew J. Viterbi. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. IEEE Transactions on information theory, April 1967.
- [8] Intelsat Earth Station Standards (IESS). Document IESS-308 (Rev. 8) Performance characteristics for intermediate data rate (IDR) digital carriers.
- [9] Eutelsat. Intermediate rate digital carrier (IDC) earth station standard I, EESS 203, issue 2 – Rev. 0.
- [10] R. Brönnimann. ATM over satellite – analysis and experimental results. Vortrag, gehalten am «Technology Summit» an der Telecom 1995 in Genf.
- [11] R. Zbinden, R. Brönnimann, P. Meuret. Exceeding duration of specific BER on digital satellite links with convolutional FEC and with concatenated FEC. Vortrag, gehalten von P. Meuret am «Fial Symposium» der COST226 in Budapest im Mai 1995.
- [12] Rec. ITU-R S. 522. Allowable bit-error ratios at the output of the hypothetical reference digital path for systems in the fixed-satellite service using pulse code modulation for telephony.
- [13] Rec. ITU-R S. 114. Allowable bit-error performance for a hypothetical reference digital path in the fixed-satellite service operating below 15 GHz when forming part of an international connection in an integrated services digital network.
- [14] UIT-R Study Group 4, Working Party 4. Draft recommendation ITU-R XX/4. Network architecture and equipment functional aspects of digital satellite systems in the FSS, forming part of SDH transport networks and draft recommendation ITU-R S.XY/4. Transmission performance and OA&M aspects of digital satellite systems in the FSS, forming part of SDH transport networks.

SUMMARY

Broadband communication via satellite

In the age of multimedia services, broadband communication is becoming an increasingly important tool. Satellite systems offer services for broadband signal transmission. Broadband signals of the synchronous digital hierarchy require new solutions. This report discusses the problems related to this application. A few details of the satellite technology that can influence the digital data transmission streams are reviewed.



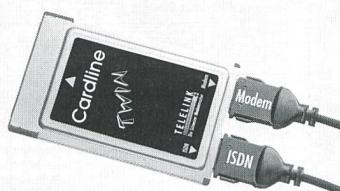
Victor Denzler, ingénieur ETS diplômé, travaille depuis 1970 à la Direction Recherche et développement, où il s'est occupé durant les trois premières années de la mise au point de systèmes de télévision. Il contribue maintenant en tant qu'ingénieur-système à développer les communications par satellites, à coordonner les liaisons dirigées et les radiocommunications par satellites ainsi qu'à résoudre des problèmes d'interférences et à étudier de nouveaux systèmes par satellites.

Go online! ISDN & Modem

Cardline TWIN

V.34 Modem + ISDN

Kommunikation ohne Einschränkung mit dem Cardline TWIN. Es kann als ISDN Terminal-Adapter (TA) und als vollwertiges 28'000er-Modem verwendet werden. Schliessen Sie das Cardline TWIN einfach am analogen oder digitalen (ISDN) Telefonnetz an!



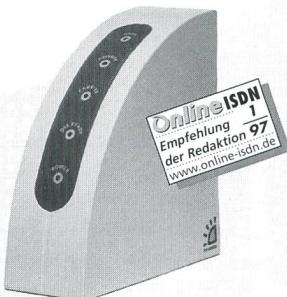
CARDLINE TWIN

Cardline TWIN, aktiver Terminaladapter mit V.34, Modem, DSP (Digital Signal Processing; Technologie zur Verarbeitung analoger Signale, wie Ton oder Sprache, durch das Betriebssystem), 33'800-128'000 bps, DTE 480'000 bps.

Swissmod TWIN

ISDN + Modem

Mit den neuen Swissmod TWIN können Sie ihre bewährten Modemprogramme mit der Leistung und Geschwindigkeit von ISDN nutzen. Einfach aussen am PC anschliessen, ohne einen Eingriff im Rechner.



SWISSMOD

ISDN-Terminal Adapter mit Modemfunktionen, Telefonoption, ISDN 64'000/128'000bps, Data/Fax Modem V.34, 28'000bps over ISDN, AT-Modembefehle, Betriebssystem unabhängig

Bestellen Sie jetzt beim Fachhändler im Telecom-Shop oder direkt bei:

TELELINK



TELELINK AG

GEVVERBESTRASSE 11

CH-6330 CHAM

TEL. 041 748 10 80

FAX 041 748 10 81

<http://www.telelink.ch>

Compu Serve 100536, 2044