

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R S.2131-0
(09/2019)

Méthode de détermination des objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits numériques fictifs de référence par satellite utilisant le codage et la modulation adaptatifs

Série S
Service fixe par satellite



Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2020

© UIT 2020

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R S.2131-0

Méthode de détermination des objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits numériques fictifs de référence par satellite utilisant le codage et la modulation adaptatifs¹

(Questions UIT-R 275 et UIT-R 277-1/4)

(2019)

Champ d'application

L'emploi du codage et de la modulation adaptatifs (ACM) permet de maintenir une connexion par satellite malgré la dégradation due à la propagation, quoiqu'à des débits plus faibles. La présente Recommandation porte sur une méthode permettant de déterminer les objectifs de qualité de fonctionnement des systèmes de communication par satellite utilisant le codage et la modulation adaptatifs.

Mots clés

Codage et modulation adaptatifs; objectifs de qualité de fonctionnement; communications par satellite

Abréviations/Glossaire

η	efficacité spectrale en bit/s/Hz (<i>spectral efficiency in bit/s/Hz</i>)
ACM	codage et modulation adaptatifs (<i>adaptive coding and modulation</i>)
BBER	taux de blocs avec erreur résiduels (<i>background block error rate</i>)
BEP	probabilité d'erreur sur les bits (<i>bit error probability</i>)
C/N	rapport porteuse/bruit γ (<i>carrier-to-noise ratio γ</i>)
DVB	radiodiffusion vidéo numérique (<i>digital video broadcasting</i>)
DVB-S2	radiodiffusion vidéo numérique par satellite de deuxième génération (<i>second generation digital video broadcasting via satellite</i>)
DVB-S2X	extension de la radiodiffusion vidéo numérique par satellite de deuxième génération (<i>extension of second generation digital video broadcasting via satellite</i>)
EB	bloc avec erreur (<i>errored block</i>)
ES	seconde avec erreur (<i>errored second</i>)
E_s/N_0	rapport énergie par symbole/densité spectrale de bruit (<i>symbol energy to noise spectral density ratio</i>)
ETSI	Institut européen des normes de télécommunication (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>)
FER	taux d'erreurs sur les trames (<i>frame error rate</i>)
HRDP	conduit numérique fictif de référence (<i>hypothetical reference digital path</i>)
HRX	connexion fictive de référence (<i>hypothetical reference connection</i>)
MODCOD	modulation et codage (<i>modulation and coding</i>)

¹ D'autres méthodes d'évaluation de la qualité de fonctionnement nécessitent une analyse qualitative et quantitative pour déterminer si ces méthodes et leurs mesures sont efficaces.

MPEG	Groupe d'experts pour les images animées (<i>Moving Picture Experts Group</i>)
PER	taux d'erreurs sur les paquets (<i>packet error ratio</i>)
QEF	quasiment sans erreur (<i>quasi error free</i>)
SES	seconde avec beaucoup d'erreurs (<i>severely errored second</i>)
SNR	rapport signal/bruit (<i>signal to noise ratio</i>)
TDM	multiplexage par répartition dans le temps (<i>time division multiplex</i>)
TDMA	accès multiple par répartition dans le temps (<i>time division multiple access</i>)
TEB	taux d'erreurs sur les bits
ϕ_{total}	dégradation du débit en pourcent (<i>percent degraded throughput</i>)

Recommandations et Rapports UIT connexes

Recommandation UIT-R S.614-4	Taux d'erreur admissible dans un conduit numérique fictif de référence du service fixe par satellite fonctionnant en dessous de 15 GHz et faisant partie d'une communication internationale dans un réseau numérique à intégration de services
Recommandation UIT-R S.1061-1	Utilisation de stratégies et de techniques de protection contre les évanouissements dans le service fixe par satellite
Recommandation UIT-R S.1062-4	Caractéristiques d'erreur admissibles d'un conduit numérique fictif de référence de satellite fonctionnant au-dessous de 15 GHz
Recommandation UIT-T G.826	Paramètres et objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur de bout en bout pour les connexions et conduits numériques internationaux à débit constant
Recommandation UIT-R S.1878-0	Techniques de transmission multiporteuses pour les systèmes à satellites
Recommandation UIT-R S.2099-0	Caractéristiques d'erreur à court terme admissibles pour un conduit numérique fictif de référence par satellite
Rapport UIT-R S.2173-1	Techniques de transmission multiporteuses pour les systèmes à satellites

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'adoption du codage et de la modulation adaptatifs (ACM) ainsi que de la linéarisation des amplificateurs de puissance a permis d'améliorer l'efficacité des satellites et la qualité de fonctionnement des transmissions;
- b) que les systèmes à satellites employant des techniques ACM s'adapteront à la dégradation de leurs conditions de fonctionnement en réduisant le débit total et ne seront donc plus en mesure de fournir des services à débit constant;
- c) que la qualité de fonctionnement des liaisons par satellite doit être suffisante pour que les objectifs de qualité de bout en bout et les besoins des utilisateurs finals puissent être respectés;
- d) que pour définir les critères de qualité de fonctionnement en cas d'erreur, il faut tenir compte de toutes les sources d'erreur prévisibles, notamment les conditions de propagation variables dans le temps et les brouillages,

notant

- a) que les objectifs à long terme en matière de qualité de fonctionnement en cas d'erreur sont établis dans les Recommandations UIT-R S.614 et UIT-R S.1062;

b) que le court terme dans le domaine des communications par satellite et les objectifs à court terme en matière de qualité de fonctionnement ont été définis dans la Recommandation UIT-R S.2099;

c) que des informations relatives aux techniques de transmission et de commande de puissance adaptatives susceptibles d'être utilisées pour compenser l'affaiblissement variable dans le temps sont fournies dans les Recommandations UIT-R S.1061 et UIT-R S.1878, ainsi que dans le Rapport UIT-R S.2173;

d) que la détérioration des liaisons par satellite sont provoquées par une dégradation de la propagation qui peut être décrite par les modèles proposés dans les Recommandations UIT-R P.618-13 et UIT-R P.1623-1, et que ces Recommandations relatives à la propagation sont applicables jusqu'à 51,4 GHz,

recommande

1 que les systèmes à satellites employant des techniques ACM soient conçus de manière à répondre aux objectifs de qualité de fonctionnement définis en termes de taux d'erreurs sur les paquets (PER) ou d'efficacité spectrale (en bit/s/Hz) en fonction du rapport porteuse/bruit (C/N);

2 que les notes suivantes soient considérées comme faisant partie de la présente Recommandation.

NOTE 1 – Si l'on utilise le PER, il convient d'employer les valeurs indiquées dans le Tableau 3 du § 2.2 de l'Annexe.

NOTE 2 – Si l'on utilise des objectifs de qualité de fonctionnement définis en termes d'efficacité spectrale, il convient de considérer que celle-ci, mesurée à la valeur de fonctionnement γ en dB, n'est pas inférieure à $\eta(\gamma - 1,0)$, où γ est le rapport porteuse/bruit (C/N) en dB et $\eta(\gamma)$ est l'efficacité spectrale en bit/s/Hz établie en fonction de la valeur γ , qui est définie au § 2.3 de l'Annexe.

NOTE 3 – On a considéré que le système était capable de s'adapter à une baisse du rapport C/N de 1 dB pendant un intervalle de 1 seconde lorsqu'on change d'état de modulation et de codage (MODCOD). Cette baisse correspond à une réduction d'environ 10% de l'efficacité spectrale (en termes de débit ou de capacité) sur une liaison par satellite non linéaire. Cette baisse du rapport C/N peut être due à n'importe quelle source de bruit extérieur et aux évanouissements dus à la pluie.

NOTE 4 – Il convient de noter que la moyenne du débit dans le temps ne dit rien sur la qualité de fonctionnement d'une liaison pour un pourcentage de temps particulier au cours d'une année quelconque. La dégradation du débit pour des pourcentages de temps particuliers est donc une mesure potentielle qu'il sera peut-être nécessaire de prendre en compte dans l'évaluation générale de la qualité de fonctionnement d'une liaison employant des techniques ACM. Il faut aussi noter que la dégradation du débit pour certains pourcentages de temps est une valeur intermédiaire de la moyenne précitée, et qu'en outre toutes les études techniques portant sur la qualité de fonctionnement moyenne d'une liaison ACM contiennent les données pertinentes pour évaluer cet objectif de qualité de fonctionnement potentiel.

Annexe

Exemple de méthode de détermination des objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits numériques fictifs de référence par satellite utilisant le codage et la modulation adaptatifs

1 Considérations générales

Les Recommandations existantes concernant la qualité de fonctionnement et la disponibilité en cas d'erreur ont été élaborées pour tenir compte du fait que les liaisons par satellite pouvaient se détériorer du fait de la dégradation de la propagation, qui peut être décrite selon les modèles proposés dans les Recommandations UIT-R P.618-13 et UIT-R P.1623-1. Les analyses effectuées par la Commission d'études 3 ont montré que ces Recommandations relatives à la propagation étaient applicables jusqu'à 51,4 GHz, mais qu'il n'existait pas de Recommandation régissant les trajets obliques qui empruntent des fréquences supérieures à 52 GHz. Dès lors, les Recommandations actuelles concernant la qualité de fonctionnement et la disponibilité en cas d'erreur s'appliquent aux conduits numériques fictifs de référence (HRDP) jusqu'à 52 GHz.

La mise au point et l'adoption de techniques de codage et de modulation adaptatifs (ACM) et de linéarisation des amplificateurs de puissance par les fabricants et les opérateurs d'équipements destinés aux satellites ont permis d'améliorer l'efficacité des satellites et la qualité de fonctionnement des transmissions. L'emploi de techniques ACM permet de maintenir les conduits HRDP d'un satellite malgré la dégradation de la propagation, quoiqu'à des débits plus faibles. Le recours à ces techniques dans le cadre de systèmes de transmission par satellite est décrit dans le Rapport UIT-R S.2173 et au § 2 de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.2099.

1.1 Objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits HRDP à débit constant

La Recommandation UIT-R S.1062 fixe des objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits HRDP des satellites offrant des services à débit constant. Ces connexions étaient souvent employées dans le trafic par satellite au début des années 1990, avant la prolifération de la fibre optique et des câbles sous-marins. La Recommandation UIT-R S.1062 repose sur les exigences énoncées dans la Recommandation UIT-T G.826. Ces exigences sont définies en termes de blocs avec erreur, par opposition aux erreurs contenues dans des bits individuels. La Recommandation UIT-T G.826 définit les objectifs de qualité de fonctionnement en termes de taux de blocs avec erreur résiduels (BBER) et fixe des valeurs comprises entre 2×10^{-4} et 1×10^{-4} selon le débit du service jusqu'à 3,5 Gbit/s, le BBER n'étant mesuré que pendant le temps de disponibilité. Le Tableau 1 de la Recommandation UIT-T G.826 est partiellement reproduit ci-dessous (Tableau 1) à titre de référence.

TABLEAU 1

Caractéristiques d'erreur cibles (de bout en bout) définies dans la Recommandation UIT-T G.826 pour une HRX ou un HRP numérique international de 27 500 km

Débit	64 kbit/s	1,5 à 5 (Mbit/s)	> 5 à 15 (Mbit/s)	> 15 à 55 (Mbit/s)	> 55 à 160 (Mbit/s)	> 160 à 3 500 (Mbit/s)
Nombre de bits par bloc		800-5 000	2 000-8 000	4 000-20 000	6 000-20 000	15 000-30 000
ESR	0,04	0,04	0,05	0,075	0,16	
SESR	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
BBER		2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	10^{-4}

Dans les systèmes de transport de communications fonctionnant à un débit quelconque prévu par la Recommandation UIT-T G.826, au-dessus ou au-dessous du débit primaire et quelle que soit la distance réellement couverte, un bond par satellite du tronçon international se voit allouer 35% de l'ensemble des objectifs de bout en bout. Si une liaison par satellite couvre un tronçon national, elle se voit allouer 42% de l'ensemble des objectifs de bout en bout. Ainsi, un objectif de taux BBER de 2×10^{-4} est modifié pour devenir $2 \times 10^{-4} \times 0,35 = 0,7 \times 10^{-4}$ pour une connexion internationale, tandis qu'il est modifié pour devenir $2 \times 10^{-4} \times 0,42 = 0,84 \times 10^{-4}$ pour une connexion nationale. Si un satellite assure l'intégralité du conduit ou de la connexion de bout en bout, il convient d'appliquer les objectifs indiqués dans le Tableau 1.

La taille d'un bloc est également définie en fonction du débit du service. De ce point de vue, les objectifs de qualité de fonctionnement fixés dans la Recommandation UIT-R S.1062 ont été établis au regard du rapport BEP/α , où BEP est la probabilité d'erreur sur les bits et α est le nombre d'erreurs par salve. On trouvera ci-après un exemple d'objectifs de qualité de fonctionnement définis pour un système à satellites fonctionnant jusqu'à 155 Mbit/s.

TABLEAU 2

Objectifs de qualité de fonctionnement définis dans la Recommandation UIT-R S.1062

Pourcentage de temps total (mois le plus défavorable)	BEP/ α	Pour $\alpha = 10$ (BEP)
0,2	1×10^{-7}	1×10^{-6}
2	1×10^{-9}	1×10^{-8}
10	1×10^{-10}	1×10^{-9}

Il convient de souligner que ce type de connexions par satellite était destiné à des connexions permanentes à débit élevé qui offraient une liaison intercontinentale de grande capacité, essentiellement pour offrir des services de téléphonie ou pour assurer un échange de données à faible débit. Ces liaisons s'appuyaient le plus souvent sur de grandes stations terriennes fonctionnant dans les bandes 6/4 GHz, où les perturbations dues à la propagation sont très faibles.

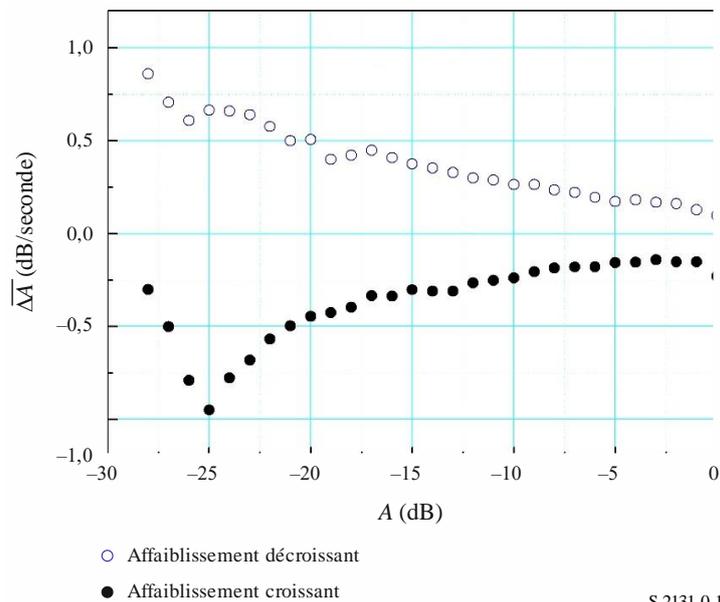
Actuellement, les connexions par satellite bidirectionnelles acheminent surtout le trafic de l'Internet. Elles sont généralement asymétriques et disposent d'une station centrale à débit élevé capable d'exploiter des techniques de multiplexage par répartition dans le temps (TDM) ou d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA). Les stations d'abonné émettent à un débit beaucoup plus bas que celui de la station centrale et ont un faible coefficient d'utilisation. Ce sont ces types de systèmes qui vont employer des liaisons à fréquence plus élevée; pour pouvoir le faire de manière efficace, ils vont employer des techniques ACM afin d'atteindre un débit fiable et une efficacité spectrale élevée. À des fréquences supérieures à 20 GHz, les perturbations dues à la propagation sont beaucoup plus importantes que dans les bandes 6/4 GHz.

1.2 Résultats expérimentaux des caractéristiques dynamiques des évanouissements dus à la pluie

On a observé que la pente d'évanouissement moyenne évaluée à partir d'un système à satellites dans la bande Ku était de 0,24 dB/s². La Figure 1 contient des statistiques de pente d'évanouissement mesurées sur un système de communication à satellites dans la bande Ka en République de Corée³. Dans cette figure, A est la profondeur de l'évanouissement dû à la pluie en dB et ΔA est la pente d'évanouissement en dB/s, $\overline{\Delta A}$ étant la moyenne de ΔA . Cette figure montre que la pente d'évanouissement moyenne est inférieure à 1 dB pour l'ensemble des gammes d'évanouissement.

Une étude expérimentale fondée sur l'emploi du banc d'essai DVB-S2 et de techniques ACM par une liaison satellite a permis de conclure (au § E.3 du document DVB A171-1⁴) que la pente d'évanouissement maximum dans la bande Ka, correspondant à des épisodes de forte pluie, ne dépasse normalement pas 0,5 dB/s. Dès lors, on considère qu'une durée de mise à jour de la boucle ACM de 1 s est réaliste. Les résultats expérimentaux illustrés ici concernent les systèmes fonctionnant dans la bande Ka. De plus, pour limiter le nombre de changements de modulation et de codage (MODCOD), et compte tenu de la taille de pas courante entre deux niveaux de MODCOD adjacents pour le banc d'essai DVB-S2, on a ajouté un décalage théorique de 0,3 s au plafond par rapport au seuil pour produire un effet d'hystérésis.

FIGURE 1
Pente d'évanouissement moyenne d'un système à satellites dans la bande Ka



² Sooyoung Kim Shin, Kwangjae Lim, Kwonhue Choi et Kunseok Kang, «Rain attenuation and Doppler shift compensation for satellite communications», *ETRI Journal*, Vol. 24, N° 1, février 2002, pp. 31-42.

³ Meixiang Zhang et Sooyoung Kim, «A Statistical Approach for Dynamic Rain Attenuation Model», 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2011) 28 novembre – 1er décembre 2011, Nara, Japon.

⁴ DVB Document A171-1. Digital Video Broadcasting (DVB), *Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1 (DVB-S2)*, mars 2015.

2 Paramètres de qualité de fonctionnement applicables

2.1 Nécessité d'établir de nouveaux objectifs de qualité de fonctionnement pour les conduits HRDP à débit variable

Les Recommandations existantes en matière de qualité de fonctionnement en cas d'erreur (comme par exemple la Recommandation UIT-R S.1062-4) visent les conduits HRDP à débit constant et ne sont donc pas applicables aux systèmes utilisant des techniques ACM. Ces techniques ont ceci de remarquable que le taux d'erreurs sur les blocs (BER) dans les différents modes de MODCOM diminue rapidement au regard du rapport C/N , où N est le bruit total sur la liaison, y compris le bruit et le brouillage thermiques. La différence de rapport C/N entre, disons, un BER fonctionnel de 1×10^{-8} et un BER très dégradé de 1×10^{-3} est d'environ 0,25 dB pour une état de MODCOM donné.

Beaucoup d'objectifs de qualité de fonctionnement concernant les systèmes à satellites sont définis par rapport à un taux d'erreurs sur les paquets (PER) dans le contexte d'émissions par paquets, et le comportement du PER se caractérise par une diminution presque aussi rapide que pour le taux BER. Ce comportement semble indiquer que la qualité de fonctionnement du satellite, en termes de PER dans le temps, n'est pas pertinente pour les systèmes à satellites employant des techniques ACM. En effet, ces systèmes vont s'adapter à la dégradation des conditions en réduisant le débit général; ce ne sont donc plus des systèmes à débit constant. Nous avons déjà examiné la notion de mesure de la qualité de fonctionnement des liaisons satellite employant des techniques ACM; ces mesures reposaient sur un débit moyen ou une dégradation du débit⁵. Le document indiqué en référence concerne des applications ACM capables de tolérer une baisse du débit d'informations. On peut employer la notion de dégradation du débit présentée dans cette Annexe pour évaluer la baisse du débit d'informations.

La probabilité que le PER d'un système à satellites employant des techniques ACM se dégrade jusqu'à un niveau inutilisable est extrêmement faible tant que le MODCOD employé dans ces techniques n'a pas épuisé les alternatives de codage dont il dispose. Il n'est donc plus nécessaire de définir à la fois un objectif de qualité de fonctionnement en cas d'erreur et une valeur de disponibilité pour spécifier la qualité de fonctionnement des conduits HRDP d'un satellite. Au demeurant, l'objectif pertinent en matière de qualité de fonctionnement est alors indépendant du débit du canal et peut être appliqué à n'importe quel débit «théorique» employé.

2.2 Taux d'erreurs sur les paquets

Dans la spécification de l'extension de la radiodiffusion vidéo numérique par satellite de deuxième génération (DVB-S2X), la condition quasiment sans erreur (QEF) est définie comme un taux d'erreurs sur les paquets (PER) de 10^{-7} avec une longueur de paquet de 188 octets correspondant à la longueur d'un paquet MPEG. Ce taux correspond aussi à un taux d'erreurs sur les trames (FER) de 10^{-5} avec une taille de trame de 16 200 ou 64 800 bits. Compte tenu du fait que la courbe du PER ou du FER présente une forte pente, les différences de rapport C/N entre un PER de 10^{-7} et de 10^{-5} ne dépassent généralement pas 0,1 dB quels que soient les états de MODCOD⁶.

⁵ Gerald Shewan, «*Alternative Measure of Performance for Satellite Links Employing Adaptive Coding and Modulation*», 30th AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC-2012), 24-27 septembre, 2012, Ottawa, Canada.

⁶ Pour de plus amples informations sur les spécifications du DVB-S2X, voir le document DVB A171-2. Digital Video Broadcasting (DVB), *Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2 – S2 Extensions (DVB-S2X)*, mars 2015.

Un modem DVB-S2 a été construit et une démonstration a été faite dans des conditions de changement d'état ACM avec un PER de 10^{-4} ⁷. En raison de la longueur du temps de propagation aller-retour (RTT), le modem DVB-S2 a été conçu pour changer d'état de MODCOD dans une condition QEF qui anticipe la forte pente du PER.

Si l'on effectue une transmission en utilisant des trames (ou des paquets), le paramètre BBER défini dans la Recommandation UIT-T G.826 peut être mappé vers le FER ou le PER car la taille du bloc définie dans le Tableau 1 peut être compatible avec la taille d'une trame ou d'un paquet.

Les objectifs de qualité de fonctionnement du système à satellites employant des techniques ACM peuvent alors être définis en modifiant les objectifs de qualité de fonctionnement figurant dans le Tableau 2 et en employant le PER de la manière indiquée dans le Tableau 3.

TABLEAU 3

**Objectifs de qualité de fonctionnement pour un système à satellites
employant des techniques ACM en fonction du PER**

Pourcentage du temps total	PER
0,04% de l'année	$< 10^{-4}$
0,6% de l'année	$< 10^{-5}$
4,0% de l'année	$< 10^{-7}$ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ On considère qu'une valeur de PER de 10^{-7} est équivalente à une valeur de FER de 10^{-4} et à un BBER de 10^{-4} dans le Tableau 1.

2.3 Efficacité spectrale en fonction du rapport C/N

La capacité des canaux représentée par la limite de Shannon-Hartley peut permettre d'établir l'efficacité spectrale en bit/s/Hz, et cette efficacité spectrale peut être présentée comme une fonction du rapport C/N . Elle peut alors être représentée de la manière suivante dans le cas de la limite de Shannon-Hartley, qui constitue la valeur la plus élevée réalisable.

$$\eta(\gamma) = \log_2(10^{\gamma/10} + 1) \quad (1)$$

où η est l'efficacité spectrale en bit/s/Hz et γ est le rapport C/N qui, dans ce cas, est équivalent à l'énergie du rapport énergie par symbole/densité spectrale de bruit (E_s/N_0) en dB.

Si un système emploie des techniques ACM avec plusieurs modes de MODCOD différents, on peut déduire $\eta(\gamma)$ et fixer les objectifs de qualité de fonctionnement de manière à préserver $\eta(\gamma)$ avec une certaine marge en envisageant des changements d'état ACM sur des intervalles d'environ 1 s.

Ainsi, l'un des objectifs de qualité de fonctionnement pourrait consister à définir que l'efficacité spectrale du système ne doit pas être inférieure à $\eta(\gamma - 1,0)$ pour une valeur donnée de γ en dB.

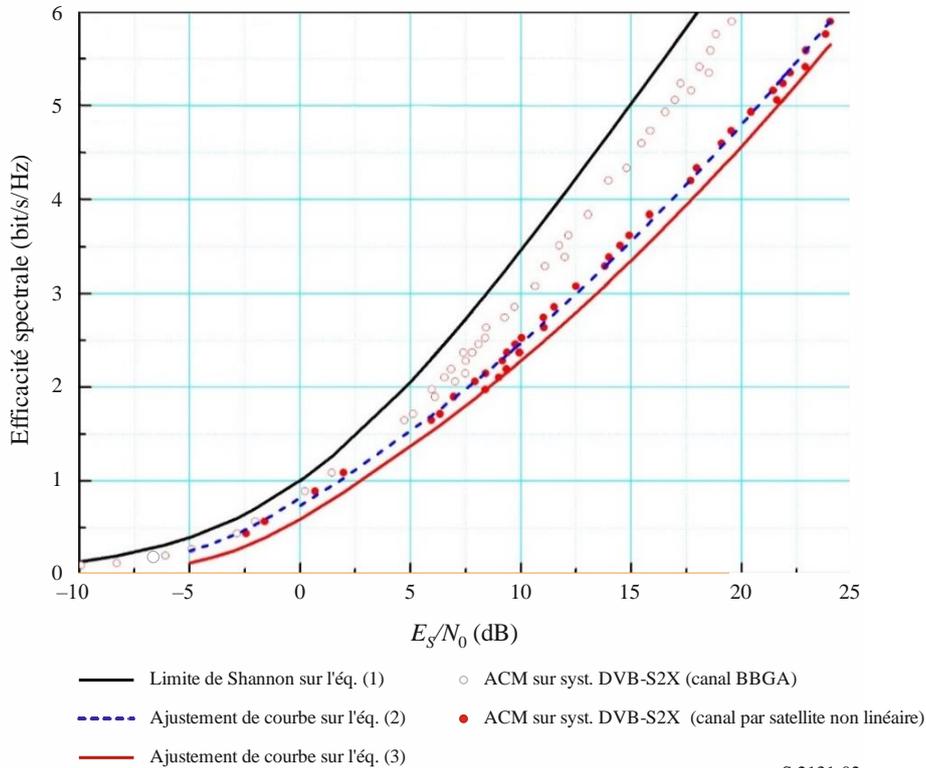
Pour illustrer la manière dont on peut utiliser l'efficacité spectrale afin de définir un objectif de qualité de fonctionnement, nous avons examiné les caractéristiques du système DVB-S2X⁸.

⁷ Joon-Gyu Ryu, Deock-Gil Oh, Hyun-Ho Kim et Sung-Yong Hong, «*Proposal of an Algorithm for an Efficient Forward Link Adaptive Coding and Modulation System for Satellite Communication*», Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 16, No. 2, avril 2016, pp. 80-86.

⁸ L'emploi des caractéristiques du système DVB-S2X ne doit pas être considéré comme une reconnaissance de ce système aux dépens d'une autre technique ACM. Ces caractéristiques ont été choisies parce qu'elles sont librement accessibles au public et que leur utilisation n'est pas soumise au régime de la propriété intellectuelle.

On trouvera à la Fig. 2 une comparaison de l'efficacité spectrale de systèmes DVB-S2X et DVB-S2 employant des techniques ACM et des MODCOD en-dessous de la limite de Shannon-Hartley.

FIGURE 2
Comparaisons de l'efficacité (la capacité) spectrale



S.2131-02

Si l'on ajuste l'efficacité spectrale du système DVB-S2X utilisant des techniques ACM sur un canal par satellite non linéaire en se servant de deux polynômes de second ordre pour connaître l'erreur minimum par la méthode des moindres carrés, on peut déduire les équations suivantes⁹:

$$\eta(\gamma) = 0,8181 + 0,1607\gamma + 0,0096\gamma^2 \text{ pour } -5 \leq \gamma < 0$$

$$\eta(\gamma) = 0,7375 + 0,1433\gamma + 0,003\gamma^2 \text{ pour } \gamma \geq 0$$

(2)

Pour obtenir un ajustement approximatif de la courbe sur sa partie inférieure, on a abaissé la constante 0,8181 dans la partie ($-5 \leq \gamma < 0$ dB) de la courbe d'un facteur allant d'environ 0,08 à 0,7375 de telle sorte que les parties supérieure et inférieure de la courbe s'alignent à la même valeur de γ pour $E_s/N_0 = 0$. Il convient aussi de noter que dans la Fig. 2, les points de la courbe du système DVB-S2X (canal BBGA) sur la partie inférieure gauche de la figure montrent que la différence d'efficacité spectrale entre le canal BBGA et le canal non linéaire diminue lorsque E_s/N_0 passe en-dessous de zéro. L'équation (2), dont le terme constant est modifié dans la partie inférieure de la courbe, peut être modifiée encore davantage pour tenir compte de la série de données correspondant à l'efficacité spectrale minimum de la manière suivante:

⁹ Nous avons utilisé le système DVB-S2X dans notre exemple du fait que cette norme est fréquemment employée et que ses caractéristiques sont dans le domaine public. Il est toutefois possible d'établir les mêmes déductions en utilisant n'importe quelle autre technique ACM.

$$\eta(\gamma) = 0,5933 + 0,1415\gamma + 0,0096\gamma^2, \text{ pour } -5 \leq \gamma < 0, \quad (3)$$

$$\eta(\gamma) = 0,5933 + 0,1388\gamma + 0,003\gamma^2, \text{ pour } \gamma \geq 0.$$

Cet objectif de qualité de fonctionnement prévoit une augmentation de 1 dB par rapport à la qualité de fonctionnement du système DVB-S2X pour pouvoir tenir compte des dégradations dans le canal dans un environnement opérationnel classique.

Dans cet exemple, il ressort clairement de la Fig. 2 que dans une liaison ACM sur un système DVB-S2X exploitant un canal par satellite non linéaire, une baisse de 1 dB de la valeur du rapport C/N entraîne une baisse d'environ 10% de l'efficacité spectrale réalisable. La même conclusion ne peut en revanche être obtenue lorsqu'on emploie des MODCOD différents de ceux du système DVB-S2X. La baisse d'efficacité réelle dépend de la valeur théorique du rapport C/N avant la dégradation.

Le système présenté en exemple a permis de s'adapter à une réduction du rapport C/N de 1 dB pendant un intervalle de 1 seconde lorsqu'on changeait d'état ACM. Cette dégradation du rapport C/N peut être due à toutes les sources de bruit extérieur ainsi qu'aux évanouissements dus à la pluie.

La Figure 2 et les conclusions qui en découlent illustrent le fonctionnement de systèmes dans lesquels les techniques ACM mises en œuvre sont conformes à la norme DVB-S2X; toutefois, cette méthode peut aussi être appliquée à des liaisons par satellite employant d'autres types de techniques ACM.

2.4 Dégradation du débit

L'emploi de techniques ACM dans un système à satellites permet de maintenir une connexion par satellite malgré la dégradation de la propagation, quoiqu'à des débits plus faibles. La dégradation du débit observée à la sortie d'un conduit HRDP du satellite employant les techniques ACM peut être mise en correspondance avec l'efficacité spectrale si l'on forme l'hypothèse raisonnable que le débit varie directement en fonction de cette efficacité. Sur la base de cette hypothèse, on peut calculer le débit comme une fonction du rapport C/N , celui-ci variant selon les conditions de propagation et de brouillage.

On trouvera ci-après un exemple d'emploi d'un système DVB-S2X dans une liaison par satellite au sud de la Floride (États-Unis d'Amérique) qui ne souffre que d'évanouissements. Si l'on applique la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.618, on peut obtenir des valeurs de C/N supérieures pendant un certain temps à celles d'une année moyenne. À titre d'illustration, la Fig. 3 indique les valeurs relevées sur une liaison par satellite fonctionnant dans la bande 38,5 GHz dans une zone dont le climat est semblable à celui du sud de la Floride. Pour la fréquence et l'emplacement considérés par hypothèse afin de calculer la courbe de la Fig. 4, et en prenant une marge de 1 dB pour tenir compte de tous les brouillages possibles, l'affaiblissement calculé rend le système indisponible à 0,4%, soit une disponibilité de 99,6%. La plage dynamique de la liaison précitée est de 30 dB.

Le pourcentage de temps pendant lequel une liaison n'est exposée qu'aux évanouissements dus à la propagation et passe en-dessous du seuil d'efficacité spectrale dépend des facteurs suivants:

- 1) le climat à l'emplacement de la station terrienne de réception; et
- 2) la forme d'onde (par exemple DVB-S2X, DVB-S2, etc.) et plus précisément le codage le plus élevé (le MODCOD le plus robuste) disponible pour cette forme d'onde.

Par ailleurs, il convient de noter que la plage dynamique dépend de la conception du système et qu'elle est limitée par les effets de la propagation. Il peut donc arriver qu'elle ne permette pas de prendre en compte l'ensemble de la plage dynamique théorique de la forme d'onde employée.

Pour des raisons opérationnelles, on peut parvenir à un point où la forme d'onde est encore fonctionnelle mais la liaison est jugée indisponible. Dans ce cas, la plage dynamique pourrait être

inférieure à la capacité de la forme d'onde. On peut compenser cette insuffisance de la plage dynamique en augmentant la marge de la liaison.

Tant qu'une liaison par satellite utilisant des techniques ACM peut maintenir une connexion avec un débit réduit, on peut calculer la perte de débit réalisable en l'exprimant sous forme de fraction du débit maximum pour un pourcentage de temps donné, de la manière suivante:

$$\varphi(T\%) = 1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{max}} \quad (4)$$

où η_{max} désigne l'efficacité spectrale maximum réalisable, $T\%$ représente le pourcentage de temps, $\gamma(T\%)$ est le rapport C/N réalisable pendant une durée $\geq T\%$ et $\varphi(T\%)$ est la dégradation du débit réalisable.

On peut alors calculer la perte de débit moyenne (φ_{total}) en intégrant de façon numérique l'efficacité spectrale pendant la période au cours de laquelle la connexion est disponible, de la manière suivante:

$$\varphi_{total} = \int \left(1 - \frac{\eta(\gamma(T\%))}{\eta_{max}} \right) dT\% \approx \sum \varphi(T\%) \Delta T\% . \quad (5)$$

On peut trouver l'efficacité spectrale η correspondant à un pourcentage de temps précis en insérant le rapport C/N , c'est-à-dire la valeur de γ , dans l'équation (3). Le Tableau 4 présente un exemple de calcul de la qualité de fonctionnement des liaisons employant des techniques ACM; cette qualité a été calculée en établissant la perte moyenne de débit φ_{total} pour le système à satellites, comme l'illustre la Fig. 4, selon la fonction de distribution cumulative pour le débit réaliste $\varphi(T\%)$. Dans cet exemple, $\eta_{max} = \eta(24)$ est d'environ 5,653. La Figure 4 présente un tracé de l'efficacité spectrale $\eta(\gamma(T\%))$ et la dégradation du débit réaliste $\varphi(T\%)$ qui en découle. Dans l'exemple, la perte moyenne de débit φ_{total} estimée au moyen de l'équation (5) est d'environ 4,678% lorsque la plage dynamique est d'environ 30 dB.

TABLEAU 4

Exemple d'estimation de la dégradation de débit

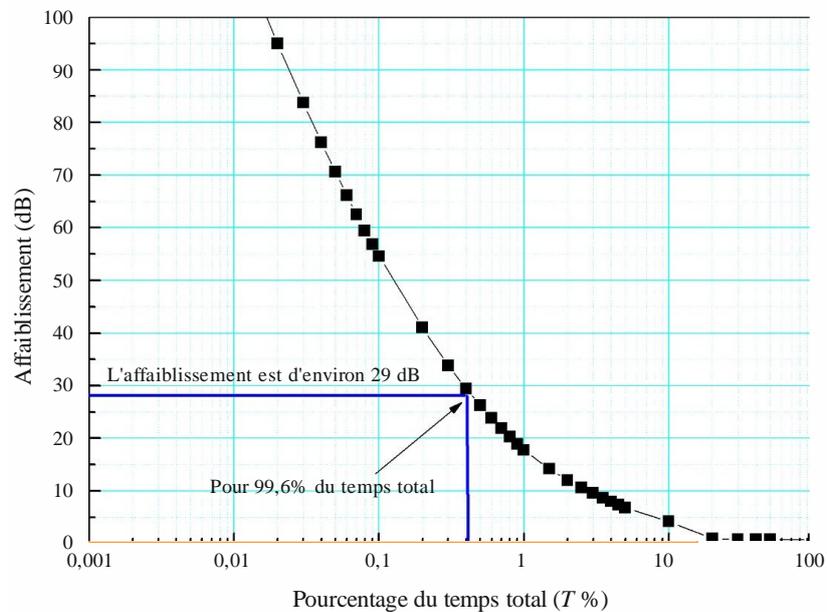
$T\%$	Affaiblissement total (dB)	$C/N, \gamma(T\%)$ (dB)	$\eta(\gamma(T\%))$	$\varphi(T\%)$	$\Delta T\%$	$\varphi(T\%) \Delta T\%$
0,4	29,413	-4,69	0,141	$0,975 = 1 - (0,141/5,653)$	0,1	$0,098 = 0,975 \times 0,1$
0,5	26,277	-1,550	0,397	0,930	0,1	$0,093 = 0,93 \times 0,1$
0,6	23,842	0,885	0,719	0,873	0,1	0,087
0,7	21,893	2,834	1,011	0,821	0,1	0,082
0,8	20,285	4,443	1,269	0,775	0,1	0,078
0,9	18,925	5,803	1,500	0,735	0,1	0,073
1	17,754	6,974	1,707	0,698	0,5	0,349
1,5	14,187	10,540	2,390	0,577	0,5	0,289
2	12,009	12,718	2,844	0,497	0,5	0,248
2,5	10,634	14,093	3,145	0,444	0,5	0,222
3	9,617	15,111	3,376	0,403	0,5	0,201
3,5	8,716	16,011	3,585	0,366	0,5	0,183

TABLEAU 4 (fin)

$T_{\%}$	Affaiblissement total (dB)	$C/N, \gamma$ ($T_{\%}$) (dB)	$\eta(\gamma(T_{\%}))$	$\varphi(T_{\%})$	$\Delta T_{\%}$	$\varphi(T_{\%}) \Delta T_{\%}$
4	7,983	16,744	3,759	0,335	0,5	0,168
4,5	7,371	17,357	3,906	0,309	0,5	0,154
5	6,849	17,879	4,034	0,286	0,6	0,172
5,6	6,186	18,54	4,198	0,257	1	0,257
6,6	5,524	19,20	4,365	0,228	1,4	0,319
8	4,861	19,87	4,535	0,198	2	0,395
10	4,199	20,529	4,707	0,167	2,2	0,368
12,2	3,392	21,34	4,920	0,130	2,3	0,298
14,5	2,585	22,14	5,137	0,091	2,5	0,228
17	1,778	22,95	5,359	0,052	3	0,156
20	0,972	23,756	5,584	0,012	10	0,122
30	0,778	23,950	5,638	0,003	10	0,025
40	0,753	23,975	5,645	0,001	10	0,013
50	0,727	24,000	5,653	0,000	50	0,000
100	0,727	24,000	5,653	0,000	0	0,000
φ_{total}						4,678

FIGURE 3

Affaiblissement dû à la perte de propagation selon la Recommandation UIT-R P.618 pour une connexion par satellite utilisant des techniques ACM et fonctionnant dans une zone dont le climat est semblable à celui du sud de la Floride (États-Unis d'Amérique)



S.2131-03

Si l'on considère que la connexion par satellite subit un affaiblissement en fonction du temps total comme l'illustre la Fig. 4, la moyenne de la perte de débit qui peut être attendue est de 4,678% du débit total possible.

$$\text{Débit} = \text{Débit du canal} \times \text{Temps} \tag{6}$$

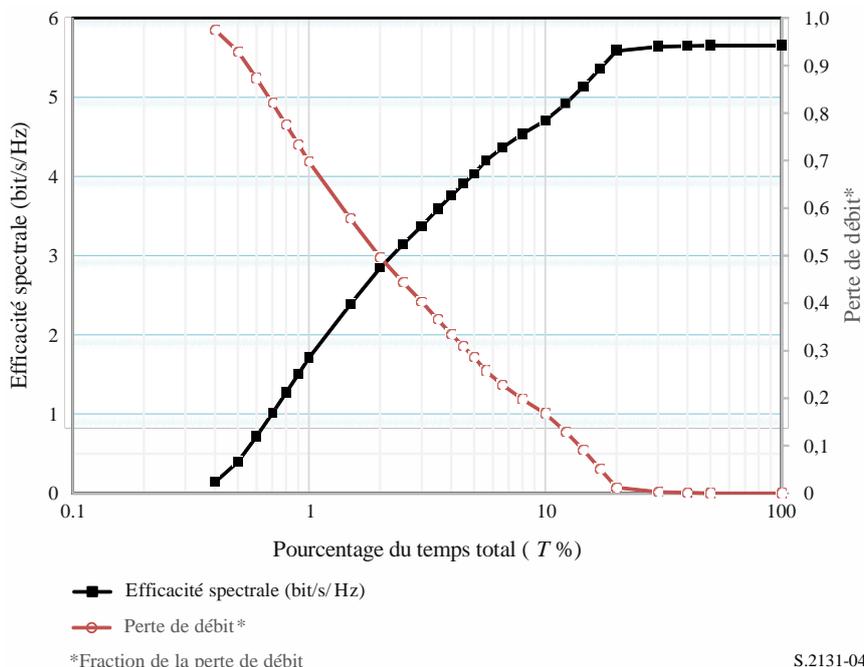
$$\text{Perte de débit} = \text{Débit maximum disponible} - \text{Débit fourni} \tag{7}$$

$$\text{Dégradation du débit en pourcent} = (\text{Perte de débit} / \text{Débit maximum disponible}) \times 100 \tag{8}$$

On trouvera dans la Pièce jointe à l'Annexe un exemple de dégradation du débit en pourcent.

FIGURE 4

Efficacité spectrale et perte de débit* pour une connexion par satellite utilisant des techniques ACM et fonctionnant dans une zone dont le climat est semblable à celui du sud de la Floride (États-Unis d'Amérique)



Pièce jointe à l'Annexe

Exemple de calcul de dégradation du débit en pourcent

Prenons pour hypothèse que le meilleur MODCOD réaliste soit le mode 16APSK 77/90. Considérons en outre que la rapidité de modulation dans la voie est de 34 mégabauds par seconde. La combinaison de ces deux hypothèses donne un débit binaire de 116,36 Mbit/s. Considérons aussi que la connexion emploie des paquets de 188 octets.

Le calcul du débit maximum disponible (MAT_{put}), du débit fourni (DT_{put}), de la perte de débit (LT_{put}) et de la dégradation du débit en pourcent ($\%DT_{put}$) est indiqué ci-dessous:

$$MAT_{put} = \text{Débit maximum du canal (bit/s)} \times \text{Temps (s)} \tag{9}$$

$$DT_{put} = \sum \text{Débits du canal } (C/N)_i \text{ (bit/s)} \times \text{Temps (s)} \tag{10}$$

$$LT_{put} = MAT_{put} - DT_{put} \tag{11}$$

$$\%DT_{put} = (LT_{put}/MAT_{put}) \times 100 \quad (12)$$

Pour les valeurs prises par hypothèse:

$$MAT_{put} = 116,36 \text{ Mbit/s} \times 31557600 \text{ s/an} = 3,67 \times 10^{15} \text{ bits ou } 2,44 \times 10^{12} \text{ paquets par an.}$$

Si l'on emploie les données du Tableau 5, et en considérant que le débit du canal varie de la même manière que l'efficacité spectrale, la valeur de LT_{put} est $1,14 \times 10^{11}$ paquets et la valeur de $\%DT_{put}$ est 4,678%.

TABLEAU 5

Dégradation du débit en pourcent pour 34 mégabauds par seconde avec le mode 16APSK 77/90, des paquets de 188 octets, un débit de 116,36 Mbit/s et un débit maximum disponible de $2,44 \times 10^{12}$ paquets/an

% du temps	Affaiblissement total	C/N, γ ($T_{\%}$) (dB)	$\eta(\gamma(T_{\%}))$	ΔT %	$\%DT_{puts}$ $\varphi(T_{\%})$	Perte de débit
0,4	29,413	-4,69	0,141	0,1	$0,975 = 1 - (0,141/5,653)$	2379113244,94
0,5	26,277	-1,550	0,397	0,1	0,930	2268593048,04
0,6	23,842	0,885	0,719	0,1	0,873	2129821586,02
0,7	21,893	2,834	1,011	0,1	0,821	2003692375,24
0,8	20,285	4,443	1,269	0,1	0,775	1892136410,30
0,9	18,925	5,803	1,500	0,1	0,735	1792605325,58
1	17,754	6,974	1,707	0,51	0,698	8515408574,43
1,5	14,187	10,540	2,390	0,5	0,577	7042604485,82
2	12,009	12,718	2,844	0,5	0,497	6061899097,19
2,5	10,634	14,093	3,145	0,5	0,444	5411456009,74
3	9,617	15,111	3,376	0,5	0,403	4914264989,65
3,5	8,716	16,011	3,585	0,5	0,366	4462867228,40
4	7,983	16,744	3,759	0,5	0,335	4087795603,11
4,5	7,371	17,357	3,906	0,5	0,309	3769153208,08
5	6,849	17,879	4,034	0,6	0,286	4192406755,67
5,6	6,186	18,54	4,198	1	0,257	6277955694,24
6,6	5,524	19,20	4,365	1,4	0,228	7780079269,90
8	4,861	19,87	4,535	2	0,198	9650151891,10
10	4,199	20,529	4,707	2,2	0,167	8979487209,87
12,2	3,392	21,34	4,920	2,3	0,130	7269900943,64
14,5	2,585	22,14	5,137	2,5	0,091	5558025750,48
17	1,778	22,95	5,359	3	0,052	3806209512,79
20	0,972	23,756	5,584	10	0,012	2974051094,53
30	0,778	23,950	5,638	10	0,003	615903898,01
40	0,753	23,975	5,645	10	0,001	308034447,18

TABLEAU 5 (*fin*)

% du temps	Affaiblissement total	$C/N, \gamma$ ($T_{\%}$) (dB)	$\eta(\gamma(T_{\%}))$	ΔT %	$\%DT_{put},$ $\varphi(T_{\%})$	Perte de débit
50	0,727	24,000	5,653	50	0,000	0,00
100	0,727	24	5,653	0	0,000	0,00
						114143617653,95
			Φ_{total}			4,678