

RECOMMANDATION UIT-R S.1062-4

Caractéristiques d'erreur admissibles d'un conduit numérique fictif de référence par satellite fonctionnant au-dessous de 15 GHz

(Question UIT-R 75-3/4)

(1994-1995-1999-2005-2007)

Domaine de compétence

Le SFS joue un rôle important dans la fourniture de communications numériques internationales fiables. Du fait de l'intégration avec les systèmes de Terre, une liaison par satellite devrait être conçue de façon à répondre aux spécifications qui sont compatibles avec ces systèmes. La Recommandation UIT-T G.826 spécifie les objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour un bond par satellite dans la portion internationale d'un conduit numérique fictif de référence (CNFR). Pour répondre à ces objectifs, la présente Recommandation donne des lignes directrices sur les gabarits nominaux en termes de probabilité d'erreur binaire (PEB) ou de TEB, qui satisfont entièrement aux spécifications de la Recommandation UIT-T G.826.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les satellites du service fixe par satellite jouent un rôle important dans la fourniture de communications numériques internationales fiables;
- b) que la qualité de fonctionnement des liaisons par satellite doit être suffisante pour permettre que soient respectés les objectifs de qualité de bout en bout et les objectifs de qualité de service pour l'utilisateur final;
- c) que la qualité de fonctionnement des liaisons par satellite ne dépend pas, en règle générale, de la distance;
- d) que la Recommandation UIT-R S.614 spécifie, pour les liaisons par satellite, des objectifs de qualité de fonctionnement conformes aux objectifs de la Recommandation UIT-T G.821;
- e) que les caractéristiques d'erreur propres à des conduits numériques fictifs de référence (CNFR) et à des connexions fictives de référence (HRX, *hypothetical reference connection*) ont été spécifiées dans la Recommandation UIT-T G.826;
- f) que, pour définir les critères de caractéristiques d'erreur, il faut tenir compte de toutes les sources d'erreur prévisibles, notamment les conditions de propagation variables et les brouillages,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R S.1429 – Objectifs de qualité de fonctionnement en termes d'erreurs dans des conditions de brouillage entre réseaux des systèmes OSG et non OSG du SFS pour des conduits numériques fictifs de référence fonctionnant à un débit égal ou supérieur au débit primaire et assurés par des systèmes utilisant des fréquences inférieures à 15 GHz, spécifie la qualité de fonctionnement en termes d'erreurs admissibles due au brouillage entre différents systèmes à satellites et que la Recommandation UIT-R S.1323 – Niveaux maximaux admissibles de brouillage dans un réseau à satellite (OSG du SFS; non OSG du SFS; liaisons de connexion non OSG du SMS) occasionnés dans le service fixe par satellite par d'autres réseaux du SFS exploités

dans le même sens de transmission, au-dessous de 30 GHz, spécifie la façon de calculer des marges de fonctionnement tenant compte des évanouissements et du brouillage,

recommande

1 que les futures liaisons par satellite et, chaque fois que cela est possible, les liaisons par satellite existantes du SFS soient conçues, au minimum, pour répondre aux spécifications relatives à un bond par satellite dans la portion internationale indiquées dans la Recommandation UIT-T G.826. Un exemple de jeu de gabarits de conception dérivés des paramètres de la Recommandation UIT-T G.826 est présenté dans la Note 1;

2 que la méthodologie décrite dans l'Annexe 1 soit utilisée pour générer les gabarits de performance en terme de PEB (voir la Note 4) spécifiés dans la Note 1. La même méthodologie peut être utilisée au débit de 155 Mbit/s pour dériver le gabarit de la Note 2;

3 que les Notes suivantes soient considérées comme faisant partie de la Recommandation:

NOTE 1 – Afin de respecter toutes les exigences de la Recommandation UIT-T G.826, la valeur de PEB/α , PEB divisée par le nombre moyen α d'erreurs par salve (voir le § 3 de l'Annexe 1), à la sortie (c'est-à-dire à l'une ou l'autre extrémité d'une connexion bidirectionnelle) d'un CNFR par satellite faisant partie d'une portion internationale d'une connexion ou d'un trajet, ne devrait pas dépasser pendant le temps total (y compris durant le mois le plus défavorable) les gabarits de conception correspondant aux valeurs données dans le Tableau 1 et définis dans les gabarits de PEB de la Fig. 4.

NOTE 2 – Bien que la Note 1 respecte toutes les exigences de la Recommandation UIT-T G.826, un gabarit plus sévère peut être souhaitable ou nécessaire pour certains services.

TABLEAU 1

Débit (Mbit/s)	Pourcentage de temps total (mois le plus défavorable)	BEP/ α
0,064	0,2	$1,0 \times 10^{-4}$
	10,0	$1,0 \times 10^{-8}$
1,5	0,2	7×10^{-7}
	2,0	3×10^{-8}
	10,0	5×10^{-9}
2,0	0,2	7×10^{-6}
	2,0	2×10^{-8}
	10,0	2×10^{-9}
6,0	0,2	8×10^{-7}
	2,0	1×10^{-8}
	10,0	1×10^{-9}
51,0	0,2	4×10^{-7}
	2,0	2×10^{-9}
	10,0	2×10^{-10}
155	0,2	1×10^{-7}
	2,0	1×10^{-9}
	10,0	1×10^{-10}

Dans ce cas, la PEB à la sortie (c'est-à-dire à l'une ou l'autre extrémité d'une connexion bidirectionnelle) d'un CNFR par satellite, fonctionnant à un débit jusqu'à 155 Mbit/s, ne devrait pas dépasser pendant le temps total (mois le plus défavorable) les gabarits de conception définis par les valeurs données dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

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}

NOTE 3 – Les spécifications du CNFR visé dans la présente Recommandation sont données dans la Recommandation UIT-R S.521.

NOTE 4 – Les taux de PEB indiqués aux Notes 1 et 2 peuvent être estimés par des mesures de TEB sur une période de temps suffisamment longue. Une méthode de mesure des TEB en fonction d'un pourcentage de temps est proposée dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.614.

NOTE 5 – Pour faciliter l'application de la présente Recommandation, les valeurs correspondant aux objectifs indiqués dans les Notes 1 et 2 sont exprimées en termes de temps total et représentent les limites d'un modèle de qualité de fonctionnement en termes de PEB basé sur la méthode décrite à l'Annexe 1. Pour atteindre les objectifs donnés dans les Notes 1 et 2, les erreurs apparaissant pendant les périodes d'indisponibilité ont été exclues des valeurs de ces objectifs. Le lien entre le temps total et le temps de disponibilité est expliqué dans la Note 7. Les objectifs en matière de PEB indiqués dans la Note 1 ne sont pas les seuls qui permettent de satisfaire les exigences de la Recommandation UIT-T G.826. Le concepteur peut utiliser d'autres gabarits de PEB dans la mesure où ces gabarits sont conformes à la Recommandation UIT-T G.826.

NOTE 6 – La présente Recommandation s'appliquera avant tout à des systèmes à satellites fonctionnant au-dessous de 15 GHz. L'application des exigences de qualité de fonctionnement indiquées dans la présente Recommandation à des systèmes fonctionnant à des fréquences plus élevées fait l'objet d'un complément d'étude.

NOTE 7 – L'état d'indisponibilité commence après une période de 10 s comportant un très grand nombre d'erreurs consécutives. Ces 10 secondes sont considérées comme faisant partie du temps d'indisponibilité. Une nouvelle période de disponibilité commence après une période de 10 s ne comportant pas un très grand nombre d'erreurs consécutives. Ces 10 secondes sont considérées comme faisant partie du temps de disponibilité. Les valeurs des seuils d'indisponibilité pour les PEB peuvent être déterminées pour un état d'indisponibilité atteint avec une probabilité de 0,5, comme on l'illustre sur la Fig. 3.

NOTE 8 – Les objectifs indiqués dans les Notes 1 et 2 sont exprimés en pourcentages du mois le plus défavorable. Ces pourcentages mensuels correspondent aux pourcentages annuels suivants:

- 10% du mois le plus défavorable 4,0% de l'année;
- 2% du mois le plus défavorable 0,6% de l'année;
- 0,2% du mois le plus défavorable 0,04% de l'année.

NOTE 9 – On peut avoir intérêt, pour respecter les Notes 1 et 2 à des fréquences supérieures à 10 GHz, à recourir à divers mécanismes de compensation des évanouissements, tels que le codage adaptatif avec correction d'erreur directe (CED), la régulation de la puissance ou la diversité

d'emplacement. On trouvera dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.522 des précisions sur le fonctionnement en diversité d'emplacement.

NOTE 10 – La méthode préférée de vérification de la qualité de fonctionnement des liaisons numériques par satellite repose sur des mesures en service, mesures utilisant les mécanismes de détection d'erreurs sur les blocs, qui sont liés à la taille des blocs et à la structure du système de transmission. La CED, l'embrouillage et le codage différentiel ont une incidence sur l'interprétation des mesures (voir le § 3 de l'Annexe 1).

NOTE 11 – Les caractéristiques d'erreur décrites dans les Notes 1 et 2 ont été établies à partir d'un CNFR faisant partie du tronçon international de la liaison (par exemple, de centre de tête de ligne international commuté à centre de tête de ligne international commuté). Il existe d'autres applications du CNFR à l'intérieur de la connexion (par exemple, de bureau à bureau) et les objectifs de taux d'erreur peuvent être adaptés en conséquence.

NOTE 12 – Les méthodes décrites dans la présente Recommandation peuvent s'appliquer aux liaisons par satellite de réseaux privés. Les objectifs de qualité de fonctionnement feront généralement l'objet d'un accord entre l'opérateur de réseau et l'utilisateur via un accord de niveau de service (SLA, *service level agreement*), comme on le spécifie dans la Recommandation UIT-T E.800.

NOTE 13 – Les objectifs de qualité de fonctionnement doivent être atteints pour le débit de transmission requis et pas nécessairement pour n'importe quelle valeur supérieure de débit utilisée pour la prise en charge du multiplexage ou de la correction d'erreurs. Par exemple, si le débit de transmission sur une liaison par satellite est de 6 Mbit/s et si le débit de transmission prévu par contrat dans l'accord SLA est de 2 Mbit/s, ce sont les objectifs associés à la transmission à 2 Mbit/s qui devront être pris en compte.

Annexe 1

1 Généralités relatives à la Recommandation UIT-T G.826: historique, définitions, paramètres et objectifs

Les spécifications de la Recommandation UIT-T G.826 sont exprimées en termes de blocs erronés et non en termes d'erreurs binaires individuelles.

L'objet de la présente spécification est de vérifier la conformité aux exigences de qualité de fonctionnement de la Recommandation UIT-T G.826 pendant le service. Le fait que la qualité de fonctionnement soit définie en termes d'erreurs sur les blocs et non d'erreurs binaires a des conséquences importantes pour des systèmes dans lesquels les erreurs ont tendance à se produire en groupes, comme c'est le cas pour des systèmes utilisant l'embrouillage et la CED. Le bloc utilisé dans la Recommandation UIT-T G.826 est le groupe de bits contigus qui normalement constitue le bloc ou la trame de contrôle propre au système de transmission utilisé.

Dans la 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, deux types de système de transport sont étudiés en détail et cette étude peut être élargie à d'autres types de système si nécessaire. Ces deux types sont les suivants:

- la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH, *plesiochronous digital hierarchy*), pour des débits compris entre 64 kbit/s et le débit primaire; et
- la hiérarchie numérique synchrone (SDH, *synchronous digital hierarchy*), pour des débits compris entre le débit primaire et 3 500 Mbit/s.

Des débits sous-primaires ont été ajoutés en 2002 pour faciliter la mise en place de systèmes à ces débits. Toutefois, pour maintenir la stabilité de fonctionnement du très large parc de systèmes PDH, il a été décidé de ne pas modifier la Recommandation UIT-T G.821 en vigueur depuis longtemps qui s'applique à ces systèmes.

Suivant la terminologie SDH, un circuit de bout à bout est appelé CONDUIT.

Suivant la terminologie PDH, un circuit de bout à bout est appelé CONNEXION.

La qualité de fonctionnement d'un système de transport est spécifiée en termes de paramètres appelés secondes erronées (ES, *errored second*) et secondes gravement erronées (SES, *severely errored second*), tant pour la hiérarchie PDH que pour la hiérarchie SDH, cette dernière étant en outre définie par un paramètre supplémentaire appelé erreurs sur les blocs qui permet d'accroître la finesse d'analyse aux débits de transmission élevés. La durée de ces blocs est bien inférieure à la seconde.

Un bloc SDH, dont la taille dépend du débit de transmission, est un ensemble de bits consécutifs qui peuvent ne pas être contigus s'il se trouve par exemple que le bloc chevauche une limite de conteneur.

1.1 Définitions tirées de la Recommandation UIT-T G.826

1.1.1 Événements relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les conduits

Les événements de base sont définis comme suit:

- *Bloc erroné (EB)*
Bloc dont un ou plusieurs bits sont erronés.
- *Seconde erronée (ES)*
Période de 1 s qui contient un ou plusieurs blocs erronés.
- *Seconde gravement erronée (SES)*
Période de 1 s comportant au moins 30% de blocs erronés ou au moins un défaut (voir la Recommandation UIT-T G.826 pour la définition des défauts).
Il convient de noter que les SES forment un sous-ensemble de l'ensemble des ES.
- *Erreur résiduelle de bloc (BBE, background block error)*
EB survenant en dehors d'une SES.

1.1.2 Événements relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les connexions

- *Seconde erronée (ES)*
période de 1 s dans laquelle un ou plusieurs bits sont erronés ou pendant laquelle une perte du signal ou un signal d'indication d'alarme est détecté.
- *Seconde gravement erronée (SES)*
période de 1 s comportant un taux d'erreur sur les bits supérieur ou égal à 1×10^{-3} .

1.2 Définition des paramètres

Les caractéristiques d'erreur ne doivent être évaluées que lorsque le conduit ou la connexion est en état de disponibilité, voir la Note 7 et l'Annexe A de la Recommandation UIT-T G.826 pour la définition des critères d'entrée/sortie de l'état d'indisponibilité:

- *Taux de secondes erronées (ESR, errored second ratio)*
Proportion de ES par rapport au nombre total de secondes du temps de disponibilité pendant un intervalle de mesure déterminé.
- *Taux de secondes gravement erronées (SESR)*
Proportion de SES par rapport au nombre total de secondes du temps de disponibilité pendant un intervalle de mesure déterminé.
- *Taux de bloc erroné résiduel (BBER, background block error ratio)*
Proportion de EB par rapport au nombre total de blocs pendant un intervalle de mesure déterminé, exception faite de tous les blocs apparaissant pendant des SES ou pendant le temps d'indisponibilité.

1.3 Blocs de contrôle

Le Tableau 3 indique la taille des blocs et le nombre de blocs par seconde pour différents débits de transmission.

TABLEAU 3
**Relation entre le débit binaire, la taille des blocs
et le nombre de blocs par seconde**

Débit binaire (Mbit/s)	Taille des blocs (bits)	Nombre de blocs par seconde
1,544	4 632	333
2,048	2 048	1 000
6,312	3 156	2 000
44,736	4 760	9 398
51,84	6 480	8 000
155,52	19 440	8 000

1.4 Objectifs de qualité de fonctionnement

Les objectifs de bout en bout définis dans la Recommandation UIT-T G.826 sont reproduits dans le Tableau 4 pour plus de commodité. Les objectifs dépendent du débit binaire du système de transmission. Des fourchettes sont également données pour les dimensions des blocs pris en charge à ces débits binaires. Comme cela a été dit plus haut, la taille des blocs sera celle qui est associée à la structure de trame du système de transmission. Ces objectifs sont spécifiés pour le temps de disponibilité.

TABLEAU 4

Caractéristiques d'erreur cibles (de bout en bout) pour un conduit CNFR ou une connexion HRX numérique internationale de 27 500 km (source: Recommandation UIT-T G.826)

Débit (Mbit/s)	64 kbit/s au débit primaire ⁽¹⁾	1,5 à 5	> 5 à 15	> 15 à 55	> 55 à 160	> 160 à 3500
Nombre de bits par bloc	Non applicable	800-5 000	2 000-8 000	4 000-20 000	6 000-20 000	15 000-30 000 ⁽²⁾
ESR	0,04	0,04	0,05	0,075	0,16	⁽³⁾
SESR	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
BBER	Non applicable	$2 \times 10^{-4(4)}$	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	10^{-4}

⁽¹⁾ Il n'est pas nécessaire d'appliquer ces objectifs aux équipements conçus avant 2003. Les objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour ces équipements sont indiqués dans la Recommandation UIT-T G.821.

⁽²⁾ Tel qu'actuellement défini, le conduit VC-4-4c (voir la Recommandation UIT-T G.707) est un conduit à 601 Mbit/s avec une taille de bloc de 75 168 bits/bloc. Du fait que cette valeur se trouve hors de la gamme recommandée pour un conduit de 160 à 3 500 Mbit/s, les caractéristiques d'erreur des conduits VC-4-4c évaluées en service ne doivent pas être déduites de ce tableau. L'objectif de taux BBER des conduits VC-4-4c utilisant une taille de bloc de 75 168 bits est de 4×10^{-4} .

⁽³⁾ Les objectifs de taux ESR ont tendance à perdre leur signification pour les applications à débit élevé: ils ne sont donc pas spécifiés pour les conduits fonctionnant à des débits supérieurs à 160 Mbit/s. Il y a cependant lieu, à des fins de maintenance, de mettre en œuvre la surveillance des ES.

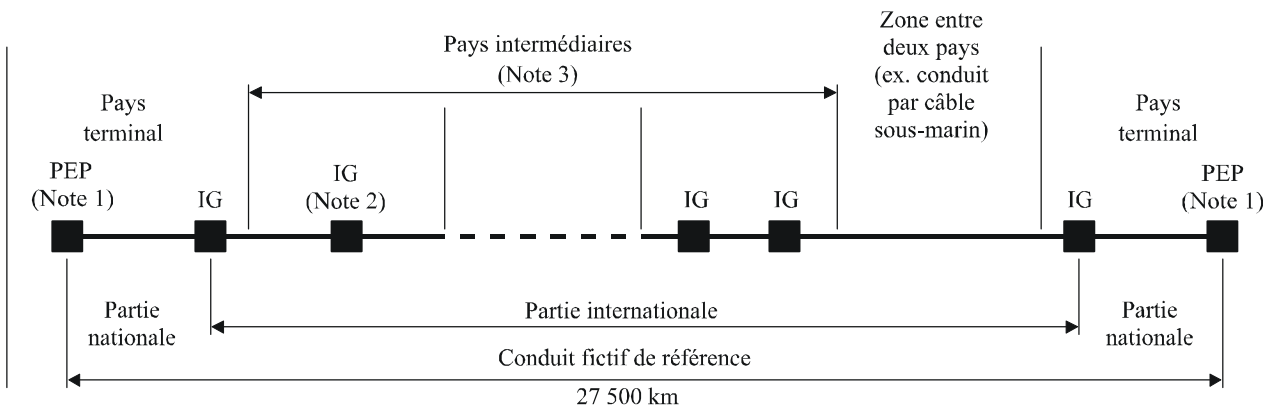
⁽⁴⁾ Pour les systèmes conçus avant 1996, l'objectif de taux BBER est de 3×10^{-4} .

Les conduits et les connexions numériques fonctionnant aux débits prévus dans la présente Recommandation peuvent utiliser des systèmes de transmission fonctionnant à des débits supérieurs. Ces systèmes doivent être conçus et mis en œuvre pour respecter les objectifs de bout en bout associés à leurs affluents, actuels ou prévus. Dans l'hypothèse d'une distribution d'erreur aléatoire, le respect des objectifs alloués dans le Tableau 1/G.826 pour le débit le plus élevé devrait garantir que les objectifs sont également respectés pour tous les affluents.

1.5 Répartition des objectifs de bout en bout entre les tronçons du conduit

Les objectifs de qualité de fonctionnement de bout en bout sont répartis entre les tronçons nationaux et internationaux d'un conduit CNFR en utilisant les principes d'attribution détaillées au § 6.2 de la Recommandation UIT-T G.828 (voir la Fig. 1).

FIGURE 1
CNFR



IG: Passerelle internationale (*international gateway*)

PEP: Point d'extrémité de conduit (*path end point*)

Note 1 – Lorsqu'on considère que le conduit se termine au niveau de la passerelle internationale, seule est attribuée la valeur pour le tronçon international.

Note 2 – Une ou deux passerelles internationales (d'entrée ou de sortie) peuvent être définies par pays intermédiaire.

Note 3 – On suppose que les pays intermédiaires sont au nombre de quatre dans le cas de la liaison de Terre, et qu'il existe un bond par satellite.

1062-01

1.6 Attributions faites aux satellites

Dans les systèmes de transport de communication 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 assure un tronçon national, elle se voit allouer 42% de l'ensemble des objectifs de bout en bout.

Ceci est contraire aux attributions indiquées dans la Recommandation UIT-T G.821, qui spécifie des attributions différentes selon qu'il s'agisse de ES ou de SES. Les satellites ne se voient attribuer que 20% des objectifs pour les ES dans le tronçon international mais l'attribution ES de bout en bout est supérieure à 0,04 de telle sorte que la qualité de fonctionnement requise pour la liaison par satellite est très similaire. Pour les SES, l'attribution faite aux satellites ne correspond qu'à 15% de 0,002, c'est-à-dire 0,0003.

Les objectifs de qualité de fonctionnement pour les satellites assurant des tronçons d'un conduit CNFR ou d'une connexion HRX de 27 500 km sont donnés dans les Tableaux 5 et 6.

TABLEAU 5

Objectifs de qualité de fonctionnement d'un satellite pour un tronçon international

Débit (Mbit/s)	0,064 à 1,5	1,5 à 5	> 5 à 15	> 15 à 55	> 55 à 160	> 160 à 3 500
ESR	0,014	0,014	0,0175	0,0262	0,056	Sans objet
SESR	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
BBER	Sans objet	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,35 \times 10^{-4}$

TABLEAU 6

Objectifs de qualité de fonctionnement d'un satellite pour un tronçon national

Débit (Mbit/s)	0,064 à 1,5	1,5 à 5	> 5 à 15	> 15 à 55	> 55 à 160	> 160 à 3 500
ESR	0,0168	0,0168	0,021	0,0315	0,0672	Sans objet
SESR	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084	0,00084
BBER	Sans objet	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,84 \times 10^{-4}$	$0,42 \times 10^{-4}$

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 4.

2 Calcul des gabarits de PEB (probabilité d'erreurs binaires)

L'ensemble des paramètres et des objectifs définis dans la Recommandation UIT-T G.826 ne convient pas pour la conception d'un système à satellites. Il doit être transformé en une distribution de la PEB en fonction d'un pourcentage de temps, appelé également gabarit de PEB, de façon que tout système à satellites conçu pour respecter ce gabarit respecte également les objectifs de la présente Recommandation. Cette transformation n'aboutit pas cependant à une distribution unique.

2.1 Probabilité d'occurrence des événements de base

Il est bien connu que les erreurs de transmission observées sur les liaisons par satellite surviennent par salves où le nombre moyen d'erreurs par salve est, entre autres facteurs, fonction de l'embrouilleur et du code de CED. Un modèle correct de la qualité de fonctionnement numérique sur les liaisons par satellite doit donc tenir compte de cette distribution en salves. La distribution de Neyman-A avec contagion est un modèle statistique qui peut représenter de manière adéquate l'occurrence aléatoire des salves. Dans ce modèle, la probabilité d'occurrence de k erreurs dans N bits, $P(k)$, est donnée par:

$$P(k) = \frac{\alpha^k}{k!} e^{-\frac{BEP \cdot N}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j^k}{j!} \left(\frac{BEP \cdot N}{\alpha} \right)^j e^{-j\alpha} \quad (1)$$

où:

α : nombre moyen de bits erronés dans une salve d'erreurs

BEP : probabilité d'erreur binaire.

Si $N = N_B$ représente le nombre de bits dans un bloc de données, la probabilité pour qu'un bloc ne contienne pas d'erreur est donnée par:

$$P(0) = e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\left(\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha} \right)^j / j! \right) e^{-j\alpha} \cong e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \quad \text{pour toutes les valeurs possibles de } \alpha \quad (2)$$

La probabilité d'occurrence d'un EB, P_{EB} , est donnée par l'équation suivante:

$$P_{EB} = 1 - P(0) = 1 - e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} = 1 - e^{-N_B \cdot BEP_{CRC}} \quad (3)$$

où $BEP_{CRC} = BEP/\alpha$. La probabilité d'occurrence d'une ES, P_{ES} , peut s'exprimer comme suit:

$$P_{ES} = 1 - e^{-n \cdot P_{EB}} \quad (4)$$

où n est le nombre de blocs/s.

Etant donné que la probabilité d'occurrence de k blocs erronés dans un total de n blocs, $P_{n,k}$, est donnée par:

$$P_{n,k} = \frac{n!}{(n-k)! k!} (1 - P_{EB})^{n-k} P_{EB}^k \quad (5)$$

la probabilité d'occurrence d'une seconde gravement erronée, P_{SES} , est:

$$P_{SES} = \sum_{k=0.3n}^n P_{n,k} = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} P_{n,k} = 1 - \sum_{k=0}^{0.3n-1} \frac{n!}{(n-k)! k!} (1 - P_{EB})^{n-k} P_{EB}^k \quad (6)$$

2.2 Calcul des paramètres de la Recommandation UIT-T G.826 pour un gabarit donné de la distribution cumulative BEP

A partir de la définition des paramètres la Recommandation UIT-T G.826, on peut formuler les expressions suivantes pour calculer le ESR, le SESR et le BBER:

$$ESR = \frac{N_{ES}}{N} \quad (7)$$

$$SESR = \frac{N_{SES}}{N} \quad (8)$$

$$BBER = \frac{N_{EB}}{N_B} \quad (9)$$

où:

N_{ES} : nombre de secondes erronées pendant la période de disponibilité considérée

N_{SES} : nombre de secondes gravement erronées pendant la période de disponibilité considérée

N_{EB} : nombre de blocs erronés pendant la période de disponibilité considérée, à l'exclusion des secondes gravement erronées

N_B : nombre de blocs pendant la période de disponibilité considérée, à l'exclusion des SES

N : nombre total de secondes pendant la période de disponibilité considérée.

On peut appliquer l'approximation fréquence relative courante des probabilités aux expressions ci-dessus et l'on obtient alors les résultats suivants:

$$ESR \cong P_{ES} \quad (10)$$

$$SESR \cong P_{SES} \quad (11)$$

$$BBER \cong P_{EB} \quad (12)$$

On doit considérer les probabilités ci-dessus comme des probabilités moyennes dans l'intervalle d'observation respectif. En pratique, cette moyenne doit être évaluée dans le temps. Par conséquent, si l'on suppose qu'une BEP aléatoire est observée à chaque seconde, on peut définir les probabilités d'occurrence des événements de base en fonction du temps et calculer alors leurs valeurs moyennes à l'aide des expressions suivantes:

$$ESR = \frac{\int_{T_a} P_{ES}(t)dt}{T_a} \quad (13)$$

$$SESR = \frac{\int_{T_a} P_{SES}(t)dt}{T_a} \quad (14)$$

Pour calculer l'exclusion des SES du BBER, on effectue le calcul suivant:

$$BBER = \frac{\int_{T_a} P_{EB}(t) \frac{1 - P_{SES}(t)}{1 - SESR} dt}{T_a} \quad (15)$$

où T_a est le temps disponible.

On peut calculer les valeurs moyennes dans le temps au moyen des expressions équivalentes selon la fonction de distribution cumulative pour BEP/α , défini comme $F(x)$. La méthode pour calculer l'ESR est illustrée ci-dessous:

$$\frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{ES}(t)dt = \int_0^{BEP_{th}/\alpha} P_{ES}(x)dF(x) \quad (16)$$

où BEP_{th}/α est la valeur seuil au-dessus de laquelle on considère que le système est indisponible. Des dérivations analogues s'appliquent aux autres paramètres.

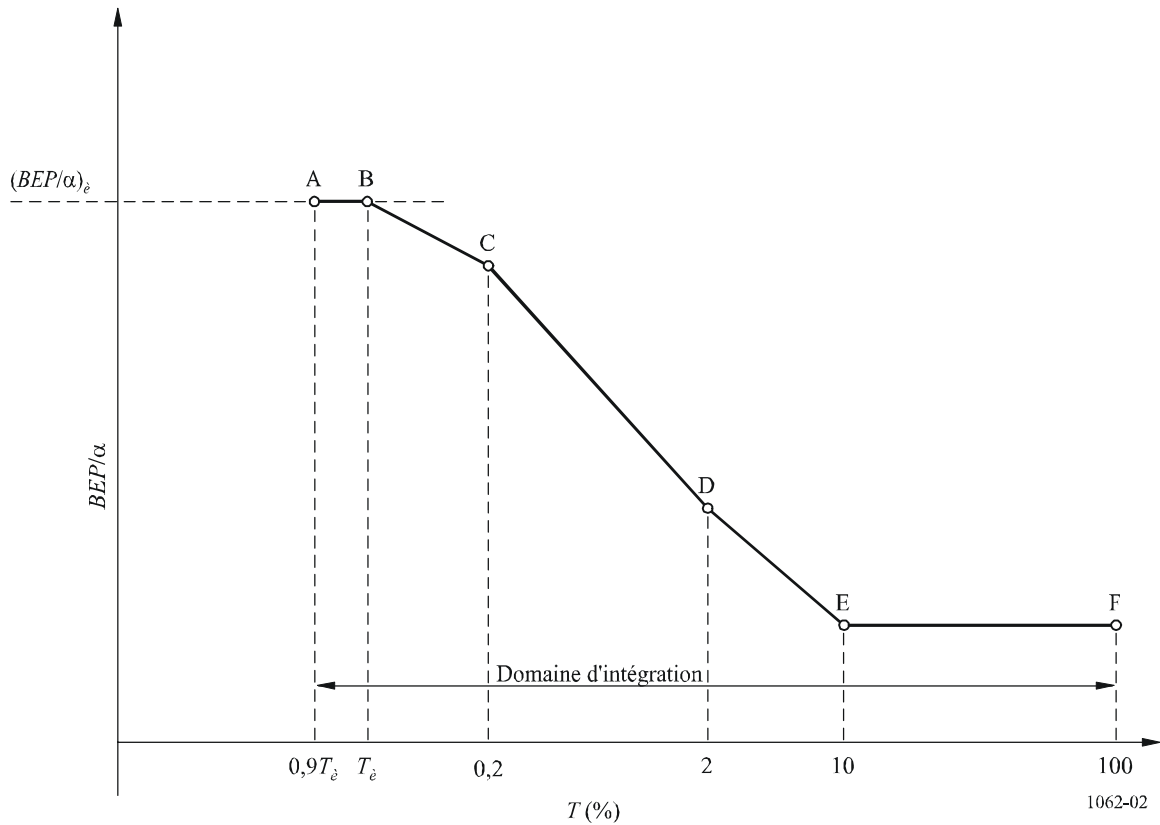
Pour un calcul numérique, on peut utiliser une approximation discrète comme suit:

$$\frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{ES}(t)dt \cong \sum_i P_{ES}(x_i)(F(x_{i+1}) - F(x_i)) \quad (17)$$

où la somme est calculée pour les valeurs x_i de BEP/α en dessous de BEP_{th}/α .

Pour atteindre les objectifs de qualité de fonctionnement de la Recommandation UIT-T G.826, on peut trouver un nombre infini de distributions cumulatives BEP/α , $F(x)$. On suppose donc qu'un gabarit de $F(x)$ a la forme de la Fig. 2. Il convient de noter que $F(x)$ peut être exprimé comme un pourcentage de temps pendant lequel BEP/α ne doit pas dépasser x et qu'il doit donc être lu comme étant le complément des valeurs de l'axe horizontal de la Fig. 2.

FIGURE 2
Forme générale du gabarit

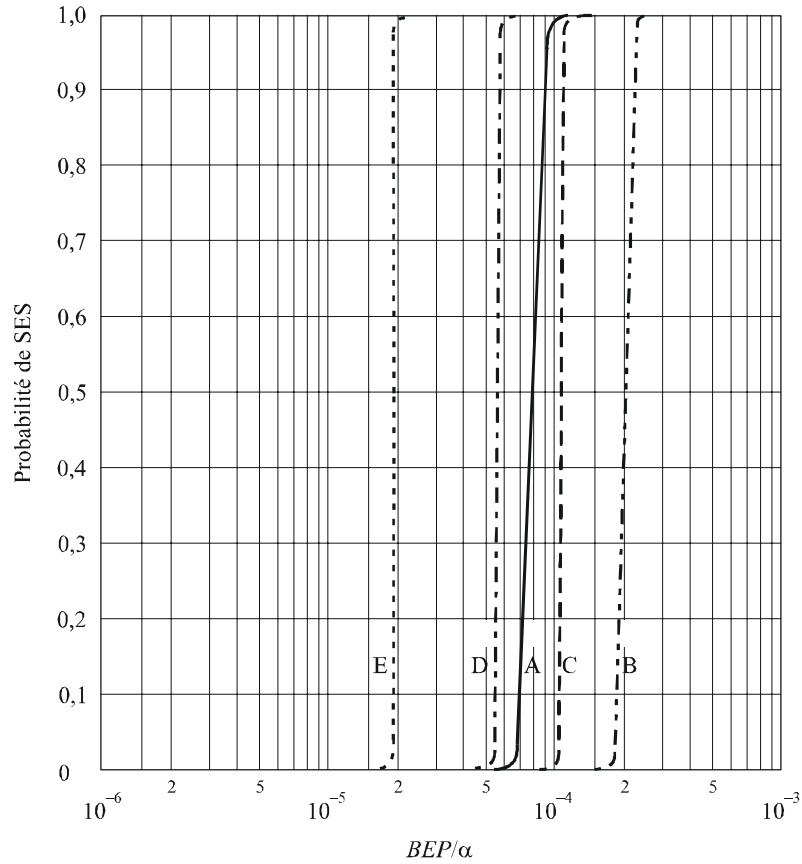


Le temps correspondant au seuil d'indisponibilité T_e est défini par $P_{SES} = 0,933$. Cette valeur correspond à une probabilité de 0,5 pour que dix SES interviennent consécutivement.

Les valeurs de BEP_e/α correspondantes, pour divers débits binaires, sont présentées sur la Fig. 3 et sont également indiquées dans le Tableau 7.

FIGURE 3

P_{SES} en fonction de BEP/α



- A: 1,5 Mbit/s
- B: 2 Mbit/s
- C: 6 Mbit/s
- D: 51 Mbit/s
- E: 155 Mbit/s

1062-03

TABLEAU 7

Débit binaire (Mbit/s)	BEP_e/α
0,064	3×10^{-3}
1,544	$9,00 \times 10^{-5}$
2,048	$1,90 \times 10^{-4}$
6,432	$1,17 \times 10^{-4}$
51,84	$5,68 \times 10^{-5}$
155,52	$1,89 \times 10^{-5}$

Lors du choix de la valeur de BEP_e/α pour la génération des gabarits, il faut cependant se rappeler que les modems subissent une perte de synchronisation à un certain seuil de BEP, désigné ici par BEP_{mod} . Compte tenu de ce qui précède, la valeur de BEP_e/α à utiliser est donnée par la formule:

$$BEP_e/\alpha = \min (BEP_e/\alpha \text{ du Tableau 7}; BEP_{mod}/\alpha)$$

Pour la plupart des modems qui fonctionnent actuellement, la valeur 1×10^{-3} constitue une bonne approximation de BEP_{mod} .

La méthode ci-dessus aboutira à la génération d'un nombre infini de gabarits conformes aux objectifs de qualité de fonctionnement de la Recommandation UIT-T G.826. Par conséquent, on utilise le processus suivant pour définir un gabarit et pour déterminer les points C, D, E et F du gabarit. (Voir la Fig. 2).

Etape 1: Fixer les valeurs du gabarit à 100%, 10%, 2% et 0,2% du temps (points C, D, E et F).

Etape 2: Déterminer la valeur de BEP_{δ}/α .

Etape 3: Choisir une valeur pour le temps correspondant au seuil d'indisponibilité, T_{δ} , ($T_{\delta} < 0,2\%$).

Etape 4: Tracer une ligne droite entre B et C.

Etape 5: Calculer les ESR, SESR et BBER par une intégration dans le domaine compris entre $0,9 T_{\delta}$ et 100%. (Voir la Note 1).

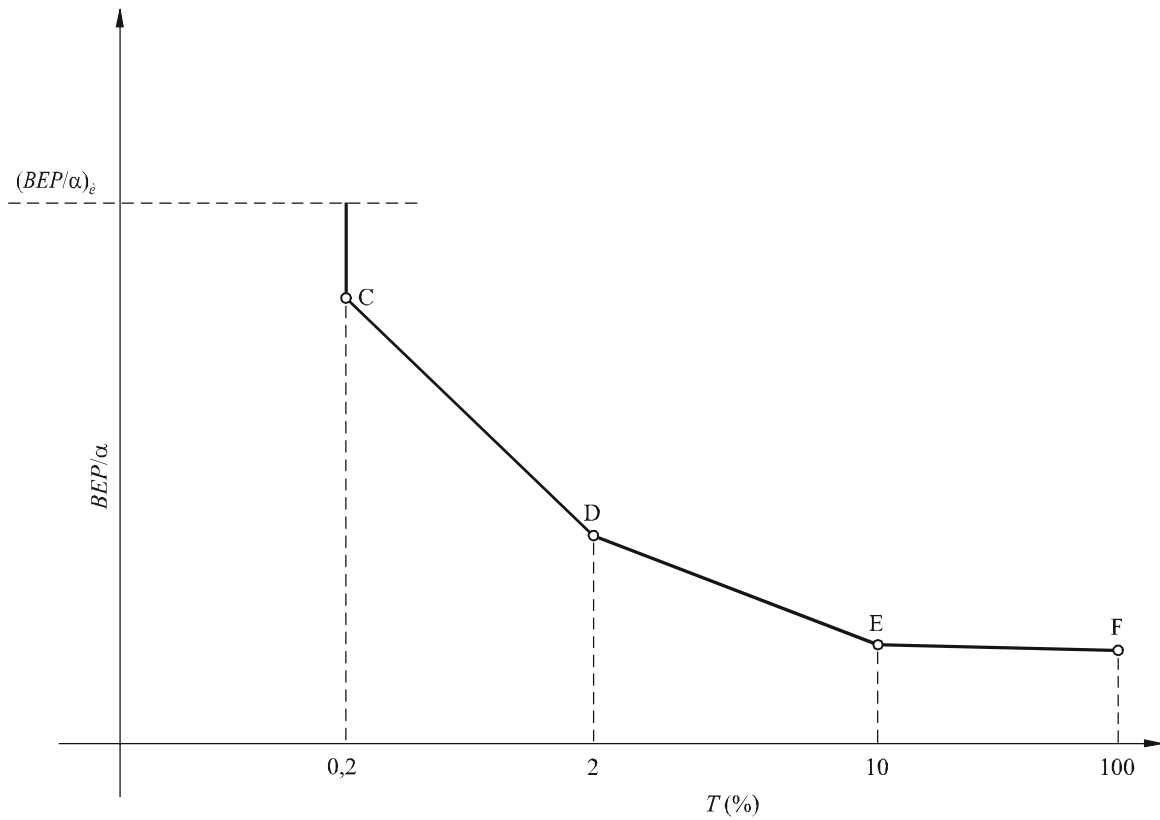
NOTE 1 – D'après les résultats donnés dans la Recommandation UIT-R S.579, correspondant aux événements d'affaiblissement de propagation qui ne conduisent pas à une période d'indisponibilité, un facteur de disponibilité due à la propagation de 10% a été utilisé pour réaliser ces gabarits. 10% de T_{δ} a donc été intégré dans le temps disponible pour tenir compte des cas où la valeur de BEP est plus mauvaise que celle de BEP_{δ} mais où la situation se rétablit en moins de 10 s.

Etape 6: Choisir une nouvelle valeur de T_{δ} et répéter les Etapes 4 et 5 jusqu'à trouver les valeurs les plus élevées des ESR, SESR et BBER pour tout $T_{\delta} < 0,2\%$ du temps.

Si les objectifs applicables aux ESR, SESR et BBER et figurant dans les Tableaux 5 et 6 sont respectés pour tout $T_{\delta} < 0,2\%$ du temps, on considère que le gabarit défini par les points C, D, E et F respecte les prescriptions de la présente Recommandation. Le processus décrit ci-dessus garantit en outre que l'indisponibilité de la liaison est inférieure à 0,2% du temps total.

Comme conséquence du processus itératif des Etapes 4, 5 et 6, toute ligne droite entre les points B et C, où B peut se situer n'importe où entre 0% et 0,2% du temps, respectera les objectifs définis dans la présente Recommandation et les objectifs d'indisponibilité indiqués dans la Recommandation UIT-R S.579. La forme générale du gabarit peut alors être simplifiée en prolongeant verticalement le gabarit à partir du point C, comme le montre la Fig. 4.

FIGURE 4
Gabarit simplifié

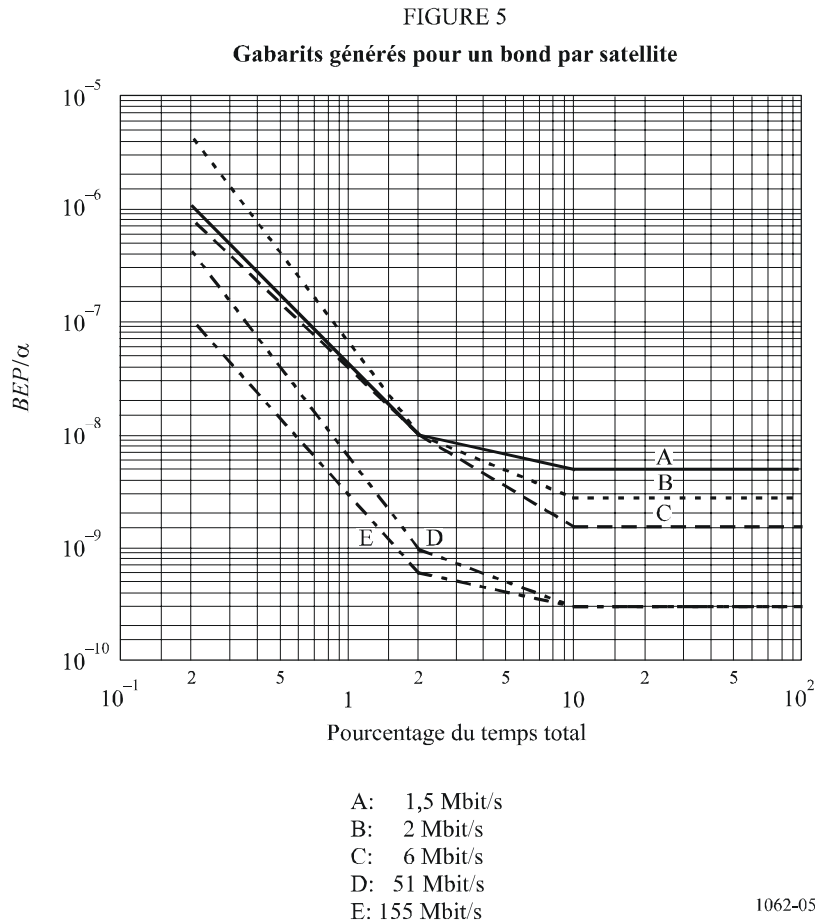


1062-04

En utilisant le processus décrit ci-dessus et en ajoutant les hypothèses suivantes:

- les valeurs de BEP/α correspondant aux points E et F sont identiques,
- les valeurs de BEP/α correspondant aux points E et D diffèrent d'une décade,

on a généré, à titre d'exemple, un jeu de gabarits pour divers débits binaires de transmission. Ces gabarits sont représentés à la Fig. 5.



Pour l'élaboration de ces gabarits, on a supposé $BEP_{mod} = 1 \times 10^{-3}$. Dans la Fig. 5, la seconde hypothèse a été modifiée de façon à obtenir un gabarit régulier. Par exemple, pour le gabarit correspondant au débit de 1,5 Mbit/s, le rapport entre les valeurs de BEP/α correspondant aux points E et D a été ramené de 10 à 3.

3 Relation entre le TEB et le taux d'occurrence d'événement d'erreur

Il est bien connu que les erreurs observées sur les liaisons par satellite utilisant des mécanismes de CED et d'embrouillage ont tendance à être groupées. Ces groupes d'erreurs, que l'on peut également appeler événements d'erreur, sont aléatoires et leur occurrence suit une distribution de Poisson. Le taux d'erreur sur les blocs résultant est identique à celui qui correspondrait à des erreurs binaires survenant de façon aléatoire (suivant une distribution de Poisson), avec un taux d'erreur binaire TEB/α où α (utilisé au § 2.1 pour tenir compte du fait que les erreurs surviennent par salves) est le nombre moyen de bits erronés dans un groupe. α représente par ailleurs le rapport entre le TEB et le taux d'événement d'erreur. Par exemple, dans un canal comportant des erreurs binaires aléatoires pour lequel on n'utilise pas de mécanisme de CED ou d'embrouillage, α est considéré comme étant égal à 1. Toutefois, avec des mécanismes de modulation d'ordre plus élevé, α peut être supérieur à 1.

Dans un mécanisme de CED donné, on peut estimer les valeurs théoriques de α au moyen de la distribution des poids de ce mécanisme. Le calcul des valeurs théoriques est décrit au § 3.1. Les

propriétés statistiques des groupes d'erreurs dépendent des mécanismes de CED et d'embrouillage utilisés. Des simulations et des mesures par ordinateur des différents mécanismes de CED (sans embrouillage ou codage différentiel) ont été utilisées pour déterminer le facteur α . Un canal avec bruit gaussien blanc additif est pris pour hypothèse dans la simulation. Les résultats sont indiqués dans les § 3.2 à 3.6.

3.1 Calcul du nombre moyen de bits erronés dans un groupe

Soit C , un code en blocs systématique (n, k) sa fonction d'énumération des poids (WEF, *weight enumerating function*) est la suivante:

$$B^C(H) \triangleq \sum_{i=0}^n B_i H^i \quad (18)$$

où B_i est le nombre (entier) de mots de code avec le poids de Hamming (nombre de uns) i et H est une variable fictive. La fonction WEF d'un code peut être utilisée pour calculer l'expression exacte de la probabilité d'erreurs non détectées ainsi qu'une limite supérieure de la probabilité d'erreurs sur les mots.

La fonction d'énumération des poids d'entrée/de redondance (IRWEF, *input-redundancy weight enumerating function*) du code peut être définie comme suit:

$$A^C(W, Z) \triangleq \sum_{w,j} A_{w,j} W^w Z^j \quad (19)$$

où $A_{w,j}$ désigne le nombre (entier) de mots de code générés par un mot d'information d'entrée du poids de Hamming w , dont les bits de contrôle de parité ont le poids de Hamming j , de telle façon que le poids de Hamming total soit $w + j$. La fonction IRWEF indique les contributions distinctes des bits d'information et des bits de contrôle de parité au poids de Hamming total des mots de code et, ainsi, fournit des informations supplémentaires sur le profil de poids (de Hamming) du code.

Au moyen de l'expression ci-dessus, la probabilité d'erreur binaire, P_b , peut être bornée supérieurement comme suit:

$$P_b \leq \sum_{m=d_{min}}^{\infty} D_m P(R_m'' | C_0) \quad (20)$$

où d_{min} est la distance minimale du code, $P(R_m'' | C_0)$ est la probabilité pour que le décodeur sélectionne le mot de code de poids m pour autant que le mot de code transmis soit exclusivement constitué de zéros, et:

$$D_m = \sum_{j+w=m} \frac{w}{k} A_{w,j} \quad (21)$$

Par conséquent, le nombre moyen de bits dans un groupe α sera la valeur moyenne de w , ce qui donne la formule suivante:

$$\bar{w} = \sum_{m=d_{\min}}^{\infty} \sum_{m=w+j} w A_{w,j} P_m \quad (22)$$

où P_m est la probabilité d'événements d'erreur avec m erreurs dans tous les événements d'erreur. Etant donné que P_m décroît rapidement avec m , en particulier dans les valeurs faibles de PEB, on peut obtenir une approximation de \bar{w} au moyen de la formule suivante:

$$\bar{w} \approx \sum_{d_{\min}=w+j} w A_{w,j} P_{d_{\min}} \quad (23)$$

3.2 Facteurs relatifs aux codes BCH binaires

On peut estimer les valeurs de α pour des codes BCH systématiques au moyen de l'équation (23) figurant au § 3.1. Le Tableau 8 représente la distribution des poids du code BCH (7,4), la distance minimale du code (7,4) étant de 3. On peut ainsi estimer α pour ce code de la façon suivante:

$$\bar{w}_{(7,4)} = \alpha_{(7,4)} \approx 1 \times \frac{3}{7} + 2 \times \frac{3}{7} + 3 \times \frac{1}{7} \cong 1,7 \quad (24)$$

Le Tableau 9 indique la valeur de α estimée pour divers codes BCH systématiques, et le Tableau 10 donne une comparaison entre les résultats de simulation pour le code BCH (15,11) et les résultats estimés. A mesure que le taux TEB diminue, la valeur estimée se rapproche de la valeur de simulation.

Pour les codes non systématiques, en cas de défaillance du décodage, environ la moitié du mot d'information sera erronée. α peut alors être approximé par $k/2$.

TABLEAU 8

Distribution des poids du code BCH (7,4)

w	j	$A_{w,j}$
0	0	1
1	2	3
1	3	1
2	1	3
2	2	3
3	0	1
3	1	3
4	3	1

TABLEAU 9

Valeurs théoriques de α estimées pour différents codes BCH

Code BCH (n,k)	α	Code étendu (n,k)	α	Code expurgé (n,k)	α
(15,11)	2,20	(16,11)	2,75	(15,10)	2,67
(31,26)	2,52	(32,26)	3,25	(31,25)	3,23
(31,21)	3,73	(32,21)	4,56	(31,20)	4,53
(63,57)	2,06	(64,57)	2,96	(63,56)	2,96
(63,51)	4,07	(64,51)	4,50		

TABLEAU 10

Comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs simulées de α pour le code BCH (15,11)

Taux TEB	Valeur de α simulée	Valeur de α théorique
$2,88 \times 10^{-2}$	2,60	2,2
$4,69 \times 10^{-3}$	2,37	
$5,57 \times 10^{-4}$	2,36	
$2,36 \times 10^{-5}$	2,33	

3.3 Facteurs relatifs aux codes convolutionnels

Une méthode analogue peut être appliquée aux codes convolutionnels. Pour les codes convolutionnels connus, différentes études ont permis de déterminer leurs distributions des poids en termes de a_d , le nombre de mots de code de distance d et c_d , la somme des erreurs binaires (le poids d'erreurs d'information) pour les mots de code de distance d . Comme pour les codes BCH binaires, \bar{w} ($= \alpha$) pour les codes convolutionnels peut être approximé par $(c_{d_f})/(a_{d_f})$, où d_f est la distance du code.

Le Tableau 11 indique les distributions des poids des codes convolutionnels connus et le Tableau 12 donne une comparaison entre les valeurs de α estimées de façon théorique et les valeurs de α simulées. Comme il était confirmé dans les codes BCH binaires, les valeurs de α estimées sont quasiment égales aux valeurs simulées dans les intervalles de valeurs faibles de TEB.

TABLEAU 11

Distribution des poids des codes convolutionnels

Taux de codage R	Longueur de contrainte K	Générateur (représentation octale)	d_f	$(a_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \dots)$ $(c_d, d = d_f, d = d_f + 1, d = d_f + 2, \dots)$
1/2	7	133, 171	10	(11, 0, 38, 0, 193, 0, 1 331, 0, 7 275, ...) (36, 0, 211, 0, 1 404, 0, 11 633, ...)
	9	561, 753	12	(11, 0, 50, 0, 286, 0, 1 630, 0, 9 639, ...) (33, 0, 281, 0, 2 179, 0, 15 035, ...)
2/3*	7	133, 171	6	(1, 16, 48, 158, 642, 2 435, 9 174) (3, 70, 285, 1 276, 6 160, 27 128, ...)
7/8*	7	133, 171	3	(2, 42, 468, 4 939, 52 821) (14, 389, 6 792, 97 243, 1 317 944)

* (*: Codes discontinus à partir d'un taux R 1/2 avec $K = 7$.)

TABLEAU 12

Comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs simulées de α pour des codes convolutionnels

Taux de codage R	Longueur de contrainte K	Générateur (représentation octale)	d_f	α (valeur estimée)	Taux TEB	α (valeur simulée)
1/2	7	133, 171	10	3,27	$1,74 \times 10^{-2}$	7,21
					$1,91 \times 10^{-3}$	5,68
					$1,05 \times 10^{-4}$	3,74
					$5,05 \times 10^{-6}$	3,48
					$1,07 \times 10^{-7}$	3,00
	9	561, 753	12	3,00	$1,22 \times 10^{-2}$	13,00
					$1,77 \times 10^{-3}$	11,56
					$2,10 \times 10^{-5}$	4,38
				$4,20 \times 10^{-7}$	3,96	
2/3	7	133, 171	6	3,00	$3,61 \times 10^{-2}$	8,00
					$7,86 \times 10^{-4}$	7,14
					$2,96 \times 10^{-6}$	5,32
					$2,14 \times 10^{-7}$	5,67
7/8	7	133, 171	3	7,00	$6,24 \times 10^{-2}$	9,08
					$2,68 \times 10^{-2}$	8,85
					$9,82 \times 10^{-3}$	7,77
					$1,77 \times 10^{-5}$	7,57
					$1,49 \times 10^{-6}$	7,29

3.4 Facteurs relatifs aux codes concaténés

Pour un code concaténé avec un code externe Reed Solomon (RS) et un code interne convolusionnel, la valeur de α est directement liée à la distribution des poids du code RS, car le code RS est un code externe. On obtient la valeur de α pour les codes RS au moyen de la même règle que celle utilisée dans le code BCH binaire, si le décodage par probabilité maximale est utilisé. On devrait ainsi obtenir la distribution des poids binaires des codes RS.

Le Tableau 13 indique les valeurs de α simulées pour les codes RS dans le mécanisme de codage concaténé spécifié dans les Recommandations UIT-R BO.1724 et UIT-R S.1709. On utilise le code RS (204,188) abrégé par rapport au code RS d'origine (255,239). On utilise le code RS (71,55) abrégé pour une taille de paquet différente.

TABLEAU 13

Valeurs de α simulées pour codes RS dans le mécanisme de codage concaténé

Code RS (N,K)	Taux TEB	α	Code RS (N,K)	Taux TEB	α
(204,188)	$7,74 \times 10^{-3}$	12,80	(71,55)	$6,17 \times 10^{-3}$	8,47
	$5,19 \times 10^{-4}$	9,14		$2,03 \times 10^{-4}$	7,74
	$1,02 \times 10^{-6}$	8,58		$2,02 \times 10^{-7}$	7,32

3.5 Facteurs relatifs aux codes turbo

Dans le cas des codes turbo, on peut utiliser une méthode analogue à celle utilisée pour les codes convolusionnels, car les codes turbo sont fondés sur des codes convolusionnels. Le Tableau 14 indique les distributions des poids des codes turbo spécifiés dans les Recommandations UIT-R BO.1724 et UIT-R S.1709, et le Tableau 15 indique les valeurs de α estimées correspondantes. Le Tableau 16 donne les valeurs de α simulées pour des paquets de 53 octets. Etant donné que les codes turbo utilisent un algorithme de décodage itératif, les valeurs de α et le taux TEB dépendent de l'algorithme de décodage ainsi que du nombre d'itérations. Pour la simulation, on a utilisé un algorithme de décodage de type «max-log MAP» et on a estimé les valeurs de α pour 6 itérations et pour 15 itérations. Etant donné que les valeurs théoriques estimées figurant dans le Tableau 15 peuvent être considérées comme une limite inférieure, elles sont plus petites que les valeurs simulées indiquées dans le Tableau 16.

TABLEAU 14

Distribution des poids des codes turbo ($d_f/a_d/c_d$)

Taille de paquet (octets)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	31/106/954	18/159/954	11/159/901	7/10/50	4/9/27
	32/265/1643	19/159/1431	12/265/1325	8/85/375	5/194/719
	33/106/901	20/530/3551	13/1802/11342	9/486/2335	6/1228/5371
188	33/3476/3384	19/376/3384	12/188/1316	9/27/171	6/199/826
	35/376/3760	20/376/3008	14/752/5264	10/148/1025	7/1578/7269
	36/752/6392	22/752/6768	15/1504/12220	11/1462/9674	8/9144/49558

TABLEAU 15

Valeurs de α approchées de façon théorique pour les codes turbo

Taille de paquet (octets)	$R = 1/3$	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 6/7$
53	9,00	6,00	5,67	5,00	3,00
	6,20	9,00	5,00	4,41	3,70
	8,50	6,70	6,29	4,80	4,37
752	9,00	9,00	7,00	6,33	4,15
	10,00	8,00	7,00	6,93	4,60
	8,50	9,00	8,13	6,62	5,42

TABLEAU 16

Valeurs de α simulées pour les codes turbo

Nombre d'itérations	$R = 1/3$ TEB/ α	$R = 2/5$ TEB/ α	$R = 1/2$ TEB/ α	$R = 3/4$ TEB/ α	$R = 6/7$ TEB/ α
6	$5,58 \times 10^{-5}/16,8$	$3,79 \times 10^{-5}/16,6$	$1,39 \times 10^{-4}/21,5$	$9,53 \times 10^{-4}/15,9$	$3,44 \times 10^{-5}/6,8$
	$9,28 \times 10^{-6}/14,0$	$5,56 \times 10^{-6}/12,8$	$2,24 \times 10^{-5}/17,1$	$3,47 \times 10^{-5}/11,3$	$2,34 \times 10^{-6}/5,2$
	$1,42 \times 10^{-6}/10,6$	$9,68 \times 10^{-7}/10,6$	$5,69 \times 10^{-7}/9,0$	$9,89 \times 10^{-7}/7,8$	$2,53 \times 10^{-7}/4,1$
15	$2,25 \times 10^{-5}/23,7$	$1,57 \times 10^{-5}/20,8$	$6,36 \times 10^{-5}/26,6$	$6,46 \times 10^{-4}/18,3$	$2,67 \times 10^{-5}/7,0$
	$3,28 \times 10^{-6}/16,5$	$2,41 \times 10^{-6}/14,5$	$9,30 \times 10^{-6}/18,9$	$1,89 \times 10^{-5}/12,2$	$1,74 \times 10^{-6}/4,8$
	$5,62 \times 10^{-7}/11,6$	$4,25 \times 10^{-7}/10,8$	$3,02 \times 10^{-7}/8,9$	$6,02 \times 10^{-7}/7,9$	$1,78 \times 10^{-7}/4,3$

3.6 Facteurs relatifs aux codes turbo en blocs

Les codes turbo en blocs (BTC, *block turbo codes*) sont des codes produit qui sont décodés de façon itérative. La distance minimale d'un code produit est le produit des distances minimales de ses codes constitutifs. Par exemple, la distance minimale du code produit de dimension m avec le même code constitutif, avec une distance minimale d_{min} , sera d_{min}^m . Selon le même principe, la valeur de α pour un code BTC, α_{BTC} , peut être représentée comme suit.

$$\alpha_{BTC} = \alpha_{c_1} \cdot \alpha_{c_2} \cdots \alpha_{c_m} \quad (25)$$

où α_{c_i} est la valeur de α pour le i ème code constitutif. Les codes systématiques binaires indiqués au § 3.2 sont généralement utilisés comme codes constitutifs. Le Tableau 17 donne la valeur de α_{BTC} estimée de façon théorique au moyen de l'équation ci-dessus, où les mêmes codes constitutifs utilisés précédemment sont pris pour hypothèse dans le code BTC. Par conséquent, les valeurs de α_c dans le Tableau 17 sont les mêmes que dans le Tableau 9. Les Tableaux 18 et 19 comparent les valeurs estimées de façon théorique avec les valeurs simulées pour des codes BTC à deux dimensions. Comme il est confirmé dans les § 3.2 et 3.3, les valeurs estimées sont quasiment égales aux valeurs simulées dans les intervalles de valeurs faibles de TEB.

TABLEAU 17

Valeurs approchées de façon théorique pour des codes turbo en blocs

Code étendu (n,k)	d_{min}	α_c	α_{BTC} pour un code à 2 dimensions	α_{BTC} pour un code à 3 dimensions
(16,11)	4	2,75	7,56	20,80
(32,26)	4	3,25	10,56	34,33
(32,21)	6	4,56	20,79	94,82
(64,57)	4	2,96	8,76	25,93
(64,51)	6	4,50	20,25	91,13

TABLEAU 18

Comparaison entre les valeurs de α théoriques et les valeurs de α simulées pour le code BTC (16,11) \times (16,11)

E_b/N_0 (dB)	Taux TEB	α_{BTC}	Code constitutif	
			Taux TEB	α_c
1,0	$4,41 \times 10^{-2}$	14,50	$1,25 \times 10^{-1}$	2,82
2,0	$3,43 \times 10^{-3}$	10,35	$7,82 \times 10^{-2}$	2,88
2,5	$4,24 \times 10^{-4}$	7,46	$5,97 \times 10^{-2}$	2,52
3,0	$8,30 \times 10^{-5}$	7,25	$4,31 \times 10^{-2}$	2,82
3,5	$8,51 \times 10^{-6}$	7,31	$2,97 \times 10^{-2}$	2,99

TABLEAU 19

Comparaison entre les valeurs de α théoriques et les valeurs de α simulées pour le code BTC (32,26) \times (32,26)

E_b/N_0 (dB)	Taux TEB	α_{BTC}	Code constitutif	
			Taux TEB	α_c
2,0	$4,19 \times 10^{-3}$	31,57	$5,96 \times 10^{-2}$	3,88
3,0	$7,80 \times 10^{-6}$	11,21	$3,10 \times 10^{-2}$	3,33
3,3	$2,10 \times 10^{-6}$	9,76	$2,35 \times 10^{-2}$	3,15

3.7 Autres résultats de mesures et résumé

Des mesures en laboratoire de transmissions numériques INTELSAT de type IDR (CED $R = 3/4$ plus embrouillage) ont abouti à une valeur de 10 pour α pour un TEB compris entre 1×10^{-4} et 1×10^{-11} . Au cours des mêmes mesures, on a obtenu une valeur de 5 pour α dans le cas de transmissions numériques INTELSAT de type IBS (CED $R = 1/2$ plus embrouillage).

Il ressort des résultats obtenus que α est fonction de la distribution des poids du mécanisme de CED et de la probabilité PEB. On pourrait évaluer comme suit l'incidence du paramètre α sur le modèle de qualité de fonctionnement.

Les gabarits donnés aux Fig. 2 et 3 ont été générés avec $\alpha = 10$. Si, par exemple, aucun mécanisme de CED et d'embrouillage ($\alpha = 1$) n'était utilisé, les modèles seraient décalés d'une décade et les exigences en matière de TEB seraient plus strictes (d'une décade).

Liste des acronymes/abréviations

BBE	Erreur résiduelle de bloc (<i>background block error</i>)
BBER	Taux de blocs erronés résiduels (<i>background block error ratio</i>)
BCH	Bose, Ray-Chaudhuri, Hocquenghem
BTC	Code turbo en blocs (<i>block turbo code</i>)
CED	Correction d'erreur directe
CNFR	Conduit numérique fictif de référence
EB	Bloc erroné (<i>errored block</i>)
ES	Seconde erronée (<i>errored second</i>)
ESR	Taux de secondes erronées (<i>errored second ratio</i>)
HRX	Connexions fictives de références (<i>hypothetical reference connections</i>)
IBS	Intelsat Business Service
IDR	Débit binaire intermédiaire (<i>intermediate data rate</i>)
IG	Passerelle internationale (<i>international gateway</i>)
INTELSAT	Organisation internationale de télécommunications par satellites (<i>international telecommunication satellite organization</i>)
IRWEF	Fonction d'énumération des poids d'entrée/de redondance (<i>input-redundancy weight enumerating function</i>)
MAP	Maximum a posteriori
OSG	Orbite géostationnaire
PDH	Hierarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PEB	Probabilité d'erreur binaire
PEP	Point d'extrémité de conduit (<i>path end point</i>)
RS	Reed Solomon
SDH	Hierarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SES	Seconde gravement erronée (<i>severely errored second</i>)
SESR	Taux de secondes gravement erronées (<i>severely errored seconds ratio</i>)

SFS	Service fixe par satellite
SLA	Accord de niveau de service (<i>service level agreement</i>)
SMS	Service mobile par satellite
TEB	Taux d'erreurs binaires
VC	Conteneur virtuel (<i>virtual container</i>)
WEF	Fonction d'énumération des poids (<i>weight enumerating function</i>)
