

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R S.1521-1**  
(01/2010)

**Caractéristiques d'erreur admissibles d'un  
conduit numérique fictif de référence basé  
sur la hiérarchie numérique synchrone**

**Série S**  
**Service fixe par satellite**



Union  
internationale des  
télécommunications

## 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 l'Annexe 1 de 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 oeuvre 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

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

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	Propagation des ondes radioélectriques
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	<b>Service fixe par satellite</b>
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	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, 2010

© UIT 2010

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.1521-1

**Caractéristiques d'erreur admissibles d'un conduit numérique fictif de référence basé sur la hiérarchie numérique synchrone**

(2001-2010)

**Domaine d'application**

Le service fixe par satellite (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.828 définit les paramètres et objectifs qui sont liés aux caractéristiques d'erreur des conduits numériques synchrones internationaux destinés à acheminer du trafic en hiérarchie numérique synchrone (SDH) et en mode de transfert asynchrone (ATM). Pour répondre à ces objectifs, la présente Recommandation donne des lignes directrices sur les gabarits nominaux en termes de probabilité d'erreur binaire (BEP, *bit-error probability*) ou de taux d'erreur binaire (BER, *bit-error rate*), qui satisfont entièrement aux spécifications de la Recommandation UIT-T G.828.

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 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.1062 spécifie, pour les liaisons par satellite, des objectifs de qualité de fonctionnement conformes aux objectifs de la Recommandation UIT-T G.826;
- e) que les caractéristiques d'erreur pour les conduits numériques synchrones internationaux à débit binaire constant destinés à acheminer du trafic ATM, tel que défini dans la Recommandation UIT-T I.356, ont été spécifiées dans la Recommandation UIT-T G.828;
- f) que la Recommandation UIT-R S.1429 spécifie la qualité de fonctionnement en termes d'erreurs admissibles due au brouillage entre différents systèmes à satellites;
- g) que la Recommandation UIT-R S.1323 spécifie la façon de calculer les marges de fonctionnement tenant compte des évanouissements et du brouillage variable dans le temps;
- h) que, pour définir les critères de caractéristiques d'erreur, il faut tenir compte de toutes les sources d'erreur, notamment les conditions de propagation variables dans le temps et les brouillages;
- j) qu'il est possible de concevoir des systèmes à satellites qui satisfassent à des objectifs de qualité de fonctionnement très divers,

*recommande*

1 que les liaisons par satellite du réseau public destinées à écouler du trafic SDH et ATM soient conçues, au minimum, pour répondre aux spécifications de la présente Recommandation, qui est basée sur la Recommandation UIT-T G.828 (voir l'Annexe 1);

2 que la méthodologie décrite dans l'Annexe 2 soit utilisée pour générer les gabarits de performance en terme de BEP nécessaires (voir aussi la Note 2). Afin de respecter toutes les exigences de la Recommandation UIT-T G.828, la valeur de  $BEP/\alpha$ , BEP divisée par le nombre moyen d'erreurs  $\alpha$  par salve (voir le § 3 de l'Annexe 2) à la sortie (c'est-à-dire à l'une ou l'autre extrémité d'une connexion bidirectionnelle) d'un conduit numérique fictif de référence (HRDP, *hypothetical reference digital path*) ne devrait pas dépasser, pendant le temps total (y compris le mois le plus défavorable), les gabarits de conception définis dans le Tableau 1 et les gabarits de BEP de la Fig. 2 de l'Annexe 2.

TABLEAU 1

Débit binaire (kbit/s)	Pourcentage de temps total (mois le plus défavorable)	BEP/ $\alpha$
1 664	0,2 2,0 10,0	$1 \times 10^{-9}$ $1 \times 10^{-9}$ $1 \times 10^{-9}$
2 240	0,2 2,0 10,0	$1 \times 10^{-9}$ $1 \times 10^{-9}$ $1 \times 10^{-9}$
6 848	0,2 2,0 10,0	$1 \times 10^{-9}$ $7 \times 10^{-10}$ $6 \times 10^{-10}$
48 960	0,2 2,0 10,0	$1 \times 10^{-9}$ $2 \times 10^{-10}$ $1 \times 10^{-10}$
150 336	0,2 2,0 10,0	$1 \times 10^{-9}$ $2 \times 10^{-10}$ $9 \times 10^{-11}$
601 334	0,2 2,0 10,0	A déterminer A déterminer A déterminer

3 que les Notes suivantes fassent partie de la Recommandation:

NOTE 1 – Le HRDP auquel il est fait référence est spécifié dans la Recommandation UIT-R S.521.

NOTE 2 – Les rapports de BEP indiqués dans le Tableau 1 peuvent être estimés par des mesures de BER sur une période suffisamment longue. Une méthode de mesure des BER en fonction d'un pourcentage de temps plus court est proposée dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1062.

NOTE 3 – Pour faciliter l'application de la présente Recommandation, les valeurs données dans le Tableau 1 sont exprimées en termes de temps total et représentent les limites d'un modèle de qualité de fonctionnement en termes du BEP basé sur la méthode décrite dans l'Annexe 2. Pour obtenir les chiffres du Tableau 1, les erreurs survenant pendant les périodes d'indisponibilité ont été exclues. Les valeurs du BEP indiquées dans le Tableau 1 ne sont pas les seules qui permettent de satisfaire les exigences de la Recommandation UIT-T G.828. D'autres gabarits de BEP peuvent être utilisés s'ils sont aptes à satisfaire aux prescriptions de la Recommandation UIT-T G.828.

NOTE 4 – La présente Recommandation s'applique aux systèmes à satellites fonctionnant au-dessous de 15 GHz. L'extension à des systèmes fonctionnant à des fréquences plus élevées doit faire l'objet d'un complément d'étude.

NOTE 5 – Une valeur de BEP de  $1 \times 10^{-8}$  a été utilisée comme seuil d'indisponibilité.

NOTE 6 – Les objectifs indiqués dans le Tableau 1 sont donnés en pourcentages du mois le plus défavorable. Ces pourcentages mensuels correspondent aux pourcentages annuels suivants:

- 10% d'un mois = 4,0% de l'année;
- 2% d'un mois = 0,6% de l'année;
- 0,2% d'un mois = 0,04% de l'année.

NOTE 7 – On peut avoir intérêt, pour respecter le Tableau 1 à des fréquences supérieures à 10 GHz (voir aussi la Note 4), à recourir à divers mécanismes de compensation des évanouissements, tels que le codage adaptatif avec correction d'erreur directe (FEC, *forward error correction*), la régulation de la puissance ou la diversité d'emplacement. On trouvera dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R S.1061 des précisions sur le fonctionnement en diversité d'emplacement.

NOTE 8 – La méthode préférée de vérification de la qualité de fonctionnement des liaisons numériques par satellite repose sur des mesures en service, ces mesures utilisant les mécanismes de détection d'erreur sur les blocs, qui sont liés à la taille des blocs SDH et à la structure du système de transmission. La FEC, l'embrouillage et le codage différentiel ont une incidence sur l'interprétation des mesures (voir le § 3 de l'Annexe 2).

NOTE 9 – Les caractéristiques d'erreur décrites dans le Tableau 1 ont été établies à partir d'un HRDP 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 HRDP à l'intérieur de la connexion (par exemple, de bureau à bureau) et les objectifs de caractéristiques d'erreur peuvent être adaptés en conséquence.

NOTE 10 – Les méthodes décrites dans la présente Recommandation peuvent s'appliquer à la conception de liaisons par satellite de réseaux privés.

NOTE 11 – Les objectifs de qualité de fonctionnement doivent être atteints pour les débits de transmission requis, et non pas pour un débit plus élevé créé pour soutenir le multiplexage ou 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 nécessaire entre les extrémités est de 2 Mbit/s, ce sont les objectifs de qualité de fonctionnement propres à une transmission à 2 Mbit/s qui doivent être pris en compte.

## Annexe 1

### 1 Généralités

La Recommandation UIT-T G.828 définit les paramètres et les objectifs qui sont liés aux caractéristiques d'erreur des conduits numériques synchrones internationaux destinés à acheminer du trafic SDH et ATM. La présente Recommandation reprend tous les paramètres, définitions et objectifs qui y sont définis. Les objectifs donnés dans la Recommandation UIT-T G.828 sont indépendants du réseau physique qui prend le conduit en charge.

La mesure en service des taux d'erreur de la couche SDH est assurée par des codes de parité à entrelacement de bits (BIP) contenus dans les en-têtes SDH.

#### 1.1 Définitions

Dans un souci de commodité, les définitions de la Recommandation UIT-T G.828 sont reprises ici.

Les mesures de caractéristiques d'erreur sont basées sur des blocs dont la taille correspond à la structure de trame SDH et varie selon le débit (voir le Tableau 2).

##### 1.1.1 Un bloc

Un bloc est un ensemble de bits consécutifs associés au conduit; chaque bit appartient à un et à un seul bloc. Des bits consécutifs peuvent ne pas être contigus dans le temps.

##### 1.1.2 Événements relatifs aux caractéristiques d'erreur

- Bloc erroné (EB, errored block): Bloc qui contient un ou plusieurs bits erronés.
- Seconde avec erreur (ES, errored second): Période d'une seconde comportant un ou plusieurs EB, ou au moins un défaut. La liste des défauts et des critères liés aux caractéristiques est donnée à l'Annexe B de la Recommandation UIT-T G.828.
- Seconde avec beaucoup d'erreurs (SES, severely errored second): Période d'une seconde comportant  $\geq 30\%$  de EB, ou au moins un défaut. Un ensemble de secondes SES est un sous-ensemble de la ES. Afin de simplifier les mesures, le défaut est utilisé dans la définition de la SES au lieu de définir la SES directement en termes d'erreurs nombreuses sur les bits. Cependant, il faut noter que certaines configurations d'erreurs nombreuses peuvent ne pas donner lieu à un défaut. Une expérience en vraie grandeur permettra d'établir si cela pose des problèmes importants pour la mesure des erreurs.
- Bloc erroné résiduel (BBE, background block error): EB ne faisant pas partie des blocs d'une seconde SES.
- Période avec beaucoup d'erreurs (SEP, severely errored period): Suite de 3 à 9 secondes SES consécutives. Cette suite se termine par une seconde qui n'est pas une seconde SES. L'événement que constitue une période SEP est donc identique à l'événement que constituent des SES consécutives (CSES), au sens de la Recommandation UIT-T G.784, avec une limite inférieure fixée à 3 s.

On trouvera dans le Tableau 2 la relation entre la taille des blocs, les débits binaires, le code de détection d'erreur (EDC, *error detection code*) et le type de conduit.

TABLEAU 2  
Taille des blocs en fonction du débit binaire

Débit binaire (kbit/s)	Type de conduit	Taille des blocs SDH utilisée dans la Recommandation UIT-T G.828 (bits)	EDC
1 664	VC-11, TC-11	832	BIP-2
2 240	VC-12, TC-12	1 120	BIP-2
6 848	VC-2, TC-2	3 424	BIP-2
48 960	VC-3, TC-3	6 120	BIP-8
150 336	VC-4, TC-4	18 792	BIP-8
601 344	VC-4-4c, TC-4-4c	75 168	BIP-8
2 405 376	VC-4-16c, TC-4-16c	300 672	BIP-8
9 621 504	VC-4-64c, TC-4-64c	1 202 688	BIP-8

### 1.1.3 Paramètres relatifs aux caractéristiques d'erreur

Les caractéristiques d'erreur ne doivent être évaluées que lorsque le conduit est en état de disponibilité. Voir la définition des critères d'entrée ou de sortie de l'état d'indisponibilité à l'Annexe A de la Recommandation UIT-T G.828.

- Taux de secondes avec erreur (ESR, *errored second ratio*): Rapport entre le nombre de secondes ES et le nombre total de secondes pendant la période de disponibilité au cours d'un intervalle de mesure donné.
- Taux de secondes avec beaucoup d'erreurs (SESR, *severely errored second ratio*): Rapport entre le nombre de secondes SES et le nombre total de secondes pendant la période de disponibilité au cours d'un intervalle de mesure donné.
- Taux de blocs erronés résiduels (BBER, *background block error ratio*): Rapport entre le nombre de blocs BBE et le nombre total de blocs pendant la période de disponibilité au cours d'un intervalle de mesure donné. Dans le comptage du nombre total de blocs, on exclut les blocs qui font partie de ceux des secondes SES.
- Fréquence des périodes avec beaucoup d'erreurs (SEPI, *severely errored period intensity*): Rapport entre le nombre de périodes SEP pendant la période totale de disponibilité et cette période totale de disponibilité exprimée en secondes.

### 1.1.4 Mesures du bloc

Chaque bloc est contrôlé au moyen d'un code EDC intrinsèque de BIP. Les bits du code EDC sont transportés dans l'en-tête SDH. Lorsqu'un état d'erreur est détecté, il n'est pas possible de déterminer si c'est le bloc ou les bits de son code EDC de contrôle qui sont erronés. S'il y a désaccord entre le code EDC et le bloc qu'il contrôle, on suppose donc toujours que le bloc contrôlé est erroné.

## 2 Objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur

### 2.1 Objectifs de bout en bout

Le Tableau 3 donne les objectifs de bout en bout pour un conduit fictif de référence (HRP, *hypothetical reference path*) de 27 500 km. Les objectifs qui peuvent concrètement s'appliquer à un conduit réel sont obtenus à partir du Tableau 3 à l'aide des principes d'attribution exposés en détail dans le § 6.2 de la Recommandation UIT-T G.828. Chaque direction du conduit doit permettre d'atteindre indépendamment les objectifs qui sont attribués à tous les paramètres. Les objectifs sont des objectifs à long terme qui doivent être atteints pendant une période d'évaluation de 30 jours consécutifs (un mois) en règle générale.

TABLEAU 3

**Objectifs de bout en bout relatifs aux caractéristiques d'erreur pour un conduit HRP numérique synchrone international de 27 500 km tel que défini dans la Recommandation UIT-T G.828**

Débit binaire (kbit/s)	Type de conduit	Blocs/s	ESR	SESR	BBER <sup>(1)</sup>	SEPI <sup>(2)</sup>
1 664	VC-11, TC-11	2 000	0,01	0,002	$5 \times 10^{-5}$	0,0002/s
2 240	VC-12, TC-12	2 000	0,01	0,002	$5 \times 10^{-5}$	0,0002/s
6 848	VC-2, TC-2	2 000	0,01	0,002	$5 \times 10^{-5}$	0,0002/s
48 960	VC-3, TC-3	8 000	0,02	0,002	$5 \times 10^{-5}$	0,0002/s
150 336	VC-4, TC-4	8 000	0,04	0,002	$1 \times 10^{-4}$	0,0002/s
601 344	VC-4-4c, TC-4-4c	8 000	<sup>(3)</sup>	0,002	$1 \times 10^{-4}$	0,0002/s

<sup>(1)</sup> Cet objectif relatif au taux BBER correspond à un taux équivalent d'erreurs sur les bits de  $8,3 \times 10^{-10}$ , ce qui représente une amélioration par rapport au BER de  $5,3 \times 10^{-9}$  pour les débits des conduits de type conteneur virtuel VC-4. Le taux équivalent d'erreur sur les bits est valable en tant qu'indication indépendante du débit sur les caractéristiques d'erreur, puisque les objectifs liés au taux BBER ne peuvent pas rester constants lorsque la taille des blocs croît.

<sup>(2)</sup> Valeur provisoire devant faire l'objet d'un complément d'étude.

<sup>(3)</sup> Les objectifs qui sont liés au taux ESR ont tendance à perdre leur signification pour des débits binaires élevés. Ils n'ont donc pas été spécifiés pour des conduits fonctionnant à des débits supérieurs à 160 Mbit/s. Néanmoins, un taux ESR élevé indique une dégradation du système de transmission. Pour les besoins de la maintenance, il faut donc effectuer des contrôles du nombre de secondes ES.

Les conduits numériques synchrones qui fonctionnent aux débits binaires prévus dans la présente Recommandation peuvent être pris en charge par des sections numériques qui fonctionnent à des débits binaires plus élevés. Ces systèmes doivent être tels que les attributions des objectifs de bout en bout soient respectées. Dans une hiérarchie SDH, par exemple, une section module de transport synchrone STM-1 peut prendre en charge un conduit de type VC-4 et doit donc être conçue de manière que les objectifs spécifiés dans la présente Recommandation pour le débit binaire correspondant à un conduit de type VC-4 soient atteints.

Les objectifs sont attribués aux parties nationales et internationales d'un conduit. Dans l'exemple susmentionné, si la section STM-1 ne correspond pas à une partie nationale ou internationale entière, la valeur nationale ou internationale correspondante qui est attribuée doit être divisée afin de correspondre à la section numérique. Cette question sort du cadre de la présente Recommandation.

## 2.2 Répartition des objectifs de bout en bout

Les niveaux des caractéristiques prévus sont répartis entre les parties nationales et internationales d'un conduit HRP.

Une subdivision plus poussée de ces objectifs sort du cadre de la présente Recommandation.

### 2.2.1 Valeur attribuée à la partie nationale

La valeur qui est attribuée à chaque partie nationale est égale à un pourcentage fixe de 17,5% de l'objectif de bout en bout auquel s'ajoute une valeur attribuée en fonction de la distance.

Lorsqu'une partie nationale comporte un bond par satellite, un pourcentage total de 42% des objectifs de bout en bout du Tableau 3 est attribué à cette partie nationale. Ce pourcentage de 42% remplace complètement le pourcentage attribué en fonction de la distance et le pourcentage fixe de 17,5%.

### 2.2.2 Valeur attribuée à la partie internationale

A tout bond par satellite dans la partie internationale, quelle que soit la distance couverte, est attribuée une valeur de 35% des objectifs du Tableau 3. Ce pourcentage de 35% remplace tous les pourcentages en fonction de la distance ou fixes attribués aux parties de la partie internationale couvertes par le bond par satellite.

## 3 Objectifs de qualité de fonctionnement du HRDP par satellite

TABLEAU 4

### Objectifs de qualité de fonctionnement pour un HRDP par satellite destiné à une liaison internationale SDH

Débit (kbit/s)	1 664 (VC-11)	2 240 (VC-12)	6 848 (VC-2)	48 960 (VC-3)	150 336 (VC-4)	601 334 (VC-4-4c)
ESR	0,0035	0,0035	0,0035	0,007	0,014	( <sup>1</sup> )
SESR	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
BBER	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$0,35 \times 10^{-4}$	$0,35 \times 10^{-4}$

(<sup>1</sup>) Faute de renseignements sur la qualité de fonctionnement de conduits fonctionnant au-dessus de 160 Mbit/s, aucun objectif de taux ESR n'est recommandé actuellement. Néanmoins, le traitement du taux ESR devrait être mis en œuvre dans tout système fonctionnant à ces débits à des fins de surveillance et de maintenance.

## Annexe 2

### Dérivation du gabarit de BEP

#### 1 Introduction

Les paramètres et objectifs définis dans la Recommandation UIT-T G.828 ne sont pas directement adaptés à la conception d'un système de transmission par satellite. Ils doivent être transformés en BEP par rapport à une distribution en pourcentage de temps, appelé aussi gabarit de probabilité d'erreur sur les bits, de telle manière que tout système de transmission numérique conçu afin de respecter le gabarit, respecte aussi les objectifs de la présente Recommandation. La transformation explicitée dans cette Annexe n'aboutit cependant pas à un gabarit unique.

On trouvera ci-après la méthodologie utilisée pour la création d'un gabarit de BEP.

#### 2 Probabilité des événements de base

C'est un fait bien connu que les erreurs de transmission sur des liaisons par satellite apparaissent par salves, le nombre moyen d'erreurs par salve étant, entre autres, fonction de l'embrouilleur et du code FEC. Par conséquent, un modèle adéquat de qualité de fonctionnement numérique de liaisons par satellite doit prendre en compte cette notion de salves.

Un modèle statistique, qui peut représenter de manière adéquate l'apparition aléatoire de salves est la distribution contigüe Neyman-A, où la probabilité d'apparition de  $k$  erreurs sur  $N$  bits,  $P(k)$ , est:

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

où:

$\alpha$ : nombre moyen de bits erronés dans une salve d'erreurs

$BEP$ : probabilité d'erreur sur les bits.

Si  $N = N_B$  est pris comme le nombre de bits dans un bloc de données, alors la probabilité de zéro erreur dans un bloc est:

$$P(0) = e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \sum_{j=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{BEP \cdot N_B}{\alpha} \right)^j / j! \right] e^{-j\alpha} \cong e^{-\frac{BEP \cdot N_B}{\alpha}} \quad (2)$$

pour toutes les valeurs pratiques de  $\alpha$ .

La probabilité d'avoir un bloc erroné,  $P_{EB}$ , est donnée par:

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

où  $BEP_{CRC}(t) = BEP/\alpha$ , et le  $BEP_{CRC}$  est montré explicitement en fonction du temps. La probabilité d'avoir une ES,  $P_{ES}(t)$ , peut alors être exprimée comme:

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

où  $n$  est le nombre de blocs par seconde.

Puisque la probabilité d'avoir  $k$  blocs erronés sur un total de  $n$  blocs,  $P_{n,k}(t)$ , est donnée par:

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

alors, la probabilité d'une SES,  $P_{SES}(t)$ , est:

$$P_{SES}(t) = \sum_{k=0,3n}^n P_{n,k}(t) = 1 - \sum_{k=0}^{0,3n-1} P_{n,k}(t) = 1 - \sum_{k=0}^{0,3n-1} \frac{n!}{(n-k)!k!} (1 - P_{EB}(t))^{n-k} P_{EB}^k(t) \quad (6)$$

## 2.1 Production de gabarits

En supposant une forme générale de gabarit (voir la Fig. 1) et en utilisant la formule de probabilité, la valeur de l'ESR (défini comme le total des ES, c'est-à-dire de secondes avec un bloc erroné ou plus) divisée par le nombre total de secondes disponibles,  $T_a$ , est donnée par:

$$ESR = \frac{\int P_{ES}(t) dt}{T_a} \quad (7)$$

De même, le SESR est donné par:

$$SESR = \frac{\int P_{SES}(t) dt}{T_a} \quad (8)$$

Si  $P_{ES}(t)$  et  $P_{SES}(t)$  sont supposés être constants par partie dans le temps, alors l'ESR et le SESR peuvent être exprimés comme:

$$ESR = \sum_{i=1}^M P_{ES_i} \cdot \Delta t_i \quad (9)$$

et

$$SESR = \sum_{i=1}^M P_{SES_i} \cdot \Delta t_i \quad (10)$$

où  $M$  est le nombre total d'intervalles de temps,  $P_{ES_i}(t)$  et  $P_{SES_i}(t)$  sont les probabilités respectivement d'une ES et d'une SES durant le  $i^{\text{ème}}$  intervalle de temps divisé par  $T_a$ .

Le BBER est défini comme le rapport des EB au nombre total de blocs durant les secondes disponibles, en excluant tous les blocs durant les SES. De cette manière:

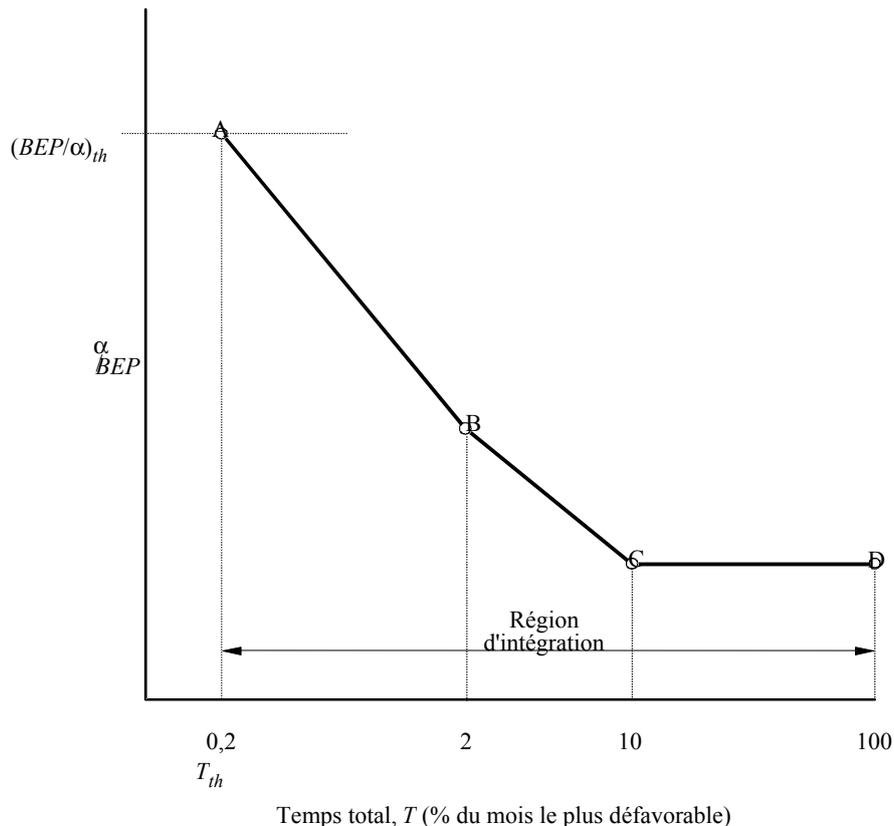
$$BBER = \frac{\int_{T_a} \left( \sum_{k=1}^{0,3n} P_{n,k}(t) \cdot k \right) dt}{n \cdot \left( T_a - \int_{T_a} P_{SES}(t) \cdot dt \right)} = \frac{\sum_{k=1}^{0,3n} \left( \frac{1}{T_a} \int_{T_a} P_{n,k}(t) \cdot dt \right) \cdot k}{n \cdot (1 - SESR)} \quad (11)$$

Si  $\overline{P_{n,k}} = \frac{\int P_{n,k} \cdot dt}{T_a}$  est fixé, alors le BBER peut être exprimé comme:

$$BBER = \frac{\sum_{k=1}^{0,3n} \overline{P_{n,k}} \cdot k}{n \cdot (1 - SESR)} \quad (12)$$

Cependant, en sélectionnant la valeur de  $BEP_{th}/\alpha$  pour la production des gabarits, l'apparition d'interprétations incorrectes de pointeur (IPI, *incorrect pointer interpretations*), qui est cruciale pour le fonctionnement correct des liaisons SDH, doit être prise en considération. Des mesures ont montré que l'IPI augmente de manière significative vers et au-delà d'une BEP de  $1 \times 10^{-7}$  environ, ce qui est sensiblement plus bas que le niveau auquel les modems de satellite perdent la synchronisation. Cela étant, il faudra procéder à des études additionnelles afin de définir un seuil de BEP pour l'IPI, noté ici  $BEP_{IPI}$ , où la liaison par satellite SDH devient indisponible, puisque cela sera le facteur limitatif. Pour les besoins de la présente Recommandation, une valeur de  $BEP_{th}/\alpha$  (égale à  $BEP_{IPI}/\alpha$  de  $1 \times 10^{-9}$  a été utilisée.

FIGURE 1  
Forme générale du gabarit



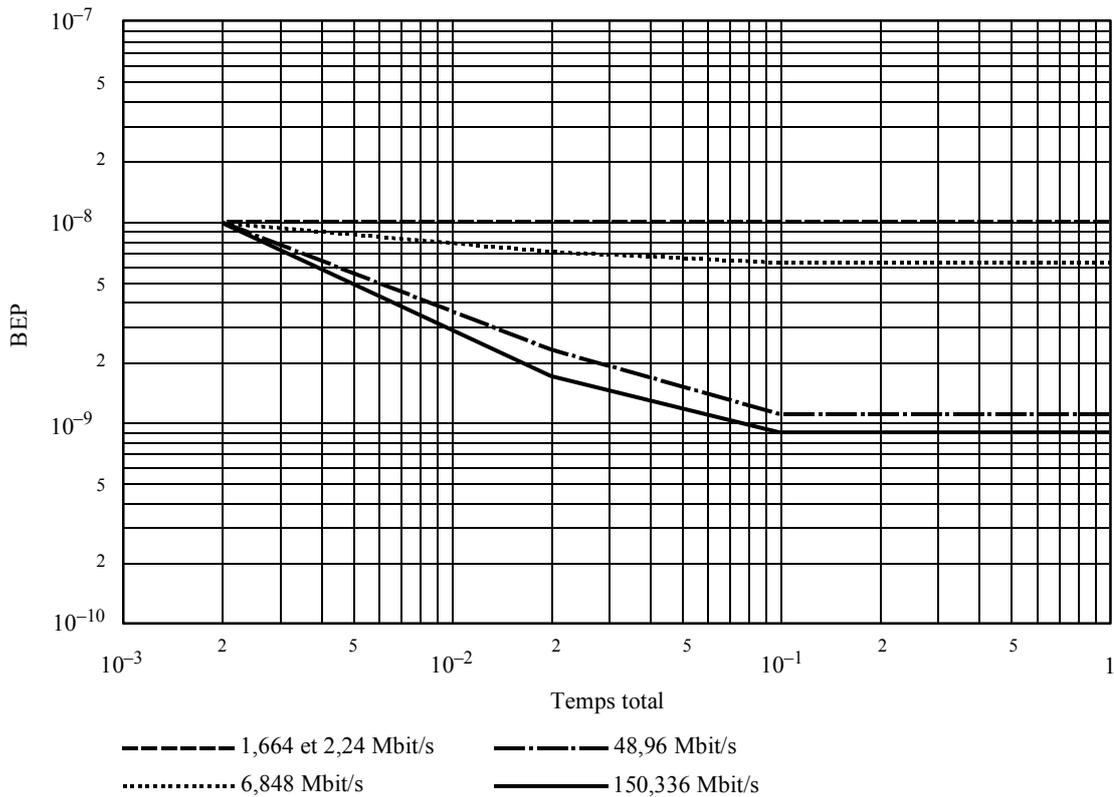
De cette méthode résulteront une infinité de gabarits satisfaisant aux objectifs de qualité de la Recommandation UIT-T G.828. Par conséquent, le processus suivant sera utilisé pour définir un gabarit et pour déterminer les points B, C et D du gabarit (voir la Fig. 2):

- Etape 1:* Fixer la valeur de  $BEP_{th} / \alpha = 1 \times 10^{-9}$ .
- Etape 2:* Fixer la valeur de seuil du temps d'indisponibilité,  $T_{th}$ , ( $T_{th} = 0,2\%$ ) de telle façon que le point A corresponde à la valeur  $BEP_{th} / \alpha$ .
- Etape 3:* Fixer les valeurs du gabarit à 2%, 10% et 100% du temps (points B, C et D).
- Etape 4:* Calculer les valeurs des taux ESR, SESR et BBER par intégration sur le domaine entre  $T_{th}$  (0,2%) et 100%. En établissant ces gabarits, on suppose que la liaison par satellite est indisponible pour des valeurs de BEP situées au-dessus de  $BEP_{th} / \alpha$ .
- Etape 5:* Répéter les Etapes 3 et 4 jusqu'à ce que tous les paramètres (ESR, SESR et BBER) atteignent les objectifs du Tableau 3.

La méthode ci-dessus garantit une indisponibilité de la liaison de 0,2% du temps.

En utilisant la méthode décrite ci-dessus avec les hypothèses additionnelles que les  $BEP/\alpha$  correspondant aux point C et D sont les mêmes, un jeu de gabarits pour divers débits de transmission a été généré en tant qu'exemple, et est représenté sur la Fig. 2.

FIGURE 2  
Gabarits produits pour des bonds par satellite



- - - - - 1,664 et 2,24 Mbit/s      - · - · - · 48,96 Mbit/s  
 ········ 6,848 Mbit/s              ————— 150,336 Mbit/s

$\alpha = 10$   
 Seuil de BEP:  $1 \times 10^{-8}$   
 Temps disponible de 0,002 à 1  
 Tous les modèles dépassent les critères BBER  
 Les modèles pour 1,664 et 2,24 Mbit/s dépassent aussi les critères ESR

### 3 Relation entre le BER et le taux d'événements erronés

Il est bien connu que les erreurs sur les liaisons par satellite utilisant des systèmes FEC et d'embrouillage ont tendance à apparaître par paquets. L'apparition des paquets, que l'on peut aussi appeler événements erronés, suit aléatoirement une distribution de Poisson. Le taux d'erreur sur les blocs résultant est le même que s'il était causé par des erreurs sur les bits aléatoirement distribuées (distribution de Poisson), avec un BER,  $BER/\alpha$ , où  $\alpha$  (utilisé au § 2.1 pour prendre en compte la nature en salve des erreurs) est le nombre moyen de bits erronés dans un paquet,  $\alpha$  représentant aussi le rapport entre le BER et le taux d'événements erronés. Par exemple, dans un canal comportant des erreurs binaires aléatoires pour lequel on n'utilise pas de système FEC ou d'embrouillage,  $\alpha$  est considéré comme étant égal à 1. Toutefois, avec des mécanismes de modulation d'ordre plus élevé,  $\alpha$  peut être supérieur à 1.

Dans un système FEC donné, on peut estimer les valeurs théoriques de  $\alpha$  au moyen de la distribution des poids de ce système. Le calcul des valeurs théoriques est décrit au § 3.1. Les propriétés statistiques des paquets d'erreurs dépendent du système FEC/d'embrouillage utilisé. Des simulations sur ordinateur et des mesures de divers systèmes FEC (sans embrouilleur ou codage différentiel) ont été utilisées pour déterminer  $\alpha$ . 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 paquet

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

$$B^C(H) \triangleq \sum_{i=0}^n B_i H^i \quad (13)$$

où:

$B_i$ : est le nombre (entier) de mots de code avec le poids de Hamming (nombre de uns)  $i$

$H$ : 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:

$$A^C(W, Z) \triangleq \sum_{w,j} A_{w,j} W^w Z^j \quad (14)$$

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:

$$P_b \leq \sum_{m=d_{min}}^{\infty} D_m P(R_m^* | C_0) \quad (15)$$

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:

$$D_m = \sum_{j+w=m} \frac{w}{k} A_{w,j} \tag{16}$$

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

$$\bar{w} = \sum_{m=d_{min}}^{\infty} \sum_{m=w+j} w A_{w,j} P_m \tag{17}$$

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 BEP, on peut obtenir une approximation de  $\bar{w}$  au moyen de la formule suivante:

$$\bar{w} \approx \sum_{d_{min}=w+j} w A_{w,j} P_{d_{min}} \tag{18}$$

### 3.2 Facteurs relatifs aux codes BCH binaires

On peut estimer les valeurs de  $\alpha$  pour des codes BCH systématiques au moyen de l'équation (19) ci-dessous. Le Tableau 5 représente la distribution des poids du code BCH (7,4), la distance minimale du code (7,4) étant de 3. On peut ainsi estimer  $\alpha$  pour ce code de la façon suivante:

$$\bar{w}_{(7,4)} = \alpha_{(7,4)} \approx 1 \times \frac{3}{7} + 2 \times \frac{3}{7} + 3 \times \frac{1}{7} \cong 1,7 \tag{19}$$

TABLEAU 5

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

Le Tableau 6 indique la valeur de  $\alpha$  estimée pour divers codes BCH systématiques, et le Tableau 7 compare les résultats de simulation pour le code BCH (15,11) aux résultats estimés. Plus le BER diminue et plus 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.  $\alpha$  peut alors être approximé par  $k/2$ .

TABLEAU 6

Valeurs théoriques de  $\alpha$  estimées pour différents codes BCH

Code BCH (n,k)	$\alpha$	Code étendu (n,k)	$\alpha$	Code expurgé (n,k)	$\alpha$
(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 7

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

BER	Valeur de $\alpha$ simulée	Valeur de $\alpha$ 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 8 indique les distributions des poids des codes convolutionnels connus, et le Tableau 9 donne une comparaison entre les valeurs de  $\alpha$  estimées de façon théorique et les valeurs de  $\alpha$  simulées. Comme il était confirmé dans les codes BCH binaires, les valeurs de  $\alpha$  estimées sont quasiment égales aux valeurs simulées dans les intervalles de valeurs faibles de BER.

TABLEAU 8

## 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 <sup>(1)</sup>	7	133, 171	6	(1, 16, 48, 158, 642, 2 435, 9 174, ...) (3, 70, 285, 1 276, 6 160, 27 128, ...)
7/8 <sup>(1)</sup>	7	133, 171	3	(2, 42, 468, 4 939, 52 821, ...) (14, 389, 6 792, 97 243, 1 317 944, ...)

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

## 3.4 Facteurs relatifs aux codes concaténés

Pour un code concaténé avec un code externe Reed Solomon (RS) et un code interne convolutionnel, la valeur de  $\alpha$  est directement liée à la distribution des poids du code RS, car le code RS est un code externe. On obtient la valeur de  $\alpha$  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.

TABLEAU 9

Comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs simulées de  $\alpha$  pour des codes convolutionnels

Taux de codage $R$	Longueur de contrainte $K$	Générateur (représentation octale)	$d_f$	$\alpha$ (valeur estimée)	BER	$\alpha$ (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
	9	561, 753	12	3,00	$1,07 \times 10^{-7}$	3,00
					$1,22 \times 10^{-2}$	13,00
					$1,77 \times 10^{-3}$	11,56
					$2,10 \times 10^{-5}$	4,38
2/3	7	133, 171	6	3,00	$4,20 \times 10^{-7}$	3,96
					$3,61 \times 10^{-2}$	8,00
					$7,86 \times 10^{-4}$	7,14
					$2,96 \times 10^{-6}$	5,32
					$2,14 \times 10^{-7}$	5,67

TABLEAU 9 (fin)

Taux de codage $R$	Longueur de contrainte $K$	Générateur (représentation octale)	$d_f$	$\alpha$ (valeur estimée)	BER	$\alpha$ (valeur simulée)
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

Le Tableau 10 indique les valeurs de  $\alpha$  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 en outre le code RS (71,55) abrégé pour une taille de paquet différente.

TABLEAU 10

Valeurs de  $\alpha$  simulées pour codes RS dans le mécanisme de codage concaténé

Code RS ( $n,k$ )	BER	$\alpha$	Code RS ( $n,k$ )	BER	$\alpha$
(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 convolutionnels, car les codes turbo sont fondés sur des codes convolutionnels. Le Tableau 11 indique les distributions des poids des codes turbo spécifiés dans les Recommandations UIT-R BO.1724 et UIT-R S.1709, et le Tableau 12 indique les valeurs de  $\alpha$  estimées correspondantes. Le Tableau 13 donne les valeurs de  $\alpha$  simulées pour des paquets de 53 octets. Etant donné que les codes turbo utilisent un algorithme de décodage itératif, les valeurs de  $\alpha$  et le BER 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  $\alpha$  pour 6 itérations et pour 15 itérations. Etant donné que les valeurs théoriques estimées figurant dans le Tableau 12 peuvent être considérées comme une limite inférieure, elles sont plus petites que les valeurs simulées indiquées dans le Tableau 13.

TABLEAU 11

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 12

Valeurs de  $\alpha$  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 13

Valeurs de  $\alpha$  simulées pour les codes turbo

Nombre d'itérations	$R = 1/3$ BER/ $\alpha$	$R = 2/5$ BER/ $\alpha$	$R = 1/2$ BER/ $\alpha$	$R = 3/4$ BER/ $\alpha$	$R = 6/7$ BER/ $\alpha$
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  $\alpha$  pour un code BTC,  $\alpha_{BTC}$ , peut être représentée comme suit.

$$\alpha_{BTC} = \alpha_{c_1} \cdot \alpha_{c_2} \cdots \alpha_{c_m} \quad (20)$$

où  $\alpha_{c_i}$  est la valeur de  $\alpha$  pour le  $i$ ème code constitutif. Les codes systématiques binaires indiqués au § 3.2 sont généralement utilisés comme codes constitutifs.

Le Tableau 14 donne la valeur de  $\alpha_{BTC}$  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  $\alpha_c$  dans le Tableau 14 sont les mêmes que dans le Tableau 6. Les Tableaux 15 et 16 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 BER.

TABLEAU 14

**Valeurs approchées de façon théorique pour des codes turbo en blocs**

Code étendu ( $n,k$ )	$d_{min}$	$\alpha_c$	$\alpha_{BTC}$ pour un code à 2 dimensions	$\alpha_{BTC}$ 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 15

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

$E_b/N_0$ (dB)	BER	$\alpha_{BTC}$	Code constitutif	
			BER	$\alpha_c$
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 16

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

$E_b/N_0$ (dB)	BER	$\alpha_{BTC}$	Code constitutif	
			BER	$\alpha_c$
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 (FEC  $R = 3/4$  plus embrouillage) ont abouti à une valeur de 10 pour  $\alpha$  pour un BER compris entre  $1 \times 10^{-4}$  et  $1 \times 10^{-11}$ . Au cours des mêmes mesures, on a obtenu une valeur de 5 pour  $\alpha$  dans le cas de transmissions numériques INTELSAT de type IBS (FEC  $R = 1/2$  plus embrouillage).

Il ressort des résultats obtenus que  $\alpha$  est fonction de la distribution des poids du système FEC et du BER. On pourrait évaluer comme suit l'incidence du paramètre  $\alpha$  sur le modèle de qualité de fonctionnement.

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

## 4 Conclusions

Les études ont montré que les gabarits requis pour respecter les prescriptions de la Recommandation UIT-T G.828 dépendent du débit de transmission.

Les gabarits de conception dépendent aussi de la distribution des erreurs, qui dépend à son tour du système FEC/embrouilleur utilisé.

Les exigences de service doivent aussi être prises en compte lors de l'établissement des gabarits de conception.

## 5 Liste des acronymes/abréviations

ATM	Mode de transfert asynchrone ( <i>asynchronous transfer mode</i> )
BBE	Bloc erroné résiduel ( <i>background block error</i> )
BBER	Taux de blocs erronés résiduels ( <i>background block error ratio</i> )
BEP	Probabilité d'erreur binaire ( <i>bit error probability</i> )
BER	Taux d'erreurs binaires ( <i>bit error ratio</i> )
BIP	Parité à entrelacement de bits ( <i>bit interleaved parity</i> )
BTC	Code turbo en blocs ( <i>block turbo code</i> )
CSES	Secondes consécutives avec beaucoup d'erreurs ( <i>consecutive severely errored seconds</i> )

EB	Bloc erroné ( <i>errored block</i> )
EDC	Code de détection d'erreur ( <i>error detection code</i> )
ES	Seconde avec erreur ( <i>errored second</i> )
ESR	Taux de secondes avec erreur ( <i>errored second ratio</i> )
FEC	Correction d'erreur directe ( <i>forward error correction</i> )
HRDP	Conduit numérique fictif de référence ( <i>hypothetical reference digital path</i> )
HRP	Conduit fictif de référence ( <i>hypothetical reference path</i> )
IPI	Interprétations incorrectes de pointeur ( <i>incorrect pointer interpretations</i> )
SDH	Hiérarchie numérique synchrone ( <i>synchronous digital hierarchy</i> )
SEP	Période avec beaucoup d'erreurs ( <i>severely errored period</i> )
SEPI	Fréquence des périodes avec beaucoup d'erreurs ( <i>severely errored period intensity</i> )
SES	Seconde avec beaucoup d'erreurs ( <i>severely errored second</i> )
SESR	Taux de secondes avec beaucoup d'erreurs ( <i>severely errored seconds ratio</i> )
SFS	Service fixe par satellite
STM	Module de transport synchrone ( <i>synchronous transfer module</i> )
TC	Connexion en tandem ( <i>tandem connection</i> )
VC	Conteneur virtuel ( <i>virtual container</i> )

---