



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

**UIT-T**

SECTEUR DE LA NORMALISATION  
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS  
DE L'UIT

**G.8251**

(11/2001)

SÉRIE G: SYSTÈMES ET SUPPORTS DE  
TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX  
NUMÉRIQUES

Réseaux numériques – Objectifs de qualité et de  
disponibilité

---

**Régulation de la gigue et du dérapage dans  
le réseau de transport optique (OTN)**

Recommandation UIT-T G.8251

---

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE G  
**SYSTÈMES ET SUPPORTS DE TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX NUMÉRIQUES**

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIODÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES	G.450–G.499
EQUIPEMENTS DE TEST	G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.600–G.699
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
QUALITÉ DE SERVICE ET DE TRANSMISSION	G.1000–G.1999
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION	G.6000–G.6999
EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.7000–G.7999
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.8000–G.8999
Généralités	G.8000–G.8099
Objectifs de conception pour les réseaux numériques	G.8100–G.8199
<b>Objectifs de qualité et de disponibilité</b>	<b>G.8200–G.8299</b>
Fonctions et capacités du réseau	G.8300–G.8399
Caractéristiques des réseaux à hiérarchie numérique synchrone	G.8400–G.8499
Gestion du réseau de transport	G.8500–G.8599
Intégration des systèmes satellitaires et hertziens à hiérarchie numérique synchrone	G.8600–G.8699
Réseaux de transport optiques	G.8700–G.8799

*Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.*

# Recommandation UIT-T G.8251

## Régulation de la gigue et du dérapage dans le réseau de transport optique (OTN)

### Résumé

La présente Recommandation UIT-T spécifie les limites maximales de réseau pour la gigue et le dérapage qui ne doivent pas être dépassées et la tolérance minimale de gigue et le dérapage de l'équipement que doit posséder toute interface basée sur le réseau de transport optique (OTN, *optical transport network*).

Les spécifications relatives aux caractéristiques de la gigue et du dérapage qui sont données dans la présente Recommandation UIT-T doivent être appliquées afin d'assurer l'interfonctionnement des équipements produits par différents fabricants et une performance du réseau satisfaisante.

### Source

La Recommandation G.8251 de l'UIT-T, élaborée par la Commission d'études 15 (2001-2004) de l'UIT-T, a été approuvée le 29 novembre 2001 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

### Mots clés

Dérapage de sortie, gigue de sortie, horloge d'unité de données de canal optique (ODUk), limites de réseau, plage d'accrochage, plage de décrochage, précision fréquentielle, production de dérapage, production de gigue, tolérance de gigue d'entrée, tolérance de dérapage d'entrée, transfert de gigue.

## AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

## NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

## DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2002

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.

## TABLE DES MATIÈRES

		Page
1	Domaine d'application.....	1
2	Références normatives .....	2
3	Définitions.....	3
4	Abréviations .....	3
5	Limites de réseau pour les valeurs maximales de la gigue et du dérapage de sortie à une interface d'unité de transport de canal optique K (OTUk).....	4
5.1	Limites de réseau pour la gigue.....	5
5.2	Limites de réseau pour le dérapage.....	5
6	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces de réseau .....	5
6.1	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces de réseau OTN.....	5
6.1.1	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces OTU1.....	7
6.1.2	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces OTU2.....	7
6.1.3	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces OTU3.....	8
6.2	Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces client CBR2G5, CBR10G et CBR40G .....	9
	Annexe A – Spécification de l'horloge ODUk (ODC).....	10
A.1	Domaine d'application.....	10
A.2	Applications .....	13
A.3	Précision de fréquence .....	13
A.4	Plages d'accrochage et de décrochage.....	13
A.4.1	Plage d'accrochage .....	13
A.4.2	Plage de décrochage.....	14
A.5	Génération de bruit.....	14
A.5.1	Production de gigue.....	14
A.5.2	Production de dérapage .....	15
A.6	Tolérance de bruit.....	16
A.7	Transfert de gigue.....	16
A.7.1	Transfert de gigue pour l'horloge ODCb.....	16
A.7.2	Transfert de gigue relatif aux horloges ODCr.....	17
A.7.3	Transfert de gigue des horloges ODCp.....	18
A.8	Réponse transitoire.....	18
	Appendice I – Relation entre les prescriptions de gigue d'interface de réseau et la tolérance de gigue du signal d'entrée.....	19
I.1	Prescriptions de gigue d'interface de réseau.....	19
I.2	Tolérance de gigue d'entrée de l'équipement de réseau .....	20

	<b>Page</b>
Appendice II – Effet du réseau de transport optique sur la distribution de la synchronisation par l'intermédiaire des clients STM-N .....	22
II.1    Introduction .....	22
II.2    Chaîne provisoire de référence de synchronisation.....	22
II.3    Limite de réseau de synchronisation .....	23
II.4    Mémoire variable de canal .....	24
II.5    Hystérésis maximale de la mémoire tampon.....	24
Appendice III – Modèle de référence théorique relatif à l'accumulation de gigue d'un régénérateur 3R .....	25
Appendice IV – Etudes de l'accumulation de gigue des régénérateurs 3R .....	26
IV.1    Introduction .....	26
IV.2    Modèle 1.....	27
IV.2.1  Présentation détaillée du modèle.....	28
IV.2.2  Résultats de la modélisation.....	34
IV.2.3  Références (concernant l'Appendice IV) .....	50
IV.3    Modèle 2.....	51
IV.3.1  Introduction .....	51
IV.3.2  Structure des blocs fonctionnels équivalents de la simulation du bruit .....	51
IV.4    Production de gigue des régénérateurs utilisant la conversion parallèle série .....	52
Appendice V – Données générales complémentaires concernant les prescriptions d'erreur de phase et de production de gigue large bande du démappeur (ODCp).....	53
V.1    Introduction .....	53
V.2    Erreur de phase du démappeur .....	53
V.3    Production de gigue large bande du démappeur imputable aux espacements dus à l'en-tête fixe dans la trame OTUk.....	56
Appendice VI – Fonctions atomiques de réseau OTN .....	58
VI.1    Introduction .....	58

## **Introduction**

Dans un réseau de transport optique, la gigue et le dérapage s'accumulent au fur et à mesure de leur production et selon les caractéristiques de transfert de chaque équipement interconnecté. Ces équipements peuvent comprendre, par exemple, des régénérateurs 3R (réamplification, remise en forme et resynchronisation), des mappeurs et des démappeurs/désynchroniseurs de signaux client.

Un taux excessif de gigue et de dérapage peut avoir des effets défavorables sur les signaux aussi bien numériques (production d'erreurs sur les bits, glissement de trames et autres anomalies) qu'analogiques (modulation parasite de la phase du signal transmis). Les conséquences de ces dégradations dépendront en général du service particulier acheminé et de l'équipement terminal ou de l'équipement d'adaptation mis en œuvre.

Il est donc indispensable de fixer des limites aux valeurs maximales de la gigue et du dérapage et à la tolérance minimale correspondante aux interfaces avec le réseau, afin de garantir une qualité des signaux transmis et une conception de l'équipement appropriées.

Ces limites de réseau sont indépendantes du service particulier acheminé.





# Recommandation UIT-T G.8251

## Régulation de la gigue et du dérapage dans le réseau de transport optique (OTN)

### 1 Domaine d'application

Le domaine d'application de la présente Recommandation consiste à définir les paramètres et les valeurs correspondantes qui permettront de limiter de manière satisfaisante le taux de gigue et de dérapage aux interfaces de nœud de réseau de transport optique (NNI, *network-node interface*).

Les interfaces de réseau OTN auxquelles la présente Recommandation s'applique sont définies dans la Rec. UIT-T G.709 en fonction des débits et des structures de trame; les caractéristiques d'équipement correspondantes sont décrites dans la Rec. UIT-T G.798, et les caractéristiques optiques dans la Rec. UIT-T G.959.1. Des informations complémentaires concernant l'architecture du réseau de transport optique sont données dans la Rec. UIT-T G.872.

Les limites de réseau indiquées au § 5, les spécifications de tolérance d'interface indiquées au § 6.1 et les spécifications d'interface d'équipement OTN de l'Annexe A s'appliquent où se rapportent à l'interface OTUk. Les débits correspondant à ces spécifications sont des débits d'unité de transport de canal optique-K. Il est à noter que certaines des autres prescriptions mentionnées dans la présente Recommandation, par exemple à l'Annexe A concernant l'horloge démappeur (ODCp, *demapper clock*), l'horloge mappeur asynchrone (ODCa, *asynchronous mapper clock*), et l'horloge mappeur bit synchrone (ODCb, *bit-synchronous mapper clock*) s'appliquent à d'autres interfaces et à d'autres débits (par exemple le démappeur est inclus dans la fonction puits d'adaptation entre le trajet ODUkP et le client CBR, tandis que les horloges mappeur asynchrone et bit synchrone se trouvent dans la fonction de source d'adaptation entre le trajet ODUkP et le client. Dans la présente Recommandation, le terme *horloge*, utilisé dans l'expression horloge ODU (ODC) désigne une source de fréquence.

La couche Physique réseau de transport optique n'est pas tenue d'acheminer les signaux de synchronisation du réseau. Plus précisément, ni l'unité ODUk ni aucune autre couche au-dessous n'y sont tenues. *La distribution de synchronisation du réseau est une fonction de la couche client, par exemple SDH*. La Rec. UIT-T G.825 indique les spécifications de gigue et de dérapage pour les clients SDH et tout signal SDH (nécessairement conforme aux prescriptions de la Rec. UIT-T G.825) peut assurer une synchronisation (voir Rec. UIT-T G.803). Les clients SDH doivent se conformer aux prescriptions de la Rec. UIT-T G.825 pour les mappages tant asynchrones que bit synchrones.

Les prescriptions de gigue et de dérapage relatives aux réseaux SDH sont spécifiées dans la Rec. UIT-T G.825. Les prescriptions de gigue et de dérapage relatives aux réseaux PDH et aux réseaux de synchronisation sont spécifiées dans la Rec. UIT-T G.823 pour les réseaux basés sur le débit de premier niveau à 2048 kbit/s et dans la Rec. UIT-T G.824 pour les réseaux basés sur le débit de premier niveau à 1544 kbit/s.

La régulation de la gigue et du dérapage est basée sur les principes suivants:

- nécessité de recommander une valeur limite maximale, qui ne devra être dépassée dans aucune interface pertinente du réseau OTN;
- nécessité de recommander un cadre homogène pour la spécification d'équipements numériques particuliers (à savoir les prescriptions quant au transfert, à la tolérance et à la production de gigue et de dérapage);

- nécessité de fournir aux organisations des informations et des directives suffisantes pour mesurer et étudier l'accumulation de la gigue et du dérapage dans une configuration de réseau quelconque.

Il convient de noter la possibilité d'existence d'éléments de réseau de type hybride qui contiennent simultanément des fonctions atomiques de hiérarchie numérique synchrone et de réseau de transport optique; pour ces éléments de réseau, il peut s'avérer impossible d'accéder aux ports respectifs afin d'effectuer les mesures permettant de vérifier la conformité aux prescriptions énoncées dans la présente Recommandation. Les mesures visant à vérifier la conformité des éléments de réseau hybrides ne relèvent pas du domaine d'application de la présente Recommandation.

## 2 Références normatives

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée.

- [1] Recommandation UIT-T G.709/Y.1331 (2001), *Interface de nœud de réseau pour réseau de transport optique.*
- [2] Recommandation UIT-T G.798 (2002), *Caractéristiques des blocs fonctionnels d'équipements en hiérarchie de réseau de transport optique (OTN).*
- [3] Recommandation UIT-T G.959.1 (2001), *Interfaces de couche Physique du réseau optique de transport.*
- [4] Recommandation UIT-T G.825 (2000), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques à hiérarchie numérique synchrone.*
- [5] Recommandation UIT-T G.783 (2000), *Caractéristiques des blocs fonctionnels des équipements de la hiérarchie numérique synchrone.*
- [6] Recommandation UIT-T G.810 (1996), *Définitions et terminologie des réseaux de synchronisation.*
- [7] Recommandation UIT-T G.823 (2000), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques basés sur la hiérarchie à 2048 kbit/s.*
- [8] Recommandation UIT-T G.824 (2000), *Régulation de la gigue et du dérapage dans les réseaux numériques basés sur la hiérarchie à 1544 kbit/s.*
- [9] Recommandation UIT-T G.707/Y.1322 (2000), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone.*
- [10] Recommandation UIT-T G.872 (2002), *Architecture des réseaux de transport optiques.*
- [11] Recommandation UIT-T O.171 (1997), *Appareil de mesure de la gigue et du dérapage de rythme dans les systèmes numériques à hiérarchie numérique plésiochrone.*
- [12] Recommandation UIT-T O.172 (2001), *Appareil de mesure de la gigue et du dérapage dans les systèmes numériques à hiérarchie numérique synchrone.*
- [13] Recommandation UIT-T G.803 (2000), *Architecture des réseaux de transport à hiérarchie numérique synchrone.*
- [14] Recommandation UIT-T G.811 (1997), *Caractéristiques de rythme des horloges de référence primaires.*

### 3 Définitions

Dans la présente Recommandation, les termes et définitions se rapportant au rythme et à la gigue figurent dans les Recs. UIT-T G.810 et G.825, ceux se rapportant aux réseaux de transport optiques figurent dans les Recs. UIT-T G.709, G.798 et G.872, et ceux se rapportant à la hiérarchie numérique synchrone figurent dans les Recs. UIT-T G.707, G.783 et G.803.

### 4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

3R	réamplification, remise en forme et resynchronisation ( <i>reamplification, reshaping and retiming</i> )
A	adaptation
AI	information adaptée ( <i>adapted information</i> )
AIS	signal d'indication d'alarme ( <i>alarm indication signal</i> )
AP	point d'accès ( <i>access point</i> )
CBR	débit constant ( <i>constant bit rate</i> )
CI	information caractéristique ( <i>characteristic information</i> )
CK	horloge ( <i>clock</i> )
CP	point de connexion ( <i>connection point</i> )
D	données
FEC	correction d'erreur directe ( <i>forward error correction</i> )
MC	horloge principale ( <i>master clock</i> )
MTIE	erreur maximale d'intervalle temporel ( <i>maximum time interval error</i> )
NE	élément de réseau ( <i>network element</i> )
NNI	interface de nœud de réseau ( <i>network node interface</i> )
OA	amplificateur optique ( <i>optical amplifier</i> )
OCh	canal optique à fonctionnalité entière ( <i>optical channel with full functionality</i> )
OChr	canal optique à fonctionnalité réduite ( <i>optical channel with reduced functionality</i> )
ODC	horloge d'unité de données optique – k ( <i>ODUk clock</i> )
ODCx	horloge ODUk de type "x" avec x prenant les valeurs "a", "b", "r", ou "p"
ODU	unité de données de canal optique ( <i>optical channel data unit</i> )
ODUk	unité de données de canal optique k ( <i>optical channel data unit-k</i> )
ODUkP	trajet d'unité de données de canal optique k ( <i>ODUk path</i> )
ODUkT	connexion en cascade d'unité de données de canal optique k ( <i>ODUk tandem connection</i> )
OMS	section optique multiplex ( <i>optical multiplex section</i> )
OPU	unité de charge utile optique ( <i>optical channel payload unit</i> )
OPUk	unité de charge utile de canal optique-k ( <i>optical channel payload unit-k</i> )
OTM	module de transport optique ( <i>optical transport module</i> )
OTN	réseau de transport optique ( <i>optical transport network</i> )

OTS	section optique de transmission ( <i>optical transmission section</i> )
OTU	unité de transport de canal optique ( <i>optical channel transport unit</i> )
OTUk	unité de transport sur canal optique entièrement normalisée ( <i>completely standardized optical channel transport unit-k</i> )
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone ( <i>plesiochronous digital hierarchy</i> )
PI	proportionnel et intégral ( <i>proportional plus integral</i> )
PLL	boucle à verrouillage de phase ( <i>phase-locked loop</i> )
PMD	dispersion modale de polarisation ( <i>polarization mode dispersion</i> )
ppm	parties par million ( <i>parts per million</i> )
PRBS	séquence binaire pseudo-aléatoire ( <i>pseudo-random binary sequence</i> )
PRC	horloge de référence primaire ( <i>primary reference clock</i> )
PSD	densité spectrale de puissance ( <i>power spectral density</i> )
rms	écart quadratique moyen ( <i>root mean square</i> )
RS	Reed-Solomon
SDH	hiérarchie numérique synchrone ( <i>synchronous digital hierarchy</i> )
SEC	horloge d'équipement SDH ( <i>SDH equipment clock</i> )
Sk	puits ( <i>sink</i> )
So	source ( <i>source</i> )
SSU	performance de l'unité de synchronisation ( <i>synchronization supply unit</i> )
STM	module de transport synchrone ( <i>synchronous transport module</i> )
STM-N	module de transport synchrone, niveau N ( <i>synchronous transport module-level N</i> )
TCP	point de connexion de terminaison ( <i>termination connection point</i> )
TDEV	écart temporel ( <i>time deviation</i> )
UI	intervalle unitaire ( <i>unit interval</i> )
UIpp	intervalle unitaire crête à crête ( <i>unit interval peak-to-peak</i> )
UTC	temps universel coordonné ( <i>coordinated universal time</i> )
VCO	oscillateur commandé en tension ( <i>voltage-controlled oscillator</i> )
WFM	bruit blanc de fréquence ( <i>white frequency modulation</i> )
WPM	bruit blanc de phase ( <i>white phase modulation</i> )

## 5 Limites de réseau pour les valeurs maximales de la gigue et du dérapage de sortie à une interface d'unité de transport de canal optique K (OTUk)

Les limites de gigue et de dérapage indiquées dans le présent paragraphe correspondent aux valeurs maximales admissibles aux interfaces OTUk avec un réseau de transport optique. L'interface OTUk est située juste au-dessous de la fonction d'adaptation OCh/OTUk sur la Figure 1-3/G.798 [2]. L'entrée d'un régénérateur 3R (puits) ou la sortie d'un régénérateur 3R (source) constitue un exemple de ce type d'interface.

NOTE – La définition précise de l'unité OTUk figure dans la Rec. UIT-T G.709; il s'agit essentiellement du signal numérique mappé dans le canal optique (OCh). Le débit est essentiellement le débit de ligne associé

au canal optique OCh et à la longueur d'onde associée au canal OCh. Les débits OTUk sont indiqués au Tableau 7-1/G.709, et sont égaux aux inverses des périodes binaires indiquées au Tableau 1.

**Tableau 1/G.8251 – Gigue maximale admissible aux interfaces OTUk**

Interface	Largeur de bande du filtre de mesure fréquences à -3 dB (Hz)	Amplitude de crête à crête (UIpp)
OTU1	5 k à 20 M	1,5
	1 M à 20 M	0,15
OTU2	20 k à 80 M	1,5
	4 M à 80 M	0,15
OTU3	20 k à 320 M	6,0
	16 M à 320 M	0,15
NOTE – OTU1 $1 \text{ UI} = \frac{238}{(255)(2,48832)} \text{ ns} = 375,1 \text{ ps}$		
OTU2 $1 \text{ UI} = \frac{237}{(255)(9,95328)} \text{ ns} = 93,38 \text{ ps}$		
OTU3 $1 \text{ UI} = \frac{236}{(255)(39,81312)} \text{ ns} = 23,25 \text{ ps}$		

### 5.1 Limites de réseau pour la gigue

Le Tableau 1 indique les valeurs maximales admissibles du taux de gigue aux interfaces OTUk. La gigue mesurée sur une période de 60 secondes ne doit pas dépasser les limites indiquées au Tableau 1, si l'on utilise les filtres de mesure appropriés. Les limites doivent être respectées dans toutes les conditions de fonctionnement et indépendamment du nombre d'équipements en amont de l'interface. En règle générale, ces limites de réseau sont compatibles avec la tolérance de gigue minimale que doivent avoir tous les accès d'entrée des équipements. Des indications concernant l'obtention des valeurs des paramètres du Tableau 1 sont données à l'Appendice I.

Il existe une relation étroite entre les limites de réseau et la tolérance d'entrée, de telle sorte que les fréquences de coupure des filtres de mesure de la gigue utilisées au Tableau 1 ont les mêmes valeurs que les fréquences d'angle du gabarit de tolérance de gigue du § 6.1. L'Appendice I donne de plus amples informations sur cette relation.

Les filtres de mesure passe-haut dans le Tableau 1 ont une caractéristique du premier ordre et une pente de 20 dB par décade. Les filtres de mesure passe-bas ont une caractéristique de Butterworth la plus uniforme possible et une pente de -60 dB par décade.

### 5.2 Limites de réseau pour le dérapage

Les interfaces OTUk ne sont pas définies comme étant des interfaces de synchronisation. Aucune des horloges ODUk ne sont d'importantes sources de dérapage. Il est inutile de spécifier des limites de réseau pour le dérapage.

## 6 Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces de réseau

### 6.1 Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces de réseau OTN

Le présent paragraphe spécifie la tolérance de gigue et de dérapage des accès d'entrée OTUk. Il s'agit des valeurs minimales de la gigue et du dérapage tolérables à l'entrée de la fonction atomique

OCh/OTUk\_A\_Sk. Cela correspond par exemple à la tolérance de gigue et de dérapage pour un régénérateur 3R. Les accès d'entrée de tous les équipements doivent pouvoir admettre des taux de gigue et de dérapage atteignant au moins les limites minimales définies aux § 6.1.1, 6.1.2 et 6.1.3 pour assurer, en règle générale, la possibilité de raccorder un équipement quelconque à toute interface appropriée dans un réseau.

NOTE 1 – Tel qu'indiqué plus haut, les tolérances de gigue et de dérapage spécifiées s'appliquent à l'accès d'entrée OTUk, qui constitue l'entrée de la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_Sk. Toutefois, bien que les spécifications soient applicables au niveau de cette interface, elles ne sont pas toutes activées par cette fonction atomique. Par exemple, la tolérance de gigue en bande haute (c'est-à-dire la tolérance au-dessus du point de décrochage à la fréquence la plus élevée, soit 1 MHz pour une unité OTU1, 4 MHz pour une unité OTU2 et 16 MHz pour une unité OTU3) est activée par le circuit de récupération du rythme large bande dans la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_Sk; néanmoins, la tolérance de gigue large bande (c'est-à-dire la tolérance entre 5 kHz et 100 kHz pour l'unité OTU1 et entre 20 kHz et 400 kHz pour les unités OTU2 et OTU3) est activée par l'horloge ODCr dans les fonctions atomiques OTUk/ODUk\_A\_So et OTUk/ODUk\_A\_Sk.

La tolérance de gigue et de dérapage d'une interface OTUk indique le niveau minimal de bruit de phase que l'accès d'entrée doit accepter:

- sans provoquer d'alarme;
- sans provoquer de glissement ni de perte d'horloge dans la boucle verrouillée en phase de récupération du rythme;
- sans provoquer d'erreur sur les bits supérieure à celle admise pour une réduction équivalente en puissance optique de 1 dB.

La limite du dérapage tolérable en entrée est mesurée par la méthode dite de réduction équivalente en puissance optique de 1 dB, en procédant comme suit:

la puissance optique d'entrée est réduite jusqu'à ce que soit atteint un BER de  $10^{-10}$ . Ensuite, la puissance est augmentée de 1 dB et la gigue est appliquée au signal d'entrée. La quantité de gigue qui se traduit par un BER de  $10^{-10}$  est égale à la limite de gigue d'entrée tolérable. Si le système utilise la correction d'erreur directe, celle-ci doit être désactivée pour effectuer les mesures, en cas d'utilisation d'un équipement externe de détection d'erreur sur les bits. Sinon, il est possible de mesurer le BER sans désactiver la correction d'erreur directe et en comptant le nombre d'erreurs sur les bits corrigées par une unité de temps.

NOTE 2 – Cette définition doit faire l'objet d'un complément d'étude, de façon à tenir compte par exemple des amplificateurs optiques, de la dispersion de polarisation de mode, et de la correction d'erreur directe.

Tous les accès d'entrée OTUk des équipements doivent être en mesure d'accepter un signal OCh\_AI\_D qui possède:

- a) des caractéristiques optiques conformes à la Rec. UIT-T G.959.1;
- b) un décalage de fréquence (par rapport à la valeur nominale) inférieur à celui défini à la Rec. UIT-T A.3;
- c) un écart de phase sinusoïdale dont la relation amplitude-fréquence définie ci-après permet d'obtenir les limites appropriées pour les différentes interfaces.

En principe, ces prescriptions doivent être observées quel que soit le contenu informationnel du signal numérique. Toutefois, aux fins des essais, le contenu du signal dont la gigue et le dérapage sont modulés doit consister en une séquence d'essai structurée conforme à la définition indiquée dans la Rec. UIT-T G.709.

Pour la commodité des essais, la tolérance prescrite est définie en fonction de l'amplitude crête à crête et de la fréquence de la gigue sinusoïdale qui module une configuration numérique d'essai. Il est important de ne pas perdre de vue que cette condition d'essai n'est pas, en elle-même, destinée à représenter le type de gigue que l'on rencontre en pratique dans un réseau.

Des directives concernant le dispositif de mesure de la tolérance de gigue et de dérapage d'entrée sont données à l'Appendice III/G.823.

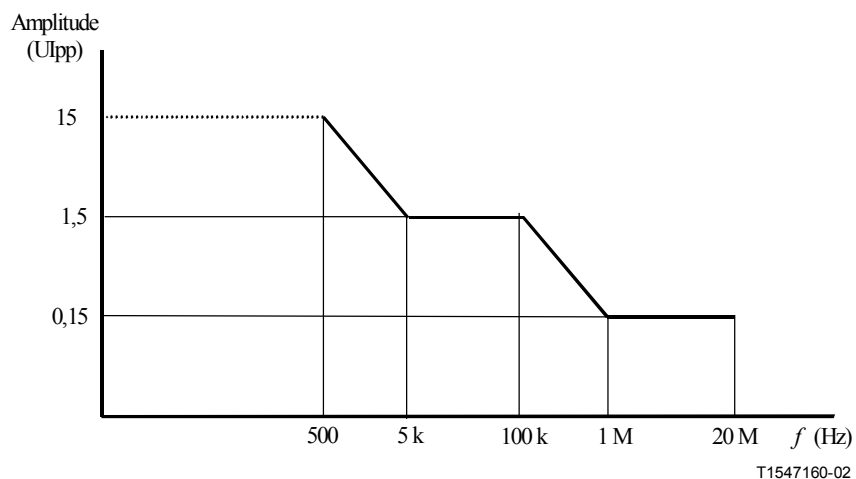
Les paragraphes suivants indiquent les tolérances de gigue et de dérapage pour chaque débit OTUk. Ces prescriptions indiquent les valeurs minimales du taux de gigue qui doivent être acceptées à une interface OTUk.

### 6.1.1 Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces OTU1

Le Tableau 2 spécifie les taux de gigue sinusoïdale que doivent accepter les interfaces OTU1; ce niveau est représenté à la Figure 1. Une boucle à verrouillage de phase avec une fréquence d'angle supérieure ou égale à 5 kHz qui peut admettre une gigue et un dérapage indiqués par la partie inclinée de 20 dB/décade du gabarit entre 500 Hz et 5 kHz tolérera également la gigue et le dérapage indiqués par un prolongement de la partie inclinée vers les fréquences basses, parce que cette gigue et ce dérapage seront compris dans la largeur de bande de la boucle à verrouillage de phase. Les interfaces OTU1 doivent admettre cette gigue et ce dérapage, mais pour des raisons pratiques, il n'est pas obligatoire de les mesurer au-dessous de 500 Hz.

**Tableau 2/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée pour interface OTU1**

Fréquence $f$ (Hz)	Amplitude crête à crête (UIpp)
$500 < f \leq 5 \text{ k}$	$7500 f^{-1}$
$5 \text{ k} < f \leq 100 \text{ k}$	1,5
$100 \text{ k} < f \leq 1 \text{ M}$	$1,5 \times 10^5 f^{-1}$
$1 \text{ M} < f \leq 20 \text{ M}$	0,15



**Figure 1/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée pour interface OTU1**

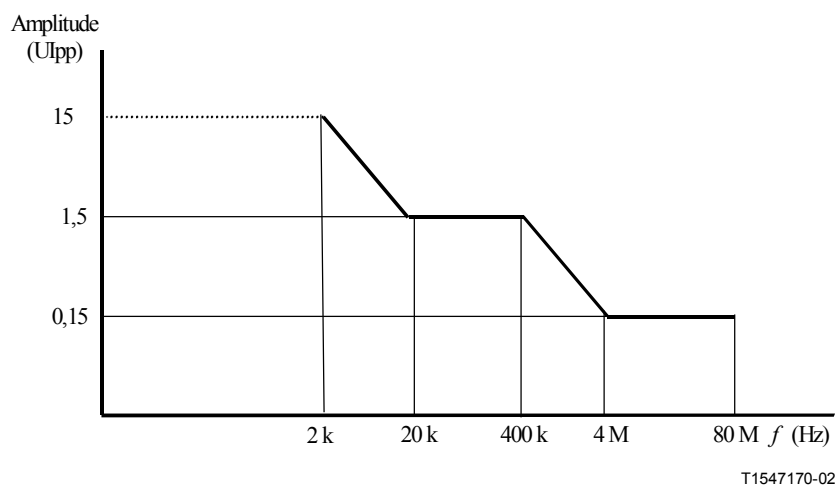
### 6.1.2 Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces OTU2

Le taux de gigue sinusoïdale que doivent accepter les interfaces OTU2 est spécifié au Tableau 3 et illustré à la Figure 2. Une boucle à verrouillage de phase avec une fréquence d'angle supérieure ou égale à 20 kHz qui peut admettre une gigue et un dérapage indiqués par la partie inclinée de 20 dB/décade du gabarit entre 2 kHz et 20 kHz tolérera également la gigue et le dérapage indiqués par un prolongement de la partie inclinée vers les fréquences basses, parce que cette gigue et ce

dérage seront compris dans la largeur de bande de la boucle à verrouillage de phase. Les interfaces OTU2 doivent admettre cette gigue et ce dérage, mais pour des raisons pratiques, il n'est pas obligatoire de les mesurer au-dessous de 2 kHz.

**Tableau 3/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée des interfaces OTU2**

Fréquence $f$ (Hz)	Amplitude crête à crête (UIpp)
$2 \text{ k} < f \leq 20 \text{ k}$	$3,0 \times 10^4 f^{-1}$
$20 \text{ k} < f \leq 400 \text{ k}$	1,5
$400 \text{ k} < f \leq 4 \text{ M}$	$6,0 \times 10^5 f^{-1}$
$4 \text{ M} < f \leq 80 \text{ M}$	0,15



**Figure 2/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée des interfaces OTU2**

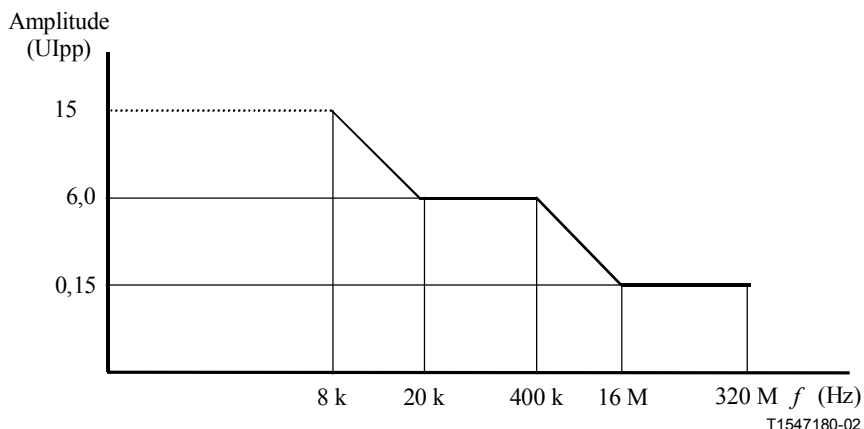
### 6.1.3 Tolérance de gigue et de dérage des interfaces OTU3

Le taux de gigue sinusoïdale que doivent accepter les interfaces OTU3 est spécifié au Tableau 4 et illustré à la Figure 3. Une boucle à verrouillage de phase avec une fréquence d'angle supérieure ou égale à 20 kHz qui peut admettre une gigue et un dérage indiqués par la partie inclinée de 20 dB/décade du gabarit entre 8 kHz et 20 kHz tolérera également la gigue et le dérage indiqués par un prolongement de la partie inclinée vers les fréquences basses, parce que cette gigue et ce dérage seront compris dans la largeur de bande de la boucle à verrouillage de phase. Les interfaces OTU3 doivent admettre cette gigue et ce dérage, mais pour des raisons pratiques, il n'est pas obligatoire de les mesurer au-dessous de 8 kHz.



**Tableau 4/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée des interfaces OTU3**

Fréquence $f$ (Hz)	Amplitude crête à crête (UIpp)
$8\text{ k} < f \leq 20\text{ k}$	$1,2 \times 10^5 f^{-1}$
$20\text{ k} < f \leq 400\text{ k}$	6,0
$400\text{ k} < f \leq 16\text{ M}$	$2,4 \times 10^6 f^{-1}$
$16\text{ M} < f \leq 320\text{ M}$	0,15



**Figure 3/G.8251 – Limite de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée des interfaces OTU3**

## 6.2 Tolérance de gigue et de dérapage des interfaces client CBR2G5, CBR10G et CBR40G

Les tolérances de gigue et de dérapage, et les limites de réseau spécifiées pour les signaux CBR2G5, CBR10G et CBR40G sont déduites des prescriptions correspondantes relatives aux signaux STM-16 et STM-64, respectivement, indiquées dans la Rec. UIT-T G.825.

NOTE – Les prescriptions de tolérance de gigue et de dérapage, ainsi que les limites de réseau pour les signaux STM-256 ne figurent pas actuellement dans la Rec. UIT-T G.825; toutefois, elles figureront probablement dans de futures versions de celle-ci.

Les ports d'accès STM, c'est-à-dire l'accès aux fonctions atomiques ODUkP/CBRx-a\_A\_So et ODUkP/CBRx-b\_A\_So, lorsque les interfaces STM-16, STM-64 ou STM-256 constituent l'interface client STM, doivent accepter les taux de gigue et de dérapage spécifiés dans la Rec. UIT T G.825. L'Appendice III/G.823 contient des directives concernant la mesure de la tolérance de gigue et de dérapage d'entrée des interfaces d'équipement.

## Annexe A

### Spécification de l'horloge ODUk (ODC)

#### A.1 Domaine d'application

La présente annexe contient les spécifications relatives à l'horloge ODUk (ODC). Ci-dessous, le terme *horloge* désigne un circuit de filtrage et/ou de génération d'horloge. Quatre types d'horloge ODC sont définis, pour différentes applications (voir A.2):

- 1) ODCa pour le mappage asynchrone de clients en ODUk;
- 2) ODCb pour le mappage bit synchrone de clients en ODUk;
- 3) ODCr pour la régénération 3R;
- 4) ODCp pour le démappage de clients à débit constant (CBR, *constant bit rate*).

Les horloges ODCa et ODCb génèrent le signal de rythme pour les signaux ODUk et OTUk produits par un élément de réseau de transport optique. Les horloges ODCr génèrent le signal de rythme pour les signaux OTUk produits par un régénérateur 3R. L'horloge ODCp génère le signal de rythme nécessaire à un signal client démappé à débit constant.

Les quatre types d'horloge ODC, les fonctions atomiques dans lesquelles elles sont situées et les prescriptions correspondantes applicables, sont récapitulés au Tableau A.1. Les paragraphes suivants présentent ces prescriptions de façon plus détaillée.

**Tableau A.1/G.8251 – Récapitulation des types d'horloge ODUk (ODC)**

	<b>ODCa</b>	<b>ODCb</b>	<b>ODCr</b>	<b>ODCp</b>
Fonction atomique	ODUkP/CBRx-a_A_So ODUkP/ATM_A_So ODUkP/GFP_A_So ODUkP/NULL_A_So ODUkP/PRBS_A_So ODUkP/non-specific-client-bitstream_A_So	ODUkP/CBRx-b_A_So	OTUk/ODUk_A_So et OTUk/ODUk_A_Sk (autrement dit, les horloges de ces fonctions atomiques sont concentrées dans une seule et unique horloge ODCr; voir Rec. UIT-T G.798)	ODUkP/CBRx_A_Sk
Précision de fréquence	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm
Prise en charge du mode de fonctionnement libre	Oui	Oui	Oui	Oui
Prise en charge du mode verrouillé	Non	Oui	Oui	Oui
Prise en charge du mode conservatoire	Non	Non	Non	Non
Plage d'accrochage	S/O	± 20 ppm	± 20 ppm	± 20 ppm
Plage de décrochage	S/O	± 20 ppm	± 20 ppm	± 20 ppm
Production de gigue	Tableau A.2	Tableau A.2	Tableau A.2	Tableau A.3
Production de dérapage	S/O	S/O (Note 1)	S/O	S/O (Note 2)
Tolérance de gigue	S/O	Rec. UIT-T G.825	Tableau 2/G.8251, Figure 1/G.8251 (OTU1); Tableau 3/G.8251, Figure 2/G.8251 (OTU2); Tableau 4/G.8251, Figure 3/G.8251 (OTU3)	Tableau 2, Figure 1 (OTU1); Tableau 3, Figure 2 (OTU2); Tableau 4, Figure 3 (OTU3)
Tolérance de dérapage	S/O	Rec. UIT-T G.825	§ 6.1	§ 6.1

**Tableau A.1/G.8251 – Récapitulation des types d'horloge ODUk (ODC)**

	<b>ODCa</b>	<b>ODCb</b>	<b>ODCr</b>	<b>ODCp</b>
Transfert de gigue	S/O	Largeur de bande maximale: ODU1: 1 kHz ODU2: 4 kHz ODU3: 16 kHz Crêtage maximal du gain: 0,1 dB pour ODU1, 2 et 3 (voir Tableau A.4 et Figure A.1)	Largeur de bande maximale: OTU1: 250 kHz OTU2: 1000 kHz OTU3: 4000 kHz Crêtage maximal du gain: 0,1 dB pour OTU1, 2 et 3 (voir Tableau A.5 et Figure A.1)	Largeur de bande maximale: 300 Hz pour ODU1, 2 et 3 Crêtage maximal du gain: 0,1 dB pour ODU1, 2 et 3 (voir § A.6.3)
Sortie en cas de perte du signal d'entrée	AIS (SDH client) OTUk: pas de variation brusque de trame Fréquence OTUk inchangée	Signal d'indication d'alarme AIS (SDH client) OTUk: pas de variation brusque de trame Modification de la fréquence initiale OTUk ≤9 ppm	AIS (OTUk) OTUk: variation brusque de trame admise Décalage de fréquence OTUk temporaire >20 ppm admis	AIS (SDH client) Décalage de fréquence ≤20 ppm
S/O Pas de spécification (sans objet)				
NOTE 1 – La production de dérapage de l'horloge ODCb est censée être négligeable par comparaison au dérapage du signal client d'entrée à débit constant (par exemple SDH), parce que la largeur de bande de l'horloge ODCb est relativement large.				
NOTE 2 – La production intrinsèque de dérapage de l'horloge ODCp est négligeable par comparaison au dérapage produit par le processus de démappage.				

Les signaux de rythme de sortie au niveau des couches inférieures sont obtenus à partir des signaux ODUkP\_AI\_CK (c'est-à-dire à partir des signaux de sortie des horloges ODCa, ODCb, ou ODCr) par multiplication de fréquence. Par exemple, le signal de rythme OTUk est constitué par le signal OTUk\_AI\_CK, obtenu à la sortie de la fonction atomique OTUk/ODUk\_A\_So (voir § 13.3.1.1/G.798), lui-même obtenu à partir de ODUk\_CI\_CK (information caractéristique de l'unité ODUk; la fréquence de ce signal est identique à celle de ODUkP\_AI\_CK) par multiplication de fréquence (facteur 255/239). Le signal OTUk\_AI\_CK fournit le signal de rythme d'entrée à la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_So, dont la sortie est constituée par le signal de données OCh (OCh\_AI\_D).

NOTE – Dans le cas d'un mappage asynchrone, une horloge principale unique n'est pas obligatoire (par exemple une seule horloge ODCa) dans l'équipement de réseau de transport optique. En effet ces équipements peuvent être munis de plusieurs horloges ODCa indépendantes, pour chaque longueur d'onde de signal de sortie (par exemple pour la source de chaque OCh, OTUk, et ODUk). En cas de mappage bit synchrone, de régénération 3R et de démappage, il ne peut y avoir une horloge principale unique pour plusieurs OCh (autrement dit une horloge ODCb, ODCr, ou ODCp fournit des signaux de rythme respectivement à une seule unité ODUk, OTUk, ou à un client à débit constant).

## **A.2 Applications**

Les horloges ODCa et ODCb servent au mappage de la charge utile du signal ODUk; l'horloge ODCr sert à la régénération 3R; l'horloge ODCp est utilisée dans le démappeur à débit constant.

L'horloge ODCa, utilisée pour le mappage asynchrone est en fonctionnement libre et le décalage de débit est compensé par un bourrage approprié.

L'horloge ODCb, utilisée pour le mappage bit synchrone, est verrouillée sur le débit du signal de charge utile entrant et le décalage de débit est compensé par une séquence de remplissage fixe. L'opération synchrone est poursuivie même lorsque le contenu de la charge utile reçue est le signal AIS. Si le signal entrant disparaît, l'horloge ODC passe en mode de fonctionnement libre.

L'horloge ODCr, utilisée pour la régénération 3R, est verrouillée sur le débit du signal OCh\_AP entrant (y compris le signal AIS). Si le signal entrant disparaît, l'horloge ODC passe en mode de fonctionnement libre.

L'horloge ODCp, utilisée pour le démappeur à débit constant, est verrouillée sur le débit du signal d'horloge "à espacements" (ou "lacunaire") OPUk (c'est-à-dire le rythme du signal résultant de l'acheminement de la charge utile OPUk, après exécution de la commande de justification). En cas de défaillance du signal d'entrée, l'horloge ODCp passe en mode de fonctionnement libre.

## **A.3 Précision de fréquence**

En fonctionnement libre, la précision de fréquence de sortie d'une horloge ODCa, ODCb, ODCr et ODCp doit être d'au moins 20 ppm par rapport à une horloge de référence spécifiée dans la Rec. UIT-T G.811.

## **A.4 Plages d'accrochage et de décrochage**

### **A.4.1 Plage d'accrochage**

La plage minimale d'accrochage des horloges ODCb, ODCr et ODCp doit être de  $\pm 20$  ppm, quel que soit le décalage de fréquence de l'oscillateur interne. La plage d'accrochage d'une horloge ODCa ne fait l'objet d'aucune prescription, puisqu'elle est en fonctionnement libre.

## A.4.2 Plage de décrochage

La plage de décrochage minimale des horloges ODCb, ODCr et ODCp doit être de  $\pm 20$  ppm, quel que soit le décalage de fréquence de l'oscillateur interne. La plage de décrochage d'une horloge ODCa ne fait l'objet d'aucune spécification puisqu'elle est en fonctionnement libre.

## A.5 Génération de bruit

Le présent paragraphe a pour effet de limiter la gigue et le dérapage de sortie pour chaque type d'horloge applicable, en l'absence de toute gigue ou dérapage du signal d'entrée. Il est à signaler que les signaux respectivement d'entrée et de sortie dépendent du type d'horloge, puisque différents types d'horloge correspondent à différentes fonctions atomiques.

### A.5.1 Production de gigue

#### A.5.1.1 Génération de gigue d'horloges ODCa, ODCb et ODCr

En l'absence de gigue du signal d'entrée, la gigue du signal de sortie des horloges ODCa et ODCb, c'est-à-dire le signal ODUkP\_AI\_CK, ne doit pas dépasser les valeurs prescrites au Tableau A.2, les mesures étant effectuées sur un intervalle de 60 secondes, au moyen des filtres spécifiés. Puisque l'horloge ODCa est en fonctionnement libre, il n'y a par définition aucune gigue du signal d'entrée. En ce qui concerne l'horloge ODCb, le signal client d'entrée est exempt de gigue.

**Tableau A.2/G.8251 – Prescriptions de production de gigue des horloges ODCa, ODCb et ODCr**

Interface	Largeur de bande du filtre de mesure, Fréquence à -3 dB (Hz)	Amplitude crête à crête (UIpp) (Note 2)
ODU1, OTU1	5 k à 20 M	0,3
	1 M à 20 M	0,1
ODU2, OTU2	20 k à 80 M	0,3
	4 M à 80 M	0,1
ODU3, OTU3	20 k à 320 M	1,2 (Note 1)
	16 M à 320 M	0,1
NOTE 1 – Voir IV.4 où figurent les informations complémentaires.		
NOTE 2 – OTU1	$1 \text{ UI} = \frac{238}{(255)(2,48832)} \text{ ns} = 375,1 \text{ ps}$	
OTU2	$1 \text{ UI} = \frac{237}{(255)(9,95328)} \text{ ns} = 93,38 \text{ ps}$	
OTU3	$1 \text{ UI} = \frac{236}{(255)(39,81312)} \text{ ns} = 23,25 \text{ ps}$	

En l'absence de gigue du signal d'entrée d'un régénérateur 3R (c'est-à-dire d'une fonction atomique OCh/OTUk\_A\_Sk), la gigue de sortie de l'information d'horloge du signal de sortie OCh\_AI\_D de la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_So ne doit pas dépasser les valeurs spécifiées au Tableau A.2, lesquelles sont mesurées au cours d'un intervalle de 60 secondes, au moyen des filtres de mesure spécifiés dans ce tableau. Le signal qui doit être exempt de gigue d'entrée lorsque cette mesure est effectuée, est le signal OCh\_AI\_D appliqué à l'entrée de la fonction atomique correspondante OCh/OTUk\_A\_Sk. Plus précisément, c'est l'information d'horloge contenue dans ce signal qui doit être exempte de gigue d'entrée.

NOTE – Il s'agit effectivement d'une prescription applicable à la production de gigue d'un régénérateur 3R; elle a pour effet de limiter la production totale de gigue dans toutes les fonctions atomiques de OCh/OTUk\_A\_Sk à OCh/OTUk\_A\_So (inclusive). Cette prescription s'étend en outre à l'horloge ODCr, celle-ci étant comprise dans les fonctions atomiques OTUk/ODUk\_A\_So et OTUk/ODUk\_A\_Sk (autrement dit les horloges de ces fonctions atomiques sont concentrées dans une seule et unique horloge ODCr; voir la Rec. UIT-T G.798).

### A.5.1.2 Production de gigue des horloges ODCp

En l'absence de gigue du signal d'entrée, la gigue du signal de sortie d'horloge ODCp, c'est-à-dire le signal STM\_CI\_CK, ne doit pas dépasser les valeurs spécifiées au Tableau A.3 lorsque la mesure est réalisée sur un intervalle de 60 secondes avec les filtres de mesure spécifiés dans ce tableau. Il est à noter que le signal de sortie est appliqué à l'interface CBRx\_CP. Les prescriptions doivent être observées lorsque la fréquence d'entrée du client STM-N est constante à  $\pm 20$  ppm autour de la fréquence nominale.

Les prescriptions de production de gigue large bande des horloges ODCp ont notamment pour objectif d'assurer que les espacements dus à l'en-tête (ou surdébit) fixe de la trame OTUk ne provoqueront pas une gigue de sortie excessive. Des indications complémentaires à ce sujet figurent au V.3.

**Tableau A.3/G.8251 – Prescriptions de production de gigue d'horloge ODCp**

Interface	Largeur de bande du filtre de mesure, fréquences à -3 dB (Hz)	Amplitude crête à crête (UIpp) (Note 2)
STM-16	5 k à 20 M	1,0
	1 M à 20 M	0,1
STM-64	20 k à 80 M	1,0
	4 M à 80 M	0,1
STM-256	80 k à 320 M (Note 1)	1,0
	16 M à 320 M	0,1
NOTE 1 – Les valeurs concernant l'interface STM-256 sont provisoires et ne figurent pas dans la Rec. UIT-T G.825 au moment de la publication de la Rec. UIT-T G.8251.		
NOTE 2 – OTU1	$1 \text{ UI} = \frac{238}{(255)(2,48832)} \text{ ns} = 375,1 \text{ ps}$	
OTU2	$1 \text{ UI} = \frac{237}{(255)(9,95328)} \text{ ns} = 93,38 \text{ ps}$	
OTU3	$1 \text{ UI} = \frac{236}{(255)(39,81312)} \text{ ns} = 23,25 \text{ ps}$	

### A.5.2 Production de dérapage

Les horloges ODCa, ODCb, ODCr et ODCp ne donnent lieu à aucune spécification de production de dérapage. Pour ODCb, toute production intrinsèque de dérapage est censée être négligeable par comparaison au dérapage sur le signal client d'entrée à débit constant (par exemple SDH), en raison de l'importance relativement grande de la largeur de bande ODCb. La production intrinsèque de dérapage de l'horloge ODCp est négligeable par rapport au dérapage créé par le démappage.

## A.6 Tolérance de bruit

Le présent paragraphe spécifie la tolérance de gigue et de dérapage concernant les horloges ODCb, ODCr et ODCp. L'horloge ODCa est en fonctionnement libre et ne fait l'objet d'aucune prescription concernant la tolérance de gigue ou de dérapage.

L'horloge ODCb doit observer les mêmes prescriptions concernant la tolérance de gigue et de dérapage que les interfaces client STM-16, STM-64 et STM-256 (entrées de la fonction atomique ODUkP/CBRx-b\_A\_So). Ces prescriptions sont indiquées au § 6.2, qui se réfère à la Rec. UIT-T G.825. Il convient de noter que l'horloge ODCb est incluse dans la fonction atomique ODUkP/CBRx-b\_A\_So.

Les horloges ODCr et ODCp doivent observer les mêmes prescriptions quant à la tolérance de gigue et de dérapage que les accès d'entrée OTUk (entrée de la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_Sk). Ces prescriptions figurent au § 6.1 et dans les sous-paragraphe correspondants. Il est à noter que l'horloge ODCr est incluse dans les fonctions atomiques OTUk/ODUk\_A\_So et OTUk/ODUk\_A\_Sk et que l'horloge ODCp est incluse dans la fonction atomique ODUkP/CBRx\_A\_Sk.

## A.7 Transfert de gigue

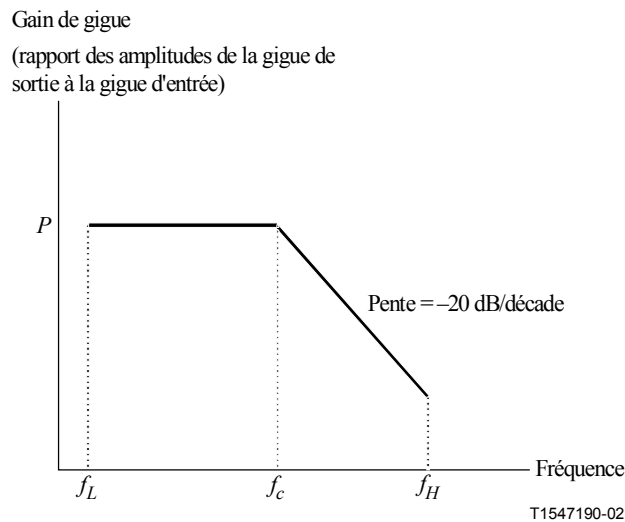
Le présent paragraphe spécifie le transfert de gigue des horloges ODCb, ODCr et ODCp. L'horloge ODCa ne fait l'objet d'aucune spécification de transfert de gigue puisqu'elle est en fonctionnement libre.

### A.7.1 Transfert de gigue pour l'horloge ODCb

La fonction de transfert de gigue pour horloge ODCb est définie comme le rapport des amplitudes de la gigue sinusoïdale en sortie et en entrée, en fonction de la fréquence. L'entrée et la sortie ODCb sont constituées respectivement par le signal CBRx\_CI\_CK au niveau de la fonction atomique ODUkP/CBRx-b\_A\_So, et par signal CBRx\_AI\_CK au niveau de la fonction atomique ODUkP/CBRx-b\_A\_So.

Le graphe de la fonction de transfert de gigue de l'horloge ODCb doit se trouver au-dessous de la courbe indiquée à la Figure A.1 lorsque l'on applique une gigue sinusoïdale d'entrée d'une amplitude inférieure ou égale au gabarit correspondant référencé au § A.6. Les paramètres de la Figure A.1 sont indiqués au Tableau A.4. Le paramètre  $f_C$  peut être considéré comme la largeur de bande maximale de l'horloge ODCb et le paramètre  $P$  comme le crêtage maximal du gain de l'horloge ODCb. La limite de transfert de gigue est spécifiée entre les fréquences  $f_L$  et  $f_H$ . La limite de transfert de gigue n'est pas spécifiée pour les fréquences supérieures à  $f_H$ , ni pour les fréquences inférieures à  $f_L$ .





**Figure A.1/G.8251 – Transfert de gigue ODCb**

**Tableau A.4/G.8251 – Prescription de transfert de gigue d'horloge ODCb**

Niveau ODUk	$f_L$ (Hz)	$f_C$ (kHz)	$f_H$ (kHz)	$P$ (dB)	Gabarit d'entrée
ODU1	10	1	100	0,1	§ A.6
ODU2	40	4	400	0,1	§ A.6
ODU3	160	16	1600	0,1	§ A.6

### A.7.2 Transfert de gigue relatif aux horloges ODCr

Les prescriptions de transfert de gigue relatives aux horloges ODCr sont essentiellement identiques aux prescriptions de transfert concernant un régénérateur 3R. Tandis que le régénérateur 3R inclut toutes les fonctions atomiques entre les fonctions d'adaptation OCh/OTUk\_A\_Sk et OCh/OTUk\_A\_So, et comprend le circuit de récupération du rythme large bande dans la fonction OCh/OTUk\_A\_Sk, la largeur de bande d'horloge ODCr (comprise dans les fonctions atomiques OTUk/ODUk\_A\_So et OTUk/ODUk\_A\_Sk) est en pratique nettement plus étroite que toutes les autres largeurs de bande présentes dans le régénérateur et détermine par conséquent les caractéristiques de transfert. Puisque la largeur de bande ODCr est nettement supérieure à 10 Hz (c'est-à-dire la limite supérieure de la zone de dérapage, les régénérateurs transfèrent le dérapage sans affaiblissement); il n'y a donc aucune prescription explicite de transfert de dérapage.

La fonction de transfert de gigue d'un régénérateur 3R est définie comme le rapport des amplitudes de la gigue sinusoïdale de sortie et d'entrée, en fonction de la fréquence. L'entrée et la sortie du régénérateur 3R sont constituées respectivement par le signal OCh\_AI\_D au niveau de la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_Sk et par le signal OCh\_AI\_D au niveau de la fonction atomique OCh/OTUk\_A\_So. Il est à noter que le transfert de gigue n'est pas associé à une fonction atomique unique; en fait, il est associé à l'ensemble des fonctions atomiques comprises entre et incluant les fonctions puits et source d'adaptation OCh/OTUk. Normalement, au moins une partie de la fonction de régénération 3R doit s'effectuer dans le cadre de la fonction OCh/OTUk\_A\_Sk puisqu'il faut rétablir un signal de rythme. Toutefois, les prescriptions de transfert de gigue et de tolérance de gigue impliquent la présence d'une deuxième boucle à verrouillage de phase à largeur de bande plus étroite; cette boucle à verrouillage de phase est située dans l'horloge ODCr, contenue dans les fonctions atomiques OTUk/ODUk\_A\_So et OTUk/ODUk\_A\_Sk.

Le graphe de la fonction de transfert de gigue d'un régénérateur 3R doit être situé au-dessous de la courbe indiquée à la Figure A.1, en cas d'application d'une gigue sinusoïdale d'entrée inférieure aux

gabarits indiqués respectivement aux Figures 1, 2 et 3 correspondant aux niveaux OTU1, OTU2 et OTU3. Les paramètres de la Figure A.1 sont indiqués au Tableau A.5. Il est à noter que le paramètre  $f_C$  peut être considéré comme la largeur de bande maximale du régénérateur 3R, et le paramètre  $P$  comme le crêtage maximal du gain du régénérateur 3R. La limite de transfert de gigue est spécifiée entre les fréquences  $f_L$  et  $f_H$ . La limite de transfert de gigue n'est spécifiée ni pour les fréquences supérieures à  $f_H$ , ni pour les fréquences inférieures  $f_L$ .

**Tableau A.5/G.8251 – Prescription de transfert de gigue d'horloge ODCr**

Niveau ODUk	$f_L$ (Hz)	$f_C$ (kHz)	$f_H$ (kHz)	$P$ (dB)	Gabarit d'entrée
OTU1	2,5	250	20	0,1	Figure 1, Tableau 2
OTU2	10	1000	80	0,1	Figure 2, Tableau 3
OTU3	40	4000	320	0,1	Figure 3, Tableau 4

### A.7.3 Transfert de gigue des horloges ODCp

Les prescriptions de transfert de gigue des horloges ODCp sont essentiellement identiques aux prescriptions de transfert d'un démappeur (c'est-à-dire un désynchroniseur) à débit constant (c'est-à-dire SDH). La fonction de démappage, y compris l'horloge ODCp, est contenue dans la fonction atomique ODUkP/CBRx\_A\_Sk. L'horloge ODCp effectue le filtrage nécessaire pour éviter l'accumulation de gigue et de dérapage de mappage/démappage sur plusieurs îlots du réseau de transport optique.

La largeur de bande à 3 dB du désynchroniseur ne doit pas dépasser 300 Hz. Le crêtage maximal du gain du désynchroniseur doit être de 0,1 dB. Ces prescriptions s'appliquent à tous les débits d'unités de données optiques ODUk. L'Appendice V fournit des indications supplémentaires concernant l'erreur de phase du démappeur.

### A.8 Réponse transitoire

En cas de perte d'un signal client à débit constant et d'insertion d'un signal AIS d'indication d'alarme, ou en cas de rétablissement d'un signal client à débit constant et de suppression d'un signal AIS, le rythme des unités ODUk et OTUk doit être maintenu. Les mappages asynchrones respectent automatiquement cette prescription, puisque l'horloge ODCa est en fonctionnement libre, et par conséquent indépendante du rythme du signal client. Toutefois, dans le cas du mappage bit synchrone, le rythme de l'horloge ODCb vient du client. Plus précisément, le rythme du signal client est récupéré par le circuit de récupération de la base de temps, inclus dans la fonction atomique OS/CBR\_A\_Sk; la sortie de ce circuit est appliquée à l'entrée de l'horloge ODCb (voir une récapitulation des fonctions atomiques à l'Appendice VI). La perte de signal client entraîne pour l'horloge ODCb soit le passage en mode de fonctionnement libre, soit la commutation sur une horloge AIS en fonctionnement libre; le rétablissement du signal client entraîne la commutation de l'horloge ODCb d'un état de fonctionnement libre ou d'un état d'horloge AIS en fonctionnement libre, sur une horloge indépendante du signal client. En outre, il peut s'écouler un court laps de temps entre l'instant où le signal client appliqué à l'entrée du circuit de récupération de la base de temps est perdu, et la détection de cette perte; pendant ce laps de temps, la sortie du circuit de récupération de la base de temps peut être décalée en fréquence et rester appliquée à l'entrée de l'horloge ODCb. Dans tous ces cas, la Rec. UIT-T G.798 spécifie que l'horloge ODUk doit rester comprise à l'intérieur de ses limites de fréquence et qu'aucune discontinuité de phase de trame ne doit être introduite.

La différence de fréquence maximale admissible entre un client SDH et une horloge ODCb ou AIS en fonctionnement libre est de 40 ppm (parce que le décalage maximal possible pour chaque signal est de  $\pm 20$  ppm). Autrement dit, la prescription ci-dessus signifie que l'horloge ODCb doit filtrer correctement un échelon de fréquence de 40 ppm, pour que l'équipement en aval dans le réseau de transport optique – par exemple des régénérateurs 3R – puisse tolérer la transitoire de phase filtrée qui en résulte. Plus précisément, cela signifie que la transitoire de phase ne doit pas provoquer un dépassement de capacité de mémoire tampon dans une horloge ODCr conforme aux prescriptions de tolérance de gigue et de dérapage définies au § A.6.2. De plus, l'horloge ODCb doit filtrer correctement le signal de sortie du circuit de récupération de la base de temps au cours du bref laps de temps entre la perte du signal client d'entrée appliquée au circuit de récupération de la base de temps, et la suppression du signal de ce même circuit à l'entrée de l'horloge ODCb.

Si:

- 1) le circuit de récupération de la base de temps inclus dans la fonction atomique OS/CBR\_A\_So perd son signal d'entrée, et/ou l'horloge ODCb perd son signal d'entrée avant soit de passer en fonctionnement libre, soit d'être commutée sur une horloge AIS;
- 2) en cas de récupération de l'horloge ODCb, qui passe d'une horloge AIS à la sortie du circuit de récupération de la base de temps, alors le signal de sortie de ODCb doit être conforme aux prescriptions suivantes:
  - a) aucun échelon de fréquence initial ne doit dépasser 9 ppm;
  - b) la vitesse de dérive en fréquence consécutive à l'échelon initial ne doit pas dépasser 200 ppm/s;
  - c) la variation totale de fréquence ne doit pas dépasser 40 ppm.

La perte de synchronisation de l'horloge ODCb ne doit pas dépasser 600 ms.

## Appendice I

### Relation entre les prescriptions de gigue d'interface de réseau et la tolérance de gigue du signal d'entrée

#### I.1 Prescriptions de gigue d'interface de réseau

Pour tous les débits OTUk, le Tableau 1 spécifie deux limites de réseau: d'une part pour un filtre de mesure large bande et d'autre part pour un filtre de mesure haute bande. La forme générale de cette prescription est indiquée au Tableau I.1; elle est applicable à tous les débits OTUk.

**Tableau I.1/G.8251 – Forme générale des prescriptions de gigue d'interface OTUk**

Filtre de mesure	Largeur de bande de mesure	Amplitude crête à crête (UIpp)
Large bande	$f_1$ à $f_4$	$A_2$
Haute bande	$f_3$ à $f_4$	$A_1$

Au niveau de toute interface OTUk, les prescriptions suivantes de gigue du signal de sortie doivent être observées:

- 1) la gigue de rythme mesurée sur un intervalle de 60 secondes, au moyen d'un filtre passe-bande doté d'une fréquence de coupure inférieure  $f_1$  et d'une fréquence de coupure supérieure minimale  $f_4$  ne doit pas dépasser  $A_2$  intervalles unitaires (UI, *unit interval*) crête à crête.

- 2) la gigue de synchronisation mesurée sur un intervalle de 60 secondes, au moyen d'un filtre passe-bande doté d'une fréquence de coupure inférieure  $f_3$  et d'une fréquence de coupure supérieure minimale  $f_4$  ne doit pas dépasser  $A_1$  intervalles unitaires (UI) crête à crête.

La pente à la fréquence de coupure inférieure,  $f_1$  et  $f_3$ , doit être de 20 dB/décade; à la fréquence de coupure supérieure  $f_4$ , elle doit être de  $-60$  dB/décade.

La valeur de  $f_1$  correspond à la plus faible fréquence de coupure escomptée du circuit de récupération du rythme dans un système de ligne; ce circuit peut synchroniser un signal de sortie de régénérateur et pourrait être implémenté sous la forme d'une boucle à verrouillage de phase (PLL, *phase-locked loop*). La gigue aux fréquences supérieures à la largeur de bande de cette boucle, sera partiellement absorbée par sa mémoire tampon. La fraction non absorbée risque de provoquer des erreurs de transmission dues aux pertes par débordement de la mémoire. La gigue aux fréquences inférieures à cette largeur de bande sera simplement transmise sans affecter la qualité de la transmission. La valeur de  $f_1$  représente par conséquent la plus faible largeur de bande susceptible d'être utilisée dans ce circuit de récupération du rythme de sortie. La valeur de  $f_3$  est liée à la largeur de bande du circuit de récupération du rythme d'entrée. La gigue aux fréquences supérieures à cette largeur de bande constituera une gigue d'alignement et provoquera une réduction de puissance optique due à son effet sur le diagramme en œil. Il faut donc, en spécifiant la tolérance de gigue, limiter cette gigue haute fréquence dans une proportion identique à la limitation de la réduction de puissance optique obtenue par les spécifications concernant les équipements.

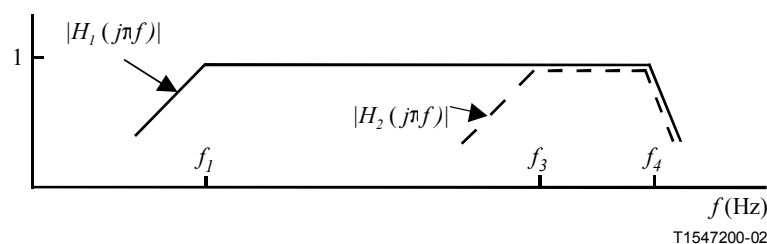
La valeur de  $f_4$  correspond à des limitations raisonnables de la bande de mesure et cette valeur est spécifiée de façon à fixer les prescriptions minimales à cet égard. Le choix de  $f_4$  doit tenir compte de toutes les valeurs probables de gigue d'alignement notables. On a choisi (voir A.7.2) une valeur comprise entre une et deux décades au-delà de la plus forte largeur de bande à 3 dB escomptée pour un régénérateur 3R (fréquence de coupure).

Les valeurs de  $A_1$  et  $A_2$  sont directement liées à la tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée. Ces paramètres comportent une marge et leur choix est suffisamment prudent, pour les raisons suivantes:

- 1) la gigue sinusoïdale constitue le cas de gigue le plus défavorable du point de vue de la tolérance de la gigue d'entrée;
- 2) la gigue accumulée sur la ligne du réseau de transport optique (OTUk) ne sera pas sinusoïdale (par contre elle comportera un niveau de bruit élevé).

## I.2 Tolérance de gigue d'entrée de l'équipement de réseau

La forme générale des filtres de pondération utilisés pour mesurer la gigue de sortie à une interface de réseau, tel qu'indiqué au Tableau I.1, est représentée ci-dessous à la Figure I.1. Les équations (I-1) et (I-2) représentent les réponses des filtres.



**Figure I.1/G.8251 – Filtres de pondération pour la mesure de la gigue de sortie d'interface de réseau**

$$H_1(s) = \frac{s}{s + \omega_1} \cdot \frac{\omega_4^3}{s^3 + 2\omega_4 s^2 + 2\omega_4^2 s + \omega_4^3} \quad (I-1)$$

$$|H_1(2\pi jf)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_1^2} \cdot \frac{f_4^6}{f^6 + f_4^6}$$

$$H_2(s) = \frac{s}{s + \omega_2} \cdot \frac{\omega_4^3}{s^3 + 2\omega_4 s^2 + 2\omega_4^2 s + \omega_4^3} \quad (I-2)$$

$$|H_2(2\pi jf)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_2^2} \cdot \frac{f_4^6}{f^6 + f_4^6}$$

avec:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad \omega_3 = 2\pi f_3 \quad \omega_4 = 2\pi f_4$$

Le premier terme de la fonction  $H_1(s)$  représente la fonction de transfert d'erreur de phase  $H_e(s)$  d'une boucle à verrouillage de phase et l'amplitude  $A_2 = 1,5$  UIpp représente sa tolérance d'erreur de phase.

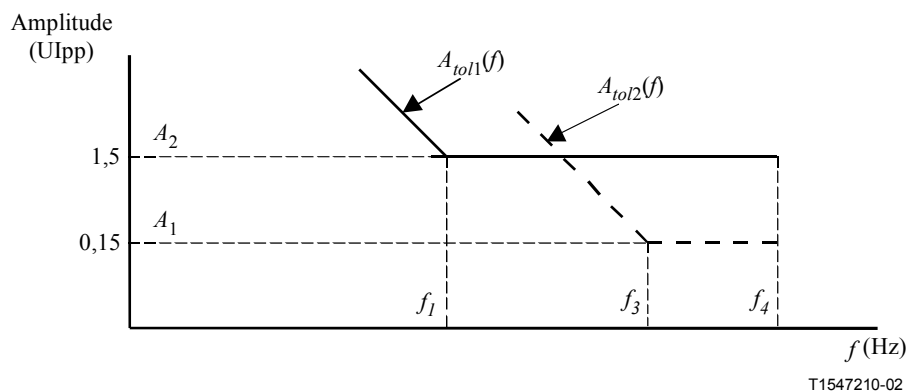
On obtient donc la tolérance correspondante de phase d'entrée de la boucle à verrouillage par la formule:

$$A_{tol1} = \frac{A_2}{|H_1(j2\pi f)|} \quad (I-3)$$

De manière analogue, on obtient la tolérance de phase d'entrée correspondant à  $H_2(s)$  et à son amplitude  $A_1 = 0,15$  UIpp, par la formule:

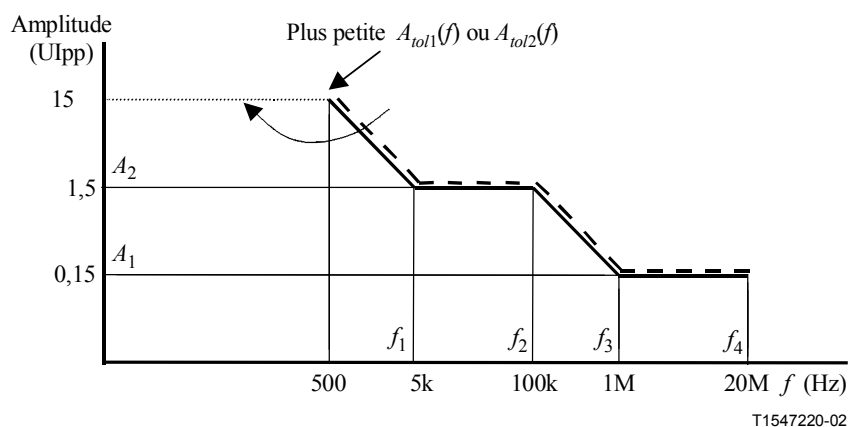
$$A_{tol2} = \frac{A_1}{|H_2(j2\pi f)|} \quad (I-4)$$

La Figure I.2 représente ces gabarits de tolérance de gigue sinusoïdale. Lorsqu'une gigue sinusoïdale non pondérée au niveau d'une interface de réseau est inférieure à ces *deux* gabarits, elle est alors également conforme (c'est-à-dire inférieure) à un gabarit unique constitué par le plus bas des deux gabarits pour chaque fréquence. Ce gabarit mixte est indiqué par une ligne en tirets sur la Figure I.3.



**Figure I.2/G.8251 – Limites supérieures de l'amplitude de gigue sinusoïdale**

La Figure I.3 reproduit conjointement ce gabarit mixte et le gabarit de tolérance de gigue sinusoïdale d'entrée OTU1. Ils sont compris dans l'intervalle  $500 \text{ Hz} < f < 20 \text{ MHz}$ .



**Figure I.3/G.8251 – Limite supérieure de la gigue de sortie sinusoïdale au niveau d'une interface OTU1 (plus petite des deux valeurs  $A_{tot1}(f)$  ou  $A_{tot2}(f)$ ) comparée au gabarit de tolérance de gigue/dérapiage d'entrée**

## Appendice II

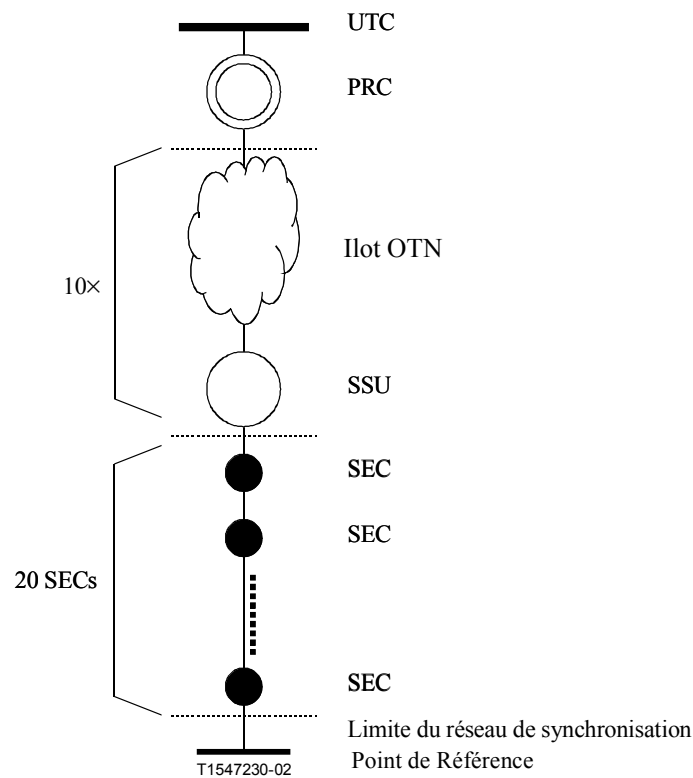
### Effet du réseau de transport optique sur la distribution de la synchronisation par l'intermédiaire des clients STM-N

#### II.1 Introduction

Tel qu'indiqué au paragraphe 1 (Domaine d'application) et au paragraphe 5.2, la couche Physique OTN ne sera pas utilisée pour le transport de la synchronisation. La norme actuelle en matière de transport de synchronisation à travers une interface SDH est adéquate. Toutefois, l'introduction du réseau de transport optique modifie la situation d'un signal STM-N au sens où il peut maintenant constituer un signal client à l'intérieur du réseau de la couche OTN. Cela peut affecter l'architecture du réseau de synchronisation, puisque le signal STM-N est utilisé actuellement comme porteuse afin d'acheminer l'information de synchronisation (outre sa capacité de transport de charge utile). Le présent appendice étudie les effets éventuels sur le réseau de synchronisation liés à l'introduction de la couche OTN.

#### II.2 Chaîne provisoire de référence de synchronisation

La chaîne de référence de synchronisation tirée de la Rec. UIT-T G.803 a été provisoirement adaptée afin d'analyser l'effet de l'introduction du réseau de transport optique sur le réseau de distribution de synchronisation. La chaîne de référence d'origine contient une horloge de référence primaire, 10 unités de synchronisation (SSU) et 60 horloges d'équipement SDH, à condition que le nombre d'horloges d'équipement SDH concaténées entre deux unités de synchronisation soit inférieur ou égal à 20. Le modèle de référence adapté à titre provisoire conserve une horloge de référence primaire et 10 unités de synchronisation, mais les connexions entre unités de synchronisation sont maintenant censées se faire par le réseau de transport optique. A l'extrémité de la chaîne, il y a 20 horloges d'équipement SDH (voir Figure II.1).



**Figure II.1/G.8251 – Chaîne de référence de synchronisation adaptée (provisoire)**

Selon ce modèle, il faut concevoir l'îlot OTN comme un ensemble d'équipements de réseau de transport optique qui effectue le mappage d'un module de transport synchrone de niveau N vers son unité ODUk correspondante, et de multiples éléments de réseau qui effectuent le (dé)multiplexage et l'interconnexion des unités ODUk et leur transport par des canaux optiques (y compris le multiplexage et l'interconnexion optiques) et enfin le démappage du module de transport synchrone de niveau N.

La composition de chaque îlot OTN selon le modèle provisoire est censée comprendre N éléments de réseau OTN qui effectuent l'opération de mappage et neuf autres éléments de réseau OTN qui effectuent les opérations de multiplexage des unités ODUk.

En fait, la distribution des îlots OTN dans le modèle de référence de synchronisation adapté ne présente pas d'importance du point de vue de l'accumulation de dérapage à long terme. Le modèle comporte N îlots OTN entre chaque paire d'unités de synchronisation, bien qu'une autre distribution soit admise. Par exemple, cinq connexions entre unités de synchronisation peuvent avoir deux îlots OTN, tandis que les autres interconnexions utilisent la couche Physique du module STM-N. De plus, le nombre d'éléments de réseau de multiplexage/mappage peut être librement réparti sur les îlots OTN, de façon à constituer un certain nombre de "petits" et de "grands" îlots OTN.

La construction de la chaîne de référence de synchronisation adaptée repose sur l'hypothèse selon laquelle quatre horloges d'équipement SDH ont le même effet qu'un îlot OTN du point de vue de l'accumulation à long terme de dérapage.

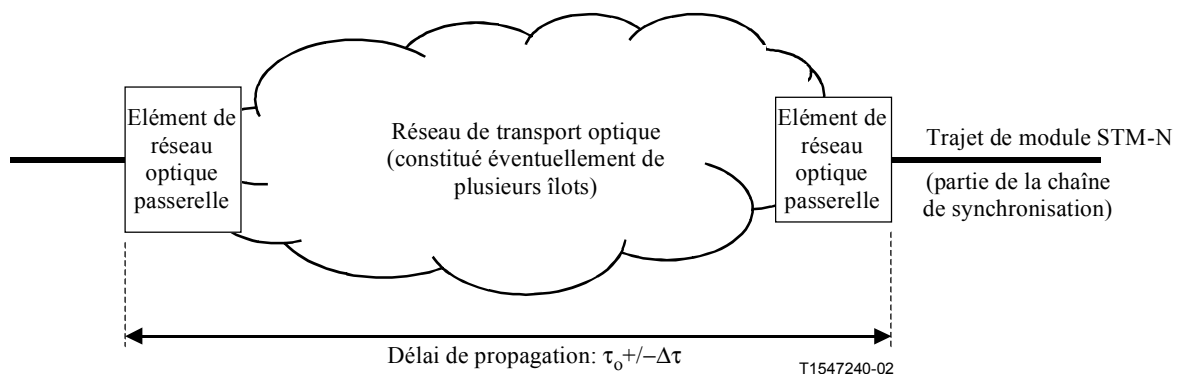
### II.3 Limite de réseau de synchronisation

La limite de réseau valide à l'extrémité de la chaîne de référence de synchronisation, telle que définie dans la Rec. UIT-T G.803, autorise 5  $\mu$ s de dérapage par 24 heures pour l'option 1 (voir la Rec. UIT-T G.823) et 1,86  $\mu$ s sur 24 heures pour l'option 2 (voir la Rec. UIT-T G.824). Il a été décidé, dans la chaîne de référence de synchronisation adaptée, de prévoir 10% du bilan de l'option 1 pour l'effet combiné des îlots OTN, c'est-à-dire 500 ns (soit  $\sim$ 150 octets à 2,5 Gbit/s).

Puisque la chaîne de référence de synchronisation compte 10 îlots OTN, chacun des 10 équipements de réseau mappeur/multiplexeur (tous censés fonctionner à un débit de 2,5 Gbit/s, ce qui correspond à la situation la plus défavorable), la chaîne de référence compte en tout 100 éléments de réseau de ce type. On peut donc admettre une contribution de 5 ns de chaque élément de réseau OTN de ce type (soit 1,56 octets à 2,5 Gbit/s) à l'accumulation de dérapage à long terme.

## II.4 Mémoire variable de canal

De façon générale, on peut affirmer que la quantité maximale de dérapage accumulable sur un trajet à travers un réseau dépend de la variation maximale du délai de propagation à travers ce même réseau. Les variations de délai de propagation peuvent résulter de l'utilisation de mémoires tampons pour les opérations de mappage et de multiplexage; elles peuvent également résulter de l'emploi de fibres optiques, dont le délai de propagation exact dépend, par exemple, de la température. La partie variable de la quantité de mémoire présente dans le canal déterminera normalement le dérapage maximal possible. Si le délai de propagation est égal à  $\tau_0 \pm \Delta\tau$ , le dérapage maximal crête à crête est de  $2 \cdot \Delta\tau$ . (Voir Figure II.2.)



**Figure II.2/G.8251 – Délai de canal variable**

La limite de dérapage supérieure sera effectivement atteinte dans des réseaux réels, en fonction d'un certain nombre de facteurs. La performance de la synchronisation du réseau est l'un d'entre eux (par exemple, c'est la principale raison pour laquelle les réseaux SDH exigent un fonctionnement synchrone), un autre est la conception effective des mémoires tampons. Le calcul de la probabilité de dépassement d'un certain niveau de dérapage dans un laps de temps déterminé exige un travail de simulation très important qui tient compte des principales caractéristiques détaillées des processus liés à la mémoire tampon et du type particulier de modèle de référence du réseau. Cette approche a pour inconvénient de ne pas faciliter généralement l'exécution de ces simulations pour les réseaux qui s'écartent à certains égards du modèle de référence. Aussi, une approche dite de la pire éventualité, fondée sur la variation maximale de la mémoire de canal, a-t-elle été retenue.

## II.5 Hystérésis maximale de la mémoire tampon

Si une contribution maximale de 5 ns à l'accumulation de dérapage à long terme est admise pour chaque élément de réseau OTN, l'hystérésis maximale résultant de la mémoire tampon est d'environ 12,5 UI = 1,5625 octets pour l'unité ODU1, 50 UI = 6,25 octets pour l'unité ODU2, et 200 UI = 25 octets pour l'unité ODU3. La commodité des implémentations étant souvent nettement améliorée si elles peuvent fonctionner avec des nombres entiers d'octets, la valeur ODU1 est arrondie au nombre entier d'octets le plus proche, c'est-à-dire, 2 octets. La valeur ODU2 est fixée à 4 fois cette valeur, soit 8 octets, et celle d'ODU3 à 16 fois cette valeur, soit 32 octets. En unités de temps de phase, l'hystérésis maximale de la mémoire tampon est d'environ 6,4 ns. Le bilan total de dérapage à long terme relatif à la chaîne de référence de synchronisation de la Figure II.1 (100 éléments de réseau OTN) est alors de 640 ns.



La Rec. UIT-T G.798 spécifie que l'hystérésis maximale de la mémoire tampon des fonctions d'alignement pour les opérations de mappage et de multiplexage<sup>1</sup>, ne doit pas dépasser 2 octets pour le module STM-16, 8 octets pour le module STM-64, et 32 octets pour le module STM-256, par élément de réseau OTN<sup>2, 3</sup>.

La prescription ci-dessus concernant l'hystérésis des tampons élastiques par élément de réseau OTN doit être appliquée à chaque trajet possible d'un module STM-N ou de son enveloppe ODUk à travers un élément de réseau OTN quelconque, qui effectue un mappage ou un multiplexage. Lorsqu'il y a plusieurs trajets indépendants, la prescription doit s'appliquer individuellement à chacun de ces trajets.

Selon une autre hypothèse du présent appendice, les éléments de réseaux OTN qui n'effectuent ni multiplexage, ni mappage ne contiennent pas de mémoire tampon et, par conséquent, ne contribuent pas à l'accumulation de dérapage à long terme.

## Appendice III

### Modèle de référence théorique relatif à l'accumulation de gigue d'un régénérateur 3R

Le présent appendice décrit le modèle de référence théorique (HRM, *hypothetical reference model*) utilisé afin de définir les prescriptions de transfert de gigue de régénérateur 3R énoncées au § A.7.2 ainsi que les prescriptions de production de gigue des horloges ODCa, ODCb et ODCr au § A.5.1.1. Ces prescriptions, conjointement avec le modèle théorique de référence sont compatibles avec les limites de gigue de réseau (au niveau d'une interface OTUk) énoncées au § 5.1 et avec les prescriptions de tolérance de gigue énoncées au § 6.1.1 et dans les sous-paragraphes correspondants. L'Appendice IV présente en détail les études consacrées à l'accumulation de la gigue d'un régénérateur 3R sur lesquelles s'appuient les prescriptions mentionnées ci-dessus, et présentent par ailleurs le modèle théorique de référence.

Le schéma du modèle théorique de référence concernant l'accumulation de gigue d'un régénérateur 3R est reproduit à la Figure III.1. Ce modèle est constitué de 50 régénérateurs en série, tous conformes aux prescriptions de production et de transfert de gigue énoncées respectivement aux § A.5.1.1 et A.7.2. Les 50 régénérateurs 3R sont précédés par une horloge ODCa ou ODCb, censée respecter les prescriptions de production de gigue énoncées au § A.5.1.1. Les 50 régénérateurs 3R ainsi que l'horloge ODCa ou ODCb, conjointement avec le désynchroniseur au niveau du démappeur, constituent un îlot OTN. Dans le cas du mappage bit synchrone, l'horloge ODCb est censée respecter la prescription de transfert de bruit énoncée au § A.7.1. Dans ces conditions, la gigue de sortie à l'extrémité de la chaîne des 50 régénérateurs 3R est censée rester inférieure aux limites de gigue de réseau définies au Tableau 1 (voir § 5.1), ainsi qu'au gabarit de tolérance de gigue des Figures 1-3 (Tableau 2-4; § 6.1.1.1, 6.1.1.2 et 6.1.1.3 respectivement). Il est

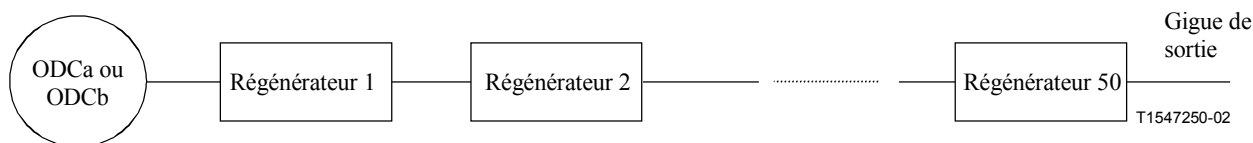
---

<sup>1</sup> Bien que les désynchroniseurs et les démultiplexeurs contiennent des mémoire tampons, celles-ci ne contribuent pas à l'accumulation de dérapage à long terme, puisque leur très lente variation de phase n'affecte pas le remplissage.

<sup>2</sup> On suppose que lorsque les deux fonctions de mappage et de multiplexage sont exécutées sur un seul module STM-N dans un élément de réseau OTN, ces opérations peuvent être accomplies au moyen d'une seule et unique opération d'alignement.

<sup>3</sup> Il est à noter que cette spécification s'écarte de l'approche adoptée dans la Rec. UIT-T G.783, laquelle prescrit une quantité minimale et non maximale d'hystérésis de mémoire tampon pour les processeurs de pointeur SDH. Cette approche s'emploie à réduire au minimum le nombre d'événements d'ajustement du pointeur SDH dans le réseau.

à noter, pour le mappage bit synchrone, la prise en compte de l'accumulation de gigue sur plusieurs îlots OTN n'est pas nécessaire en raison du filtrage effectif par le désynchroniseur de l'accumulation de gigue à la sortie d'un îlot.



NOTE – En cas de mappage asynchrone, l'horloge de la section de transmission optique ne reçoit pas de signal d'entrée (et ne produit donc pas de gigue à la sortie). En cas de mappage bit synchrone, toute accumulation de gigue dans les îlots précédents est filtrée par le désynchroniseur de cet îlot.

**Figure III.1/G.8251 – Modèle théorique de référence de l'accumulation de gigue d'un régénérateur 3R**

Il est à noter que, outre la mention de la conformité des régénérateurs 3R aux prescriptions de production de gigue du § A.5.1.1, aucune indication détaillée n'est fournie ci-après quant à l'emplacement précis de la production de bruit dans chaque régénérateur. Aux fins du présent appendice, il est simplement mentionné que chaque régénérateur répond aux prescriptions de production de gigue du § A.5.1.1 en l'absence de gigue d'entrée. L'Appendice IV présente en détail ces deux études de l'accumulation de gigue.

## Appendice IV

### Etudes de l'accumulation de gigue des régénérateurs 3R

#### IV.1 Introduction

Le présent appendice présente en détail les études consacrées à l'accumulation de gigue des régénérateurs 3R sur lesquelles s'appuient les prescriptions de génération de gigue du § A.5.1, les prescriptions de transfert de gigue (§ A.7) et le modèle théorique de référence de l'Appendice III. Les deux études présentées et menées à bien indépendamment ont utilisé deux modèles distincts; il s'agit toutefois de modèles semblables qui ont conduit à des résultats identiques.

Les deux modèles ont été implémentés dans le domaine de fréquence. Chaque source de bruit a été représentée par une densité spectrale de puissance, passant à travers des filtres convenablement choisis qui correspondent aux régénérateurs. Le premier modèle représente de façon détaillée les boucles à verrouillage de phase de régénérateur, avec introduction de bruit dans différents composants. Le deuxième modèle modélise le bruit au moyen d'une densité spectrale de puissance avec un profil approprié du signal de sortie du régénérateur, tandis que les caractéristiques de transfert globales du régénérateur (de l'entrée à la sortie) sont modélisées séparément. Les niveaux de bruit ont été ajustés dans les deux modèles de façon à se conformer aux prescriptions de production de gigue. Des fonctions de transfert dans le domaine de fréquence ont servi par ailleurs à modéliser les filtres de mesure appropriés utilisés pour évaluer la production de gigue et la gigue de sortie. L'application des modèles dans le domaine de fréquence permet d'obtenir très simplement la gigue quadratique moyenne (rms), égale à la superficie sous-tendue par la courbe de densité spectrale de puissance, ainsi que la gigue efficace (eff), égale à la racine carrée de cette moyenne

quadratique. La gigue crête à crête sur une période de 60 secondes a été supposée égale à 10 fois la gigue efficace<sup>4</sup>.

## IV.2 Modèle 1

Le régénérateur est modélisé sous la forme d'une boucle à verrouillage de phase de deuxième ordre, avec filtrage par une boucle proportionnelle et intégrale de premier ordre. On suppose en outre la présence de trois sources de bruit distinctes, correspondant au bruit du détecteur de phase, au bruit de l'oscillateur à tension variable, et au bruit thermique du récepteur optique précédant immédiatement l'entrée de la boucle à verrouillage de phase. Le modèle est conçu pour représenter les cas d'accumulation systématique et aléatoire de gigue; toutefois, les résultats sont indiqués uniquement dans ce deuxième cas. L'accumulation de gigue dans les régénérateurs 3R est assimilée à un processus aléatoire, puisque les contenus des mémoires tampons dans des boucles à verrouillage de phase à bande étroite des régénérateurs successifs (c'est-à-dire dans les horloges ODCr successives) ne sont pas liés entre eux. Il en est ainsi parce que l'accumulation systématique est le fait de la gigue liée à la configuration binaire; or, cette gigue est générée par le processus de récupération de la base de temps dans les boucles à verrouillage de phase à large bande. Puisqu'il n'y a pas de corrélation entre les contenus des mémoires tampons des horloges ODCr, les impulsions d'horloge lues comportant une gigue liée à leur configuration binaire synchroniseront des bits de sortie différents dans les régénérateurs 3R successifs. Il en résulte également l'absence de corrélation de la gigue liée à la configuration binaire des régénérateurs successifs.

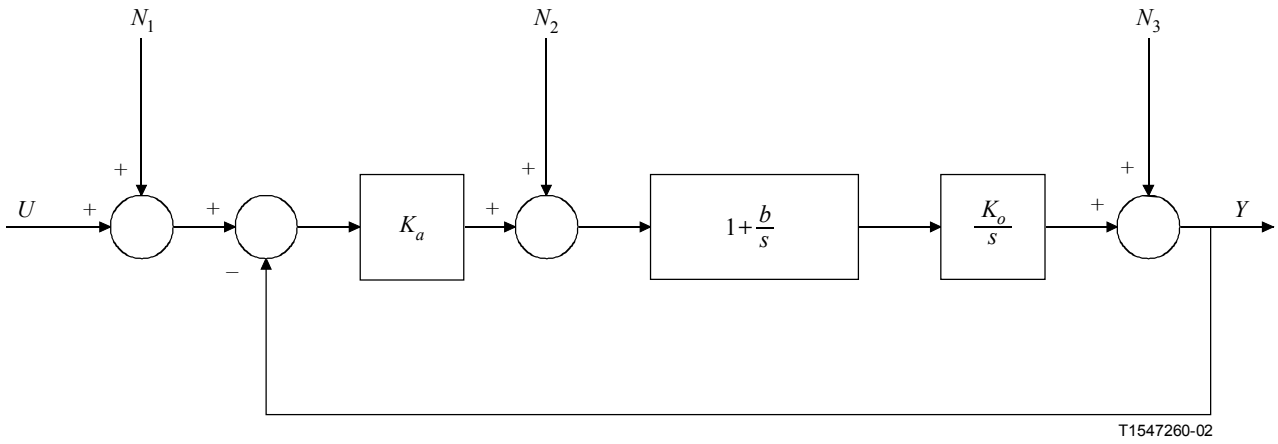
Les sous-paragraphes suivants présentent en détail le modèle 1 et indiquent les résultats obtenus dans certains cas. Le modèle est défini sous une forme adimensionnelle de façon à réduire le nombre de simulations à exécuter. Deux séries de résultats sont indiqués:

- 1) largeur de bande équivalente à 3 dB de 8 MHz dans le cas OTU2, ce qui correspond à la prescription de la Rec. UIT-T G.783 concernant les régénérateurs STM-64;
- 2) la largeur de bande équivalente à 3 dB de 1 MHz dans le cas OTU2, ce qui correspond à la prescription adoptée pour la présente Recommandation au § 6.1.3.

Il ressort des résultats obtenus que la largeur de bande plus étroite était indispensable à l'observation des limites de réseau de gigue indiquées au Tableau 1.

---

<sup>4</sup> La définition de la gigue crête à crête ou plus généralement de la valeur crête à crête de tout phénomène aléatoire, doit spécifier conjointement un intervalle de mesure et un quantile correspondant (ou percentile). En effet, en cas de répétition un nombre de fois suffisant de la mesure crête à crête (toujours sur le même intervalle de mesure), on obtiendra une distribution de valeurs. Dans le cas présent, on utilise un intervalle de mesure de 60 secondes. Le quantile n'est pas spécifié, mais il est supposé fixé de façon à obtenir un rapport de 10 entre valeur crête à crête et valeur efficace. Ce quantile est censé être supérieur à 0,99. Si les régénérateurs peuvent être représentés par des systèmes linéaires et si la distribution du bruit est de type gaussien, alors la valeur exacte du rapport entre valeur crête à crête et valeur efficace de la gigue n'a pas d'importance, dans la mesure où les spécifications de production de gigue et de gigue de sortie sont exprimées conjointement en termes de gigue crête à crête ou en termes de gigue efficace.



**Figure IV.2-1/G.8251 – Schéma de régénérateur**

### IV.2.1 Présentation détaillée du modèle

L'analyse dans le domaine fréquentiel repose sur les méthodes utilisées dans [1] et [2]. La Figure IV.2-1 représente le modèle du régénérateur 3R. Il s'agit d'un modèle linéaire de boucle à verrouillage de phase (PLL).  $K_a$  désigne le gain du détecteur de phase, et  $(1+b/s)$  une fonction de transfert associée à un filtre de boucle actif, tandis que  $K_o$  désigne le gain de l'oscillateur.  $Y(s)$ ,  $U(s)$ ,  $N_1(s)$ ,  $N_2(s)$  et  $N_3(s)$  désignent les transformées de Laplace (exactement la racine carrée des densités PSD respectives) du signal de sortie, du signal d'entrée, du bruit du récepteur optique, du bruit du détecteur de phase et du bruit de l'oscillateur, respectivement. On peut alors exprimer comme suit les fonctions de transfert:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{N_1(s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} &\equiv H(s) = \frac{\frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)} = \frac{K_a K_o s + K_a K_o b}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \\ &= \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned} \quad (\text{IV.2-1})$$

$$\frac{Y(s)}{N_2(s)} = \frac{1}{K_a} H(s) \quad (\text{IV.2-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{N_3(s)} &= \frac{1}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)} = \frac{s^2}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = 1 - H(s) \end{aligned} \quad (\text{IV.2-3})$$

dans lesquelles le coefficient d'amortissement et la fréquence naturelle non amortie sont définis par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{K_a K_o b} \\ \zeta &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_a K_o}{b}} \end{aligned} \quad (\text{IV.2-4})$$

Si  $N_1$  et  $N_2$  désignent des bruits blancs, ou un bruit blanc de phase (WPM, *white phase modulation*), il y a intérêt à les réunir sous la forme d'une source de bruit équivalente unique. On peut donc écrire à cet effet:

$$\begin{aligned} Y(s) &= H(s)U(s) + H(s)N_1(s) + H(s)N_2(s)/K_a + [1 - H(s)]N_3(s) \\ &= H(s)U(s) + H(s)N_{12}(s) + H_e(s)N_3(s) \end{aligned} \quad (\text{IV.2-5})$$

avec la source de bruit équivalente  $N_{12}$  exprimée par la formule:

$$N_{12}(s) = N_1(s) + N_2(s)/K_a \quad (\text{IV.2-6})$$

et la notation usuelle désignant la fonction de transfert d'erreur de phase:

$$H_e(s) \equiv 1 - H(s) \quad (\text{IV.2-7})$$

La modélisation d'une chaîne de  $N$  régénérateurs 3R repose sur l'hypothèse que le signal de sortie du  $j^{\text{ème}}$  régénérateur constitue le signal d'entrée du  $(j+1)^{\text{ème}}$  régénérateur et que le premier régénérateur de la chaîne reçoit un signal nul (autrement dit, le premier régénérateur est en principe une horloge et se caractérise par une production de bruit, mais par aucune gigue d'entrée). L'analyse présentée ci-dessous décrit séparément les cas d'accumulation systématique et aléatoire de gigue, selon la méthodologie indiquée dans [1] et [2]. Premièrement, considérons celui de l'accumulation aléatoire. On suppose en l'occurrence la même amplitude des sources de bruit correspondantes dans chacun des régénérateurs, c'est-à-dire la même densité spectrale de puissance, bien qu'il n'existe aucune corrélation entre elles. La relation entre densités spectrales de puissance à l'entrée et à la sortie d'un régénérateur donné est indiquée ci-dessous [d'après l'équation (IV.2-5)] et en posant  $s = j\omega$  dans la fonction de transfert, pour obtenir la réponse en fréquence:

$$S_Y(\omega) = |H(j\omega)|^2 S_U(\omega) + |H(j\omega)|^2 S_{12}(\omega) + |H_e(j\omega)|^2 S_3(\omega) \quad (\text{IV.2-8})$$

dans laquelle  $S(\omega)$  noté avec l'indice approprié désigne la densité spectrale de puissance du signal d'entrée, du signal de sortie ou de la source de bruit correspondante. Alors, pour une chaîne de  $N$  régénérateurs 3R, la densité spectrale de puissance de la phase sortie, en supposant une accumulation de gigue aléatoire, est donnée par:

$$\begin{aligned} S_{N_r}(\omega) &= \sum_{j=1}^N |H(j\omega)|^{2j} S_{12}(\omega) + \sum_{j=1}^N |H_e(j\omega)|^2 |H(j\omega)|^{2j-2} S_3(\omega) \\ &= \frac{|H(j\omega)|^2 [1 - |H(j\omega)|^{2N}]}{1 - |H(j\omega)|^2} S_{12}(\omega) + \frac{|H_e(j\omega)|^2 [1 - |H(j\omega)|^{2N}]}{1 - |H(j\omega)|^2} S_3(\omega) \end{aligned} \quad (\text{IV.2-9})$$

Dans le cas de l'accumulation systématique de gigue, on suppose une corrélation parfaite entre les sources de bruit correspondantes des régénérateurs successifs: c'est-à-dire entre les sources de bruit  $N_{12}$ , ainsi qu'entre les sources de bruit  $N_3$ . Par contre, on suppose qu'il n'existe pas de corrélation entre d'une part l'une quelconque des sources de bruit  $N_{12}$  et d'autre part l'une quelconque des sources de bruit  $N_3$ . Ainsi, pour une chaîne de  $N$  régénérateurs 3R, la phase de signal de sortie  $Y_N$  à l'extrémité de la chaîne est donnée par la formule:

$$\begin{aligned} Y_N(s) &= \sum_{j=1}^N H^j(s)N_{12}(s) + \sum_{j=1}^N H^{j-1}(s)H_e(s)N_3(s) \\ &= \frac{H(s)[1 - H^N(s)]}{1 - H(s)} N_{12}(s) + \frac{H_e(s)[1 - H^N(s)]}{1 - H(s)} S_3(s) \end{aligned} \quad (\text{IV.2-10})$$

Dans ce cas, la densité spectrale de puissance du signal de sortie est liée aux densités spectrales de puissance des sources de bruit par la relation:

$$S_{Ns}(\omega) = |H(j\omega)|^2 \left| \frac{1-H^N(j\omega)}{1-H(j\omega)} \right|^2 S_{12}(\omega) + |H_e(j\omega)|^2 \left| \frac{1-H^N(j\omega)}{1-H(j\omega)} \right|^2 S_3(\omega) \quad (\text{IV.2-11})$$

La phase quadratique moyenne à la sortie de la chaîne de régénérateurs 3R est obtenue en calculant l'intégrale de la densité spectrale de puissance calculée par l'équation (IV.2-9) ou (IV.2-11) sur toutes les fréquences (de moins l'infini à plus l'infini). Puisque la fonction de densité spectrale de puissance est symétrique par rapport à zéro, il est indiqué d'utiliser une moitié seulement de la courbe et de l'intégrer de zéro à l'infini. De plus, il y a lieu d'utiliser une fréquence  $f$  exprimée en Hz et non une variable  $\omega$  exprimée en rad/s. La convention classique consiste à définir la demi-courbe de densité spectrale de puissance par la relation suivante:

$$W(f) \equiv 4\pi S(2\pi f) \quad (\text{IV.2-12})$$

Avec cette définition, l'écart quadratique moyen est égal à l'intégrale de la fonction  $W(f)$  de zéro à l'infini. L'équation (IV.2-9) permettant de calculer l'accumulation aléatoire de gigue devient donc:

$$W_{Nr}(f) = \frac{|H(j2\pi f)|^2 (1-|H(j2\pi f)|^{2N})}{1-|H(j2\pi f)|^2} W_{12}(f) + \frac{|H_e(j2\pi f)|^2 (1-|H(j2\pi f)|^{2N})}{1-|H(j2\pi f)|^2} W_3(f) \quad (\text{IV.2-13})$$

tandis que l'équation (IV.2-11) permettant de calculer l'accumulation systématique de gigue devient:

$$W_{Ns}(f) = |H(j2\pi f)|^2 \left| \frac{1-H^N(j2\pi f)}{1-H(j2\pi f)} \right|^2 W_{12}(f) + |H_e(j2\pi f)|^2 \left| \frac{1-H^N(j2\pi f)}{1-H(j2\pi f)} \right|^2 W_3(f) \quad (\text{IV.2-14})$$

Il est à noter que les équations (IV.2-13) et (IV.2-14) correspondent à une moitié de la courbe de densité spectrale de puissance du bruit de phase du signal de sortie. Pour obtenir les densités spectrales de puissance des giges de sortie, ces expressions doivent être multipliées par les réponses en fréquence des filtres appropriés de mesure de la gigue. Le filtre de mesure de la gigue est constitué d'un filtre passe-haut de premier ordre, suivi d'un filtre passe-bas du troisième ordre, aussi uniforme que possible. La réponse en fréquence est donnée par la relation:

$$|H_{meas}(j2\pi f)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_{HP}^2} \times \frac{f_{LP}^6}{f^6 + f_{LP}^6} \quad (\text{IV.2-15})$$

Les fréquences de coupure  $f_{HP}$  et  $f_{LP}$  dépendent des débits considérés et de la nature bande haute ou bande large de la gigue. Le Tableau 1 indique les valeurs particulières des fréquences.

Ensuite, les équations (IV.2-13) et (IV.2-14) sont écrites en utilisant l'expression sans dimension de  $H(j2\pi f)$ . D'après [1], posons:

$$x = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} \quad (\text{IV.2-16})$$

On peut alors exprimer comme suit les réponses en fréquence  $H(j\omega)$  et  $H_e(j\omega)$  [en divisant le numérateur et le dénominateur des équations (IV.2-1) et (IV.2-3) par  $\omega_n^2$ ]:

$$H(x) = \frac{2\zeta jx + 1}{-x^2 + 2\zeta jx + 1} \quad (\text{IV.2-17})$$

$$H_e(x) = \frac{-x^2}{-x^2 + 2\zeta jx + 1} \quad (\text{IV.2-18})$$

De plus, l'équation (IV.2-15) concernant le filtre de mesure de la gigue devient:

$$H_{meas}(x) = \frac{x^2}{x^2 + (f_{HP}/f_n)^2} \times \frac{(f_{LP}/f_n)^6}{f^6 + (f_{LP}/f_n)^6} \quad (IV.2-19)$$

Et les équations (IV.2-13) et (IV.2-14) deviennent:

$$W_{Nr}(x) = \frac{|H(x)|^2 (1 - |H(x)|^{2N})}{1 - |H(x)|^2} W_{12}(x) + \frac{|H_e(x)|^2 (1 - |H(x)|^{2N})}{1 - |H(x)|^2} W_3(x) \quad (IV.2-20)$$

$$W_{Ns}(x) = |H(x)|^2 \left| \frac{1 - H^N(x)}{1 - H(x)} \right|^2 W_{12}(x) + |H_e(x)|^2 \left| \frac{1 - H^N(x)}{1 - H(x)} \right|^2 W_3(x) \quad (IV.2-21)$$

(Les équations (IV.2-17) à (IV.2-21) utilisent une notation légèrement imprécise, puisque les mêmes symboles figurent dans les fonctions  $H$  et  $W$  lorsque celles-ci sont exprimées en fonction de  $x$  et non de  $f$ ; pour en améliorer la précision, il aurait fallu définir de nouveaux symboles, ce qui aurait alourdi l'exposé.)

L'emploi de grandeurs sans dimension dans les équations (IV.2-17) à (IV.2-21) présente l'avantage d'éliminer la dépendance par rapport à la fréquence naturelle non amortie, ou, par définition, la largeur de bande du régénérateur. Les réponses en fréquence du régénérateur d'après les équations (IV.2-17) et (IV.2-18) dépendent uniquement du rapport d'amortissement ou, de façon équivalente, du crête du gain. La réponse en fréquence du filtre de mesure de la gigue, donnée par l'équation (IV.2-19), dépend uniquement du rapport des fréquences de coupure des filtres passe-haut et passe-bas à la fréquence naturelle non amortie du régénérateur ou, de façon équivalente, de la largeur de bande. Ces rapports sont les mêmes pour les différents débits d'unités OTUk dans la mesure où les valeurs considérées sont proportionnelles au débit; puisque la prescription concernant le crête du gain s'applique à tous les débits (0,1 dB) l'évaluation des densités spectrales de puissance peut être réalisée pour un ensemble donné de rapports, et non pour chaque débit.

Enfin, les valeurs quadratiques moyennes de la phase et de la gigue sont égales aux densités spectrales de puissance appropriées, intégrées sur  $f$  de zéro à l'infini:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty W(f) df = f_n \int_0^\infty W(x) dx \quad (IV.2-22)$$

Il suffit d'obtenir l'écart quadratique moyen de la phase ou de la gigue, d'intégrer la densité spectrale de puissance relative et de la multiplier par la fréquence naturelle non amortie correspondant au débit considéré. Autre résultat particulièrement important, le rapport de la phase ou de la gigue quadratique moyenne ou efficace pour  $N$  régénérateurs, à la phase où la gigue moyenne ou efficace relative à un régénérateur, ne dépend pas de la fréquence naturelle non amortie et, dans les cas considérés, est identique pour chacune des unités OTUk (parce que les largeurs de bande du filtre de mesure de la gigue et les largeurs de bande des régénérateurs sont dans les mêmes rapports, quelle que soit l'unité OTUk). Il suffit donc d'exécuter une fois pour toutes les simulations pour chaque ensemble de rapport de fréquences et non pour chaque valeur de  $k$  et pour chaque ensemble de rapport de fréquences. Ce qui divise par 3 le nombre de simulations nécessaires.

Dans les exemples considérés, la source de bruit  $N_{12}$  est modélisée comme un bruit blanc:

$$W_{12}(f) = W_{0,12} \quad (IV.2-23)$$

Par ailleurs, la source de bruit  $N_3$  représente le bruit d'un oscillateur à tension variable. La modélisation correspondante est indiquée dans [3] et [5]. La densité spectrale de puissance de l'oscillateur à tension variable consiste essentiellement en un bruit blanc au-dessus d'une fréquence  $f_b$  et un bruit blanc de phase au-dessous de  $f_b$ :

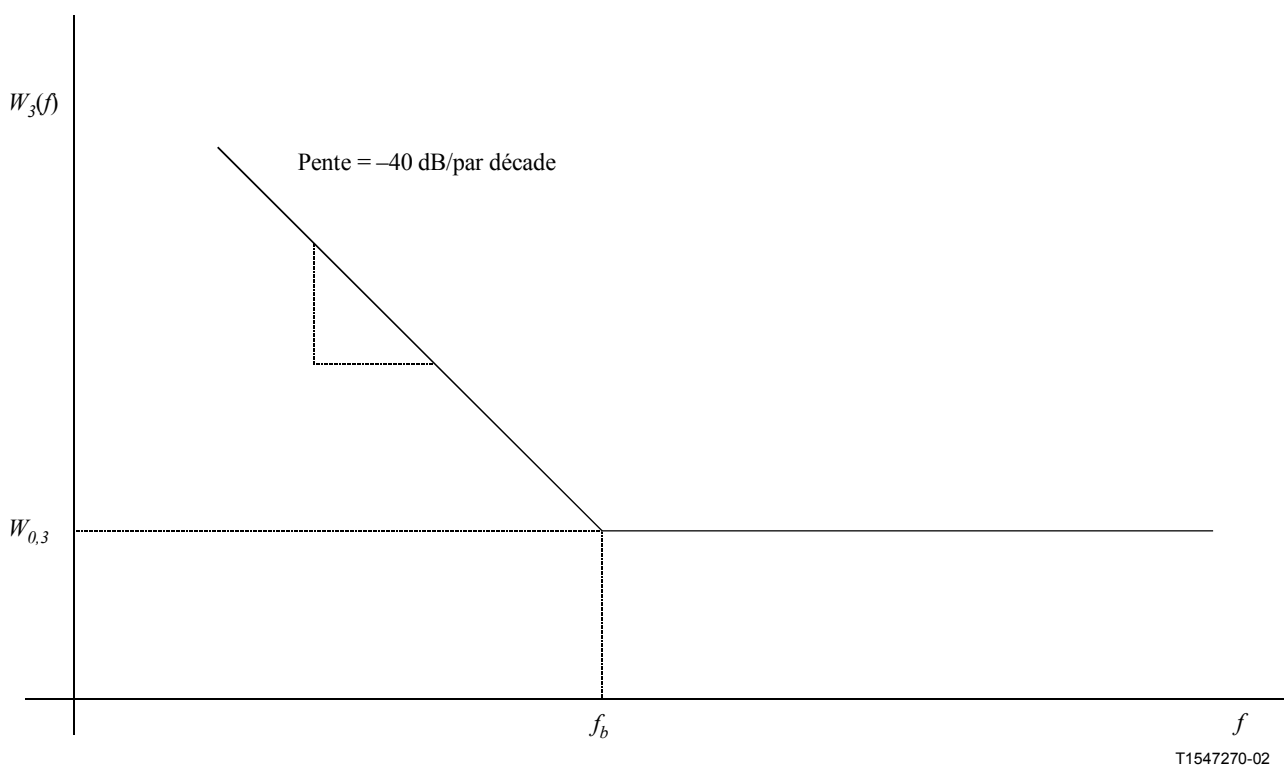
$$W_3(f) = W_{0,3} \left( 1 + \left( \frac{f_b}{f} \right)^2 \right) \quad (\text{IV.2-24})$$

La Figure IV.2-2 représente schématiquement l'équation (IV.2-24) (la figure représente normalement un diagramme bilogarithmique; la courbe réelle devrait se trouver 3 dB au-dessus du point de rupture à la fréquence  $f_b$ ). La fréquence  $f_b$  est donnée par la relation:

$$f_b = \frac{f_0}{2Q} \quad (\text{IV.2-25})$$

avec  $f_0$  fréquence de ligne (fréquence d'oscillateur) et  $Q$  facteur de qualité. Si l'on substitue l'équation (IV.2-25) dans (IV.2-24) et si l'on divise le numérateur et le dénominateur par  $f_n$ , alors le résultat peut être exprimé en fonction du paramètre sans dimension  $x$ :

$$W_3(x) = W_{0,3} \left( 1 + \left[ \frac{(f_0 / f_n)}{2Qx} \right]^2 \right) \quad (\text{IV.2-26})$$



**Figure IV.2-2/G.8251 – Diagramme de la densité spectrale de puissance d'un oscillateur à tension variable**

Les exemples présentés au paragraphe suivant procèdent à l'évaluation séparée des rapports de l'accumulation de gigue haute et large bandes pour  $N$  régénérateurs, aux valeurs correspondantes de la gigue pour un régénérateur, pour la source de bruit  $N_{12}$  et pour la source de bruit  $N_3$ . Autrement dit, les coefficients  $W_{0,12}$  et  $W_{0,3}$  d'amplitude de la densité spectrale de puissance s'annulent, dans le



calcul du rapport. Les résultats obtenus dépendent uniquement du rapport d'amortissement (ou de façon équivalente du crêtage du gain), du rapport des fréquences de coupure du filtre de mesure de la gigue à la fréquence naturelle non amortie (ou de façon équivalente, de la largeur de bande du régénérateur) et, pour la source de bruit  $N_3$ , du rapport de la fréquence de ligne à la fréquence naturelle non amortie et enfin du facteur de qualité de l'oscillateur à tension variable. Ces résultats peuvent s'exprimer comme suit:

$$\frac{\sigma_{12,N}}{\sigma_{12,1}} = F_{12}(a_{LP}, a_{HP}, \zeta) \quad (\text{IV.2-27})$$

$$\frac{\sigma_{3,N}}{\sigma_{3,1}} = F_3(a_{LP}, a_{HP}, \zeta, a_0, Q) \quad (\text{IV.2-28})$$

avec:

$$\begin{aligned} a_{HP} &= \frac{f_{HP}}{f_n} \\ a_{LP} &= \frac{f_{LP}}{f_n} \\ a_0 &= \frac{f_0}{f_n} \end{aligned} \quad (\text{IV.2-29})$$

L'accumulation aléatoire et l'accumulation systématique correspondent à des fonctions  $F_{12}$  et  $F_3$  différentes; de plus,  $a_{HP}$  est différent pour la gigue haute bande et la gigue large bande. Or les fonctions et les grandeurs sont identiques pour les trois fréquences (pour un ensemble donné de rapports de fréquences) puisque les différentes largeurs de bande sont dans les mêmes rapports, pour chacune des trois fréquences.

Les relations entre fréquence naturelle non amortie et largeur de bande à 3 dB, et par ailleurs entre crêtage du gain et rapport d'amortissement, s'écrivent comme suit [voir [4] pour l'équation (IV.2-30) et [3] pour l'équation (IV.2-31)]:

$$f_{3dB} = f_n \left[ 2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1} \right]^{1/2} \quad (\text{IV.2-30})$$

$$H_p = 1 + \frac{1}{4\zeta^2} \quad (\text{IV.2-31})$$

Le crêtage du gain  $H_p$  de l'équation (IV.2-31) est une fraction numérique [autrement dit le crêtage du gain exprimé en dB est égale à 20 fois le logarithme décimal de  $H_p - 1$  dans l'équation (IV.2-31)].

Un programme en langage C a permis d'évaluer les écarts moyens quadratiques et les valeurs efficaces de la gigue haute bande et large bande par intégration numérique de la densité spectrale de puissance après filtrage. Les densités spectrales de puissance ont été évaluées en utilisant un échelon de fréquence systématiquement choisi de façon à rester inférieur à 0,1 fois la largeur de bande minimale ou la fréquence de coupure (c'est-à-dire moins de 0,1 fois la fréquence de coupure du filtre passe-haut de la gigue large bande). Le domaine de variation de la densité spectrale de puissance a toujours été supérieur à 10 fois la largeur de bande maximale ou la fréquence de coupure (c'est-à-dire plus de 10 fois la fréquence de coupure du filtre de gigue passe-bas). Il est à noter que le filtre de mesure de la gigue impose au système une largeur de bande maximale; autrement dit, la densité spectrale de puissance peut être intégrée jusqu'à la fréquence infinie et le résultat convergera grâce au filtre passe-bas de mesure de la gigue (l'intégration s'arrête à une

fréquence suffisamment élevée pour que la contribution au-dessus de cette fréquence soit négligeable, sans toutefois que cette fréquence soit assez élevée pour impliquer un temps de simulation prohibitif).

#### IV.2.2 Résultats de la modélisation

Des simulations ont été exécutées pour deux séries de largeurs de bande de régénérateur, correspondant aux prescriptions SDH formulées dans la Rec. UIT-T G.783 et aux prescriptions OTN de la présente Recommandation. Les premières comportent des largeurs de bande à 3 dB de 2 MHz, 8 MHz et (par extrapolation) 32 MHz respectivement, pour les modules STM-16, STM-64 et STM-256. Ces valeurs ont été utilisées pour les unités OTU1, 2 et 3, respectivement. Dans ce dernier cas, les largeurs de bande à 3 dB sont de 250 kHz, 1 MHz et 4 MHz, respectivement pour les unités OTU1, 2 et 3. Dans tous les cas les simulations ont été faites en supposant une accumulation aléatoire de gigue.

Le Tableau IV.2-1 (différents cas de largeur de bande SDH) et les Tableaux IV.2-2a et IV.2-2b (largeurs de bande OTN) récapitulent les paramètres généraux correspondant à chaque ensemble de cas. Pour les prescriptions de la présente Recommandation, il a fallu des passages distincts afin de déterminer l'accumulation de gigue large bande OTU3. En effet, l'unité OTU3 comporte une largeur de bande de filtre de mesure passe-haut de la gigue large bande identique à celle de l'unité OTU2 (autrement dit, elle n'est pas multipliée par 4 par rapport à OTU2 comme les autres paramètres). Le Tableau IV.2-2a indique les paramètres relatifs aux simulations OTU1 et OTU2; enfin, le Tableau IV.2-2b indique les paramètres relatifs à la simulation OTU3. Les largeurs de bande du filtre de mesure de gigue sont tirées du Tableau 1. Il convient de noter que le rapport d'amortissement et la fréquence naturelle non amortie sont liés au crêtage du gain et à la largeur de bande à 3 dB par les équations (IV.2-30) et (IV.2-31).

**Tableau IV.2-1/G.8251 – Paramètres généraux des calculs de simulation relatifs aux largeurs de bande de régénérateur selon la Recommandation G.783 (2 MHz, 8 MHz et 32 MHz, respectivement pour les unités OTU1, 2 et 3)**

Paramètre	Valeur
Pointe de gain $H_p$	1,0115 (0,1 dB)
Rapport d'amortissement $\zeta$	4,6465
$f_{HP,large\ bande} / f_{3dB}$	$2,5 \times 10^{-3}$
$f_{HP,haute\ bande} / f_{3dB}$	0,5
$f_{HP} / f_{3dB}$	10
$f_0 / f_{3dB}$	1339
$f_{3dB} / f_n$	9,4006

**Tableau IV.2-2a/G.8251 – Paramètres généraux des calculs de simulation utilisant les largeurs de bande de régénérateur OTU1 et OTU2 selon la Recommandation G.8251 (250 kHz et 1 MHz pour OTU1 et 2 respectivement)**

Paramètre	Valeur
Pointe de gain $H_p$	1,0115 (0,1 dB)
Rapport d'amortissement $\zeta$	4,6465
$f_{HP,large\ bande} / f_{3dB}$	$2,0 \times 10^{-2}$
$f_{HP,haute\ bande} / f_{3dB}$	4,0
$F_{LP} / f_{3dB}$	80
$f_0 / f_{3dB}$	10 710
$f_{3dB} / f_n$	9,4006

**Tableau IV.2-2b/G.8251 – Paramètres généraux des calculs de simulation utilisant les largeurs de bande de régénérateur OTU3 selon la Recommandation G.8251 (4 MHz)**

Paramètre	Valeur
Pointe de gain $H_p$	1,0115 (0,1 dB)
Rapport d'amortissement $\zeta$	4,6465
$f_{HP,large\ bande} / f_{3dB}$	$5,0 \times 10^{-3}$
$f_{HP,haute\ bande} / f_{3dB}$	4,0
$F_{LP} / f_{3dB}$	80
$f_0 / f_{3dB}$	10 755
$f_{3dB} / f_n$	9,4006

Pour chaque série de largeurs de bande, la description des résultats correspond aux cas suivants:

- bruit filtré passe-bas (par exemple dans récepteur optique, détecteur de phase, etc.)
- bruit filtré passe-haut (par exemple dans un oscillateur à tension variable):
  - bruit blanc de phase uniquement ( $Q$  infini);
  - bruit blanc de phase et bruit blanc de fréquence ( $Q = 535$ );
  - bruit blanc de phase et bruit blanc de fréquence ( $Q = 100$ );
  - bruit blanc de phase et bruit blanc de fréquence ( $Q = 30$ ).

Les trois cas associés à un facteur  $Q$  fini correspondent, pour OTU2, à la fréquence de coupure  $f_b$  entre le bruit blanc de fréquence et le bruit blanc de phase égale à 10 MHz, 53,5 MHz et 178 MHz. Les cas considérés sont censés représenter l'éventail de valeurs du facteur  $Q$  [la première valeur a été choisie de façon à correspondre à un chiffre rond pour la fréquence de coupure (cas OTU2)].

#### IV.2.2.1 Résultats correspondant aux largeurs de bande de régénérateur SDH (G.783)

Les Figures IV.2-3a et IV.2-3b présentent les résultats obtenus pour l'accumulation de gigue haute bande et large bande correspondant au bruit blanc filtré passe-bas et au bruit blanc filtré passe-haut (c'est-à-dire bruit blanc de phase uniquement), en supposant une accumulation aléatoire de gigue. La Figure IV.2-3a représente l'accumulation de gigue sur un nombre de régénérateurs 3R pouvant atteindre 1000, sur une échelle bilogarithmique. La Figure IV.2-3b représente les résultats sur une

échelle linéaire; le diagramme n'est pas prolongé au-delà de 200 régénérateurs 3R et présente donc uniquement des résultats relatifs à de plus petits nombres de régénérateurs.

Le diagramme fait apparaître les résultats suivants:

- la gigue large bande s'accumule plus rapidement que la gigue haute bande;
- le bruit introduit via un filtre passe-bas s'accumule plus rapidement que le bruit introduit via un filtre passe-haut.

En ce qui concerne la deuxième conclusion ci-dessus, le bruit introduit via un filtre passe-haut ne s'accumule presque pas tant que le nombre de régénérateurs 3R n'a pas atteint quelques centaines. Cette absence d'accumulation tient au fait que la plus grande partie du bruit se situe au-dessus de la largeur de bande du régénérateur; le bruit introduit dans un régénérateur est fortement filtré par les régénérateurs suivants. Il est à noter cependant que l'oscillateur à tension variable ne comprend ici aucun bruit blanc de fréquence. L'augmentation rapide, au-delà de quelques centaines de régénérateurs, est due au crêtage du gain des régénérateurs.

D'après les résultats avec plus de 100 régénérateurs, la gigue large bande et haute bande s'est accumulée dans une proportion d'environ 5,5 et 2,0 respectivement, pour le bruit blanc filtré passe-bas, et dans des proportions inférieures à 1,1 pour le bruit blanc filtré passe-haut. Au-delà de 1000 régénérateurs, la gigue large bande et haute bande s'est accumulée dans des proportions d'environ 21 000 et 2500 respectivement, pour le bruit blanc filtré passe-bas et dans des proportions d'environ 400 et 45 respectivement pour le bruit blanc filtré passe-haut.

Les Figures IV.2-4a et IV.2-4b présentent les valeurs de l'accumulation de gigue haute bande et large bande correspond au bruit filtré passe-haut pour différentes valeurs du bruit blanc de fréquence. La valeur plus ou moins importante du bruit blanc de fréquence est indiquée par le facteur  $Q$ ; tel qu'indiqué ci-dessus, les trois cas considérés correspondent à des fréquences de coupure de 10 MHz ( $Q = 535$ ), 53,5 MHz ( $Q = 100$ ), et 178 MHz ( $Q = 30$ ) pour le débit OTU2 [voir l'équation (IV.2-25)]. Une plus petite valeur de  $Q$  indique un bruit blanc de fréquence relativement plus important; d'après les équations (IV.2-24) et (IV.2-25), une réduction de  $Q$  dans une certaine proportion augmente la composante de bruit blanc de fréquence dans la même proportion. Comme prévu, l'accumulation de gigue est plus forte en présence d'une composante plus élevée de bruit blanc de fréquence (facteur  $Q$  plus petit). La valeur  $Q = 535$  fait apparaître une accumulation de gigue voisine de la moitié de l'accumulation observée en présence du bruit filtré passe-bas représenté aux Figures IV.2-3a et IV.2-3b. En revanche, les valeurs  $Q = 100$  et  $Q = 30$  font apparaître des accumulations plus élevées, très voisines de celles observées en présence du bruit filtré passe-bas représenté aux Figures IV.2-3a et IV.2-3b pour la gigue haute bande comme pour la gigue large bande. La concordance des résultats relatifs aux filtres passe-haut et passe-bas tient au fait que, dans ce domaine de valeurs de  $Q$  (c'est-à-dire inférieur à 100) et pour les rapports de largeurs de bande du régénérateur et du filtre de mesure considérés dans ce cas, le passage d'un bruit blanc de fréquence par un filtre passe-haut donne un bruit identique à celui du passage d'un bruit blanc de phase par un filtre passe-bas.

Il est à noter que les accumulations de gigue pour  $Q = 100$  et  $Q = 30$  sont très proches. En effet, dans ces deux cas, la fréquence  $f_b$  est suffisamment au-dessus de la largeur de bande du régénérateur pour que la contribution du bruit blanc de fréquence soit prédominante. Ainsi, le rapport  $f_0/f_{3dB}$  est de 1339 (Tableau IV.2-1), soit une valeur suffisamment élevée par comparaison au facteur  $Q$  dans les cas considérés (30 et 100). Toutefois cela ne signifie nullement que l'accumulation absolue de gigue est la même dans ces deux cas; les résultats présentés aux Figures IV.2-3a et IV.2-4b concernent l'accumulation relative de gigue (gigue à la sortie du  $j^{\text{ième}}$  régénérateur divisée par la gigue à la sortie du premier régénérateur, et c'est cette quantité qui est la même dans les deux cas).

A ce stade les résultats obtenus montrent la rapidité d'accumulation de la gigue haute bande et large bande pour différents types de bruit. Toutefois il est également intéressant d'établir si, pour

un modèle donné, les limites respectives de production de gigue haute bande ou large bande sont plus strictes. A cet effet, il faut connaître le rapport de production de gigue large bande à la production de gigue haute bande pour un régénérateur déterminé, et ce pour chaque modèle de bruit (en supposant la même source de bruit pour la production de gigue haute bande et large bande). Le Tableau IV.2-3 indique les rapports en question.

**Tableau IV.2-3/G.8251 – Rapport de la production de gigue efficace large bande à haute bande, pour un régénérateur 3R (largeur de bande SDH à 3 dB)**

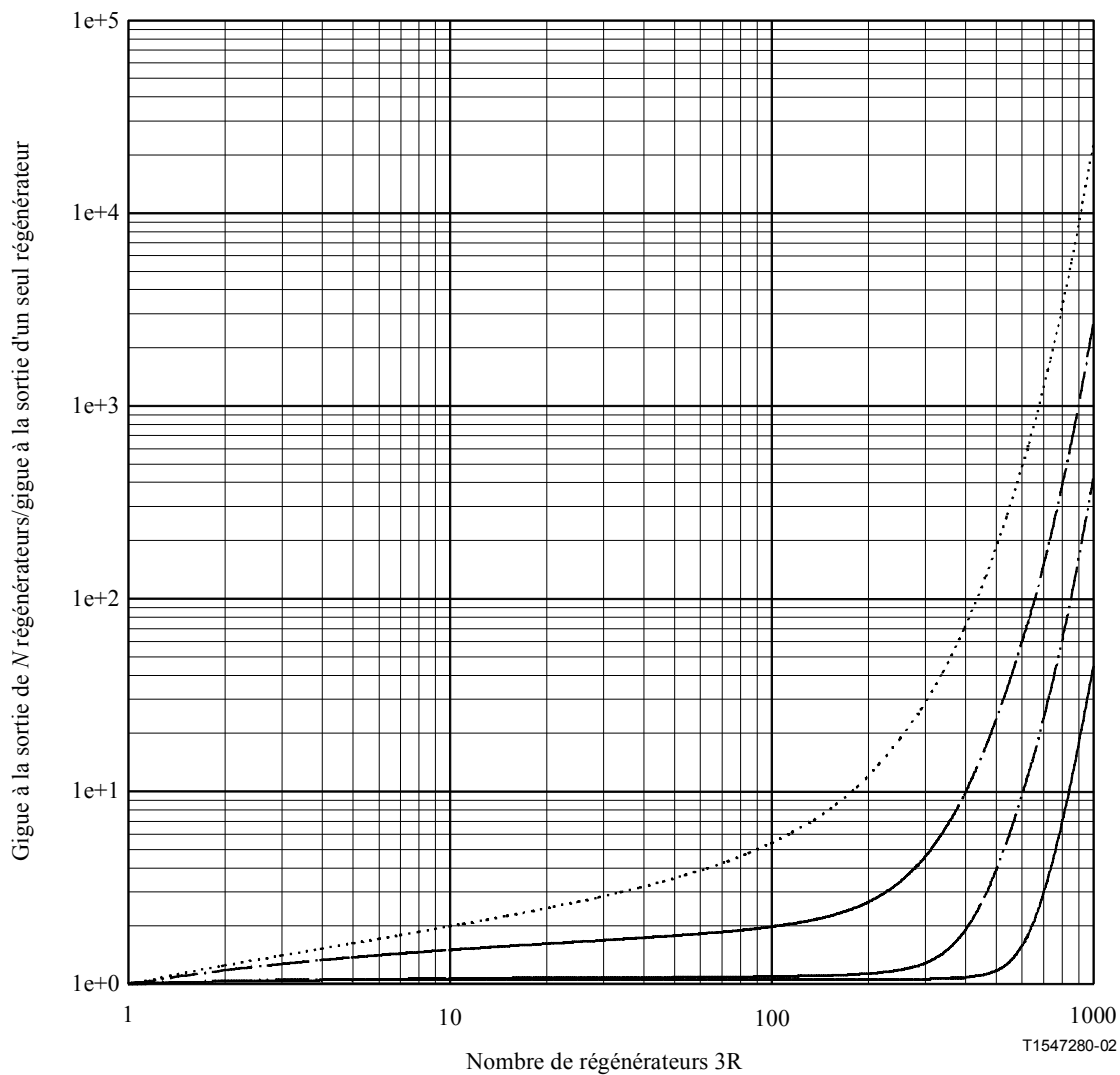
Cas	Rapport
Bruit filtré passe-bas	1,2500
Bruit filtré passe-haut (sans bruit blanc de fréquence)	1,0136
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 535$ )	1,0502
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 100$ )	1,2078
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 30$ )	1,2400

Ces rapports montrent que, pour les modèles de bruit passe-haut, la production de gigue large bande n'est pas notablement supérieure à la production de gigue haute bande. Même dans le cas du modèle de bruit passe-bas, le premier type de gigue dépasse de seulement 25% le second. Ces rapports sont nettement inférieurs au facteur 3 associé aux prescriptions de production de gigue large bande et haute bande (0,3 UIpp contre 0,1 UIpp en large bande et en haute bande respectivement; voir Tableau 5).

Les résultats (Figures IV.2-3, IV.2-4 et Tableau IV.2-3) permettent à présent d'évaluer la possibilité d'observer les limites de gigue de réseau indiquées au Tableau 1 pour une chaîne de référence de 50 régénérateurs 3R, ces derniers étant supposés conformes aux prescriptions SDH de la Rec. UIT-T G.783 (et en l'occurrence les limites de gigue de réseau *ne peuvent* être observées). Il ressort de la Figure IV.2-3b que pour le bruit blanc de phase filtré passe-bas, l'accumulation de gigue haute bande s'effectue dans une proportion de 1,5 au-delà d'environ 10 régénérateurs, et de 1,5 à 2,0 au-delà de 50 régénérateurs. Il ressort par ailleurs de la Figure IV.2-4b que, pour un bruit filtré passe-haut avec un facteur  $Q = 30$  ou 100, l'accumulation de gigue haute bande s'effectue dans une proportion de 1,5 au-delà de 10 et 15 régénérateurs, respectivement, et de 1,5 à 2,0 au-delà de 50 régénérateurs; puisque le rapport de la limite de gigue de réseau haute bande à la spécification de production de gigue haute bande est de 1,5 (c'est-à-dire 0,15/0,1), il s'ensuit qu'une chaîne de référence de régénérateurs, individuellement conformes aux spécifications de production de gigue et associés à un facteur  $Q$  faible ou moyen, ne sera pas conforme à la limite de gigue de réseau. En fait, cette limite sera dépassée au-delà d'environ 10 ou 11 régénérateurs. Seuls les cas associés à un facteur  $Q$  élevé ( $Q = 535$ , c'est-à-dire le bruit blanc de phase filtré passe-haut, qui correspond à une valeur  $Q$  tendant vers l'infini) correspondent à la possibilité d'observer la limite de gigue de réseau avec un nombre de régénérateurs supérieur à 50; il n'y a là pratiquement plus d'accumulation de gigue haute bande. Il est à noter que, pour  $Q = 535$  l'accumulation de gigue large bande après 50 régénérateurs atteint une proportion d'environ 1,9. Cette valeur est conforme à la limite de gigue de réseau large bande, puisque le rapport de la limite de réseau à la prescription de production de gigue est de 5 (c'est-à-dire 1,5/0,3).

La présence conjointe de bruit filtré passe-bas et de bruit filtré passe-haut (oscillateur à tension variable) exige théoriquement la connaissance de l'importance relative de chaque type de bruit. Cette information, ainsi que le résultat des calculs de simulation présentés aux Figures IV.2-3 et IV.2-4 ont permis d'établir des courbes similaires pour les bruits mixtes. Il ressort toutefois des résultats ci-dessus que, avec un facteur  $Q$  suffisamment petit (c'est-à-dire moins de 100 environ et à coup sûr avec des valeurs voisines de 30), les bruits filtrés passe-bas et passe-haut conduisent à des résultats similaires en matière d'accumulation *relative* de gigue. Il est alors inutile d'effectuer des

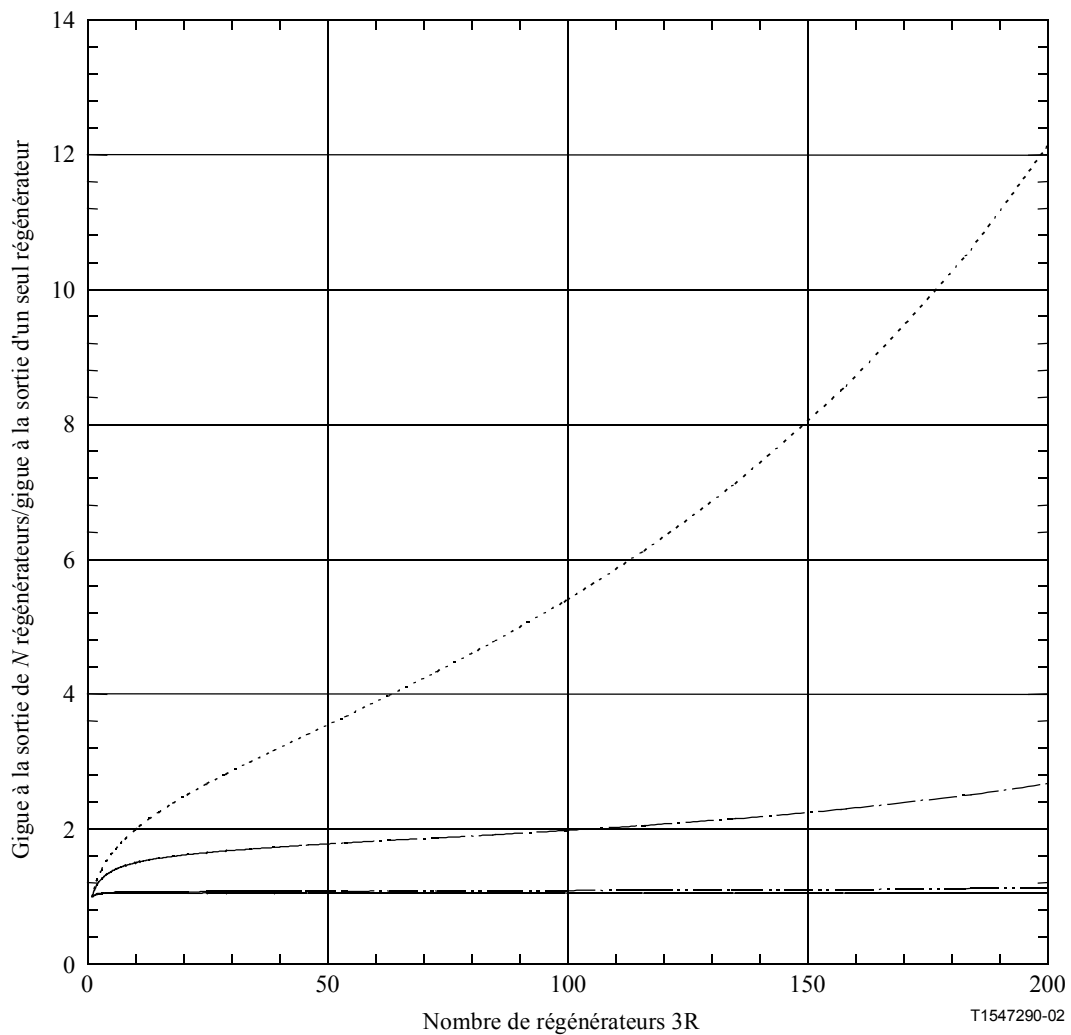
calculs distincts de simulation pour le bruit filtré passe-haut et pour le bruit filtré passe-bas, ni de déterminer l'importance relative de chaque type de bruit. Par contre, il suffit de connaître le niveau total de production de bruit (ainsi que la largeur de bande et la pointe de gain de régénérateur) pour déterminer l'accumulation de gigue.



- ..... Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- · - · - · Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- · - · - · Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.783 (SDH), accumulation de gigue aléatoire, absence de bruit blanc de fréquence dans le bruit (filtré passe-haut) de l'oscillateur à tension variable. Diagramme bilogarithmique.

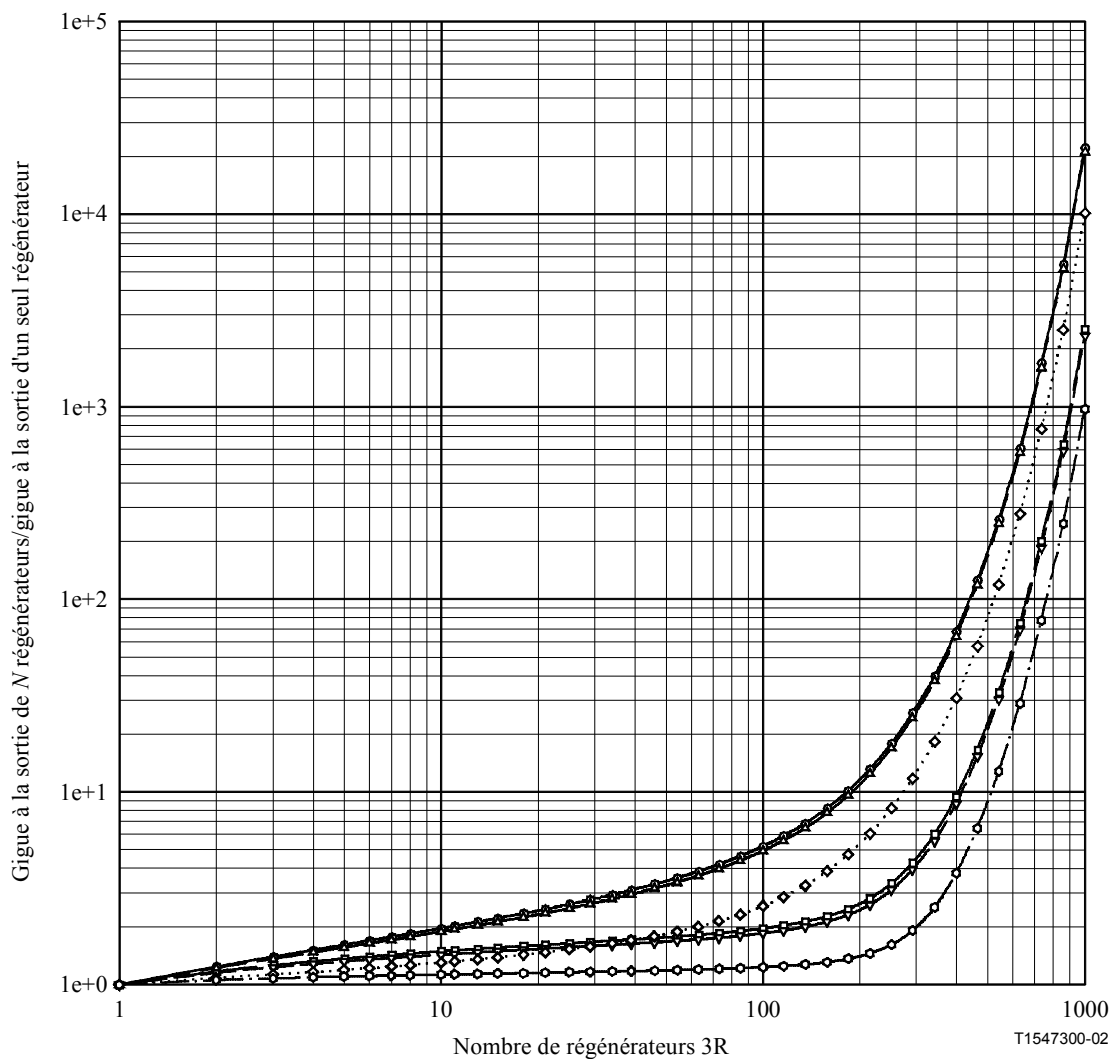
**Figure IV.2-3a/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**



- ..... Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- . - . . Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- . . - . Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.783 (SDH), accumulation de gigue aléatoire, absence de bruit blanc de fréquence dans le bruit (filtré passe-haut) de l'oscillateur à tension variable. Diagramme linéaire.

**Figure IV.2-3b/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**

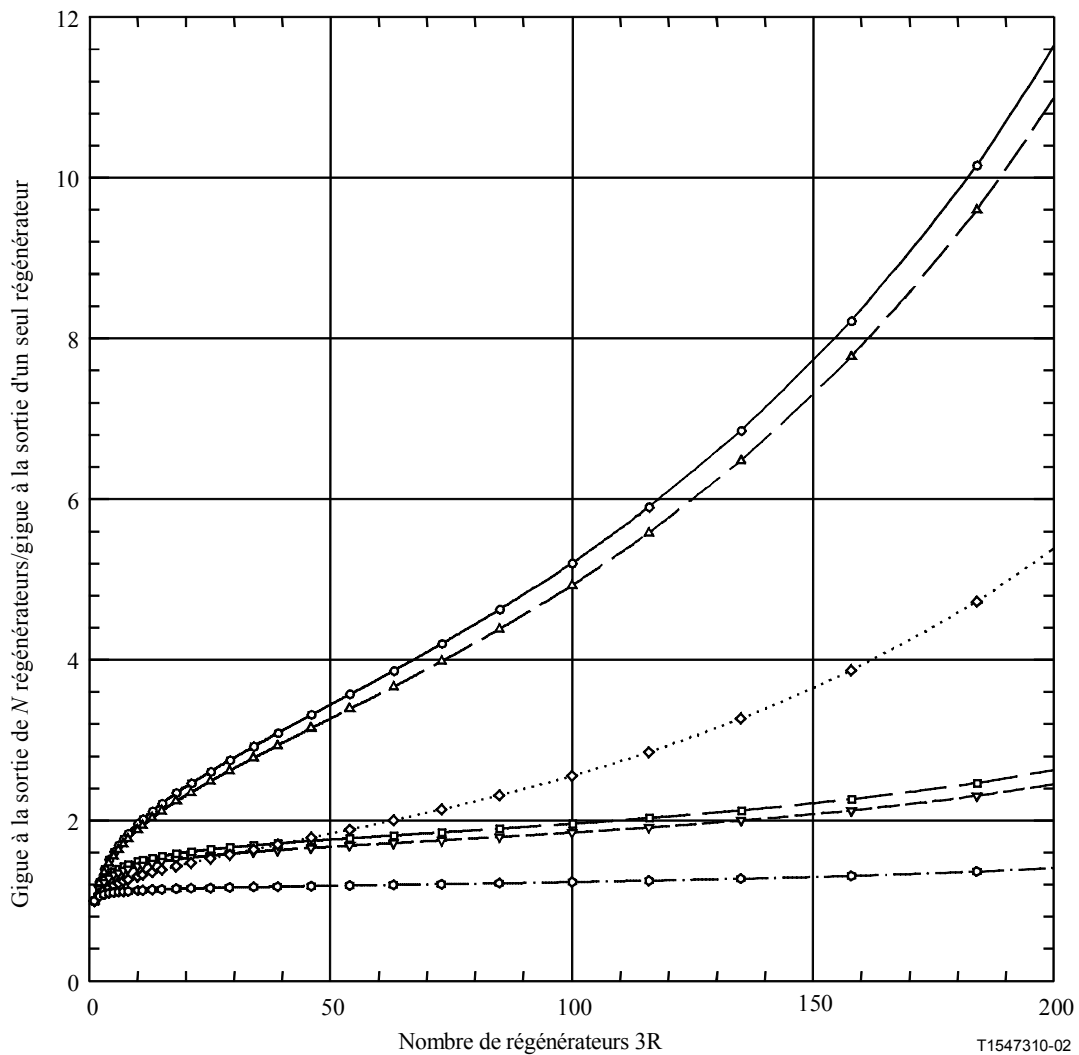


- Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- ▲— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ▼— Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- .....◇..... Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$
- ... Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.783 (SDH), accumulation de gigue aléatoire, bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme bilogarithmique.

**Figure IV.2-4a/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**





- Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- ▲— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ▼— Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ◇···· Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$
- Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.783 (SDH), accumulation de gigue aléatoire, bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme linéaire.

**Figure IV.2-4b/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**

#### **IV.2.2.2 Résultats correspondant aux largeurs de bande de régénérateurs 3R OTN (dans la présente Recommandation): gigue haute bande associée à des régénérateurs OTU1, OTU2 et OTU3; gigue large bande associée à des régénérateurs OTU1 et OTU2**

Les Figures IV.2-5 et IV.2-6 (parties a et b de chaque figure) font apparaître les résultats en matière de gigue large bande obtenus pour les régénérateurs 3R OTU1 et OTU2, d'autre part les résultats en matière de gigue haute bande relatifs aux régénérateurs 3R OTU1, OTU2, et OTU3. Les largeurs de bande à 3 dB sont plus étroites que les largeurs de bande correspondantes de régénérateurs SDH dans une proportion de 8. Les Figures IV.2-5a et IV.2-5b présentent les résultats obtenus en matière d'accumulation de gigue haute bande et large bande pour le bruit blanc filtré passe-bas et pour le bruit blanc filtré passé-haut (c'est-à-dire bruit blanc de phase uniquement) dans l'hypothèse d'une

accumulation systématique de gigue. Les Figures IV.2-6a et IV.2-6b présentent les résultats en matière d'accumulation de gigue haute bande et large bande pour le bruit filtré passe-haut, avec différents niveaux de bruit blanc de fréquence. Comme dans les cas précédents, sur la base des largeurs de bande de régénérateurs SDH, l'importance relative du bruit blanc de fréquence est indiquée par la valeur du facteur  $Q$ ; les valeurs de  $Q$  utilisées dans ces calculs étaient les mêmes que pour les cas SDH ( $Q = 30, 100, 535$ ). Une plus petite valeur de  $Q$  correspond à une plus forte contribution relative du bruit blanc de fréquence WFM.

Le Tableau IV.2-4 présente les valeurs du rapport de la production de gigue large bande à la production de gigue haute bande pour un régénérateur seul, pour chaque modèle de bruit (en supposant la même source de bruit pour la production de gigue haute bande et large bande). Par comparaison aux résultats présentés au Tableau IV.2-3 concernant les largeurs de bande SDH, le rapport de l'accumulation de gigue large bande à l'accumulation de gigue haute bande est alors plus élevé. De plus, l'accroissement même de ce rapport est d'autant plus grand qu'il s'agit de cas comportant une plus forte contribution des basses fréquences du spectre. Pour le bruit filtré passe-bas, cela tient au fait que la mesure de la gigue haute bande élimine davantage de bruit par comparaison à la mesure de gigue large bande et que le bruit résiduel après filtrage dans la mesure large bande, rapporté à la mesure haute bande, est d'autant plus important que la largeur de bande du régénérateur est plus étroite. En ce qui concerne les modèles de bruit filtré passe-haut, on observe un phénomène identique par rapport au bruit filtré passe-bas lorsque le facteur  $Q$  diminue, puisque alors, la production aux basses fréquences s'apparente davantage au modèle de bruit filtré passe-bas.

**Tableau IV.2-4/G.8251 – Rapport de la production de gigue efficace large bande à haute bande, pour un régénérateur 3R OTU1 ou OTU2 (largeurs de bande à 3 dB OTN tirées du Tableau A.4)**

Cas	Rapport
Bruit filtré passe-bas	2,2725
Bruit filtré passe-haut (sans bruit blanc de fréquence)	1,0308
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 535$ )	1,4862
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 100$ )	2,1927
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 30$ )	2,2605

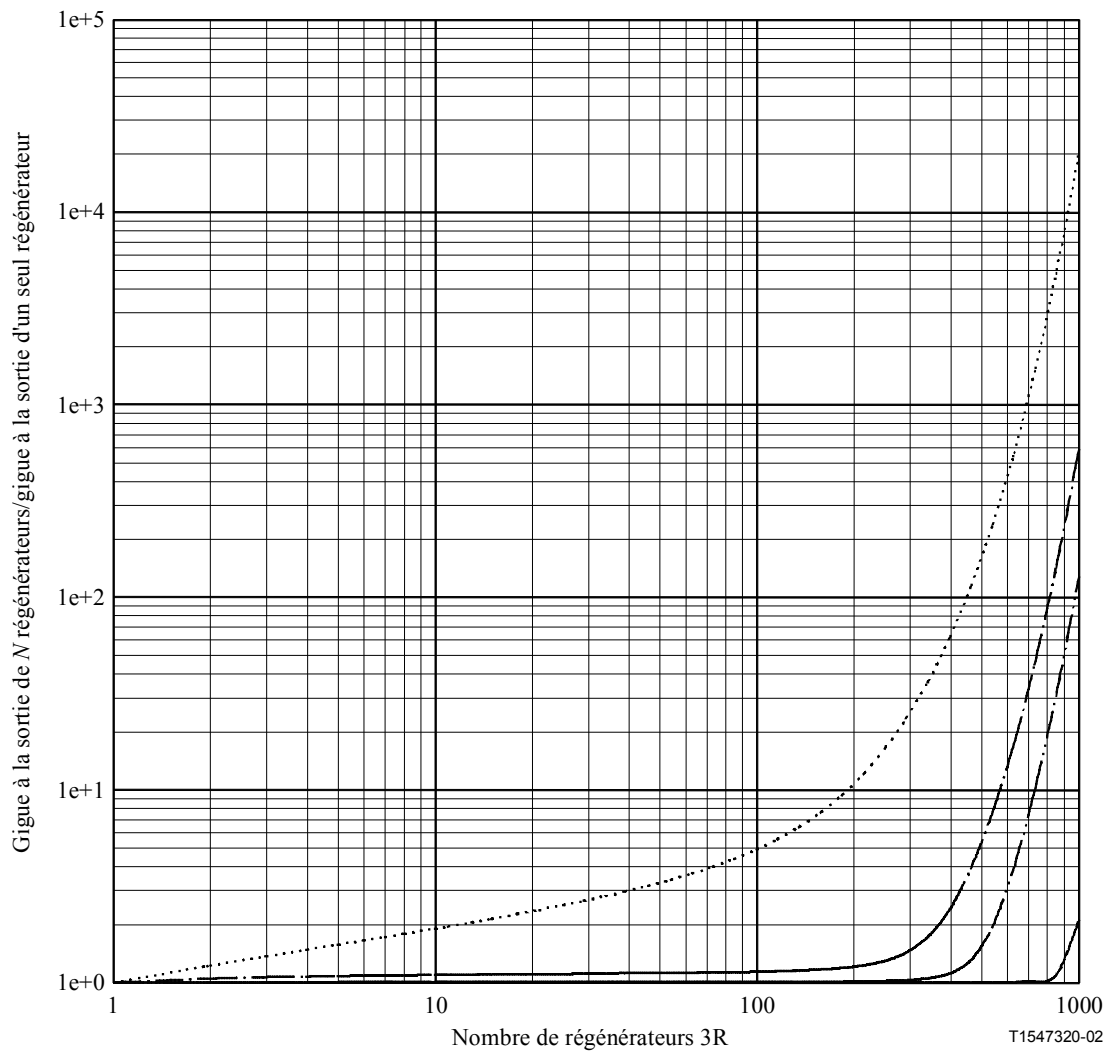
Les résultats d'accumulation de gigue sont quantitativement semblables pour les cas SDH correspondants, sauf en règle générale lorsque l'accumulation de gigue est plus faible. Par exemple, lorsque le nombre de régénérateurs est supérieur à 100 la gigue large bande s'accumule dans une proportion d'environ 5 pour le bruit filtré passe-bas (Figure IV.2-5b) et dans des proportions d'environ 4,8, 4,8, et 4 pour le bruit filtré passe-haut avec des valeurs de  $Q$  respectivement égales à 30, 100, et 535. Les proportions correspondantes d'accumulation de gigue relatives aux largeurs de bande de régénérateurs SDH sont respectivement de 5,5, 5,2, 5, et 2,6. Il est à noter que le seul de ces cas comportant une accumulation de gigue SDH plus faible correspond au bruit filtré passe-haut avec un facteur  $Q = 535$ . Comme pour les calculs fondés sur la largeur de bande du régénérateur SDH, les accumulations de gigue  $Q = 100$  et  $Q = 30$  sont très proches.

Les résultats obtenus (Figures IV.2-5, IV.2-6 et Tableau IV.2-4) permettent à présent de déterminer la possibilité de respecter les limites de gigue OTU1 et OTU2 du Tableau 1 dans le cas d'une chaîne de référence constituée de 50 régénérateurs 3R, en supposant ces derniers conformes aux spécifications OTN indiquées au Tableau A.4 (en l'occurrence les limites de réseau *peuvent* être respectées). D'après la Figure V.2-5b, tant pour le bruit blanc de phase filtré passe-bas que passe-haut, l'accumulation de gigue reste très voisine d'une proportion unité jusqu'à 200 régénérateurs. D'après la Figure IV.2-6b pour le bruit filtré passe-haut avec  $Q = 30, 100$  ou 535, l'accumulation de

gigue haute bande reste également très proche d'une proportion unité jusqu'à 200 régénérateurs. Puisque le rapport de la limite de réseau de gigue de réseau haute bande à la production de gigue haute bande est de 1,5 (c'est-à-dire 0,15/0,1), il s'ensuit qu'une chaîne de référence de régénérateurs, individuellement conformes aux spécifications de production de gigue, respectera la limite de gigue de réseau. Les calculs de simulation conduisent à ce résultat pour 200 régénérateurs; aussi la limite de gigue de réseau haute bande est-elle certainement observée pour des chaînes de 50 régénérateurs.

D'après le Tableau IV.2-4, la valeur la plus élevée du rapport de la production de gigue large bande à la production de gigue haute bande est d'environ 2,27, et correspond au modèle de bruit filtré passe-bas. Puisque la valeur spécifiée du rapport de la production de gigue large bande à la production de gigue haute bande est égale à 3 (0,3/0,1), un régénérateur conforme à la spécification de production de gigue haute bande est également conforme à la spécification de production de gigue large bande.

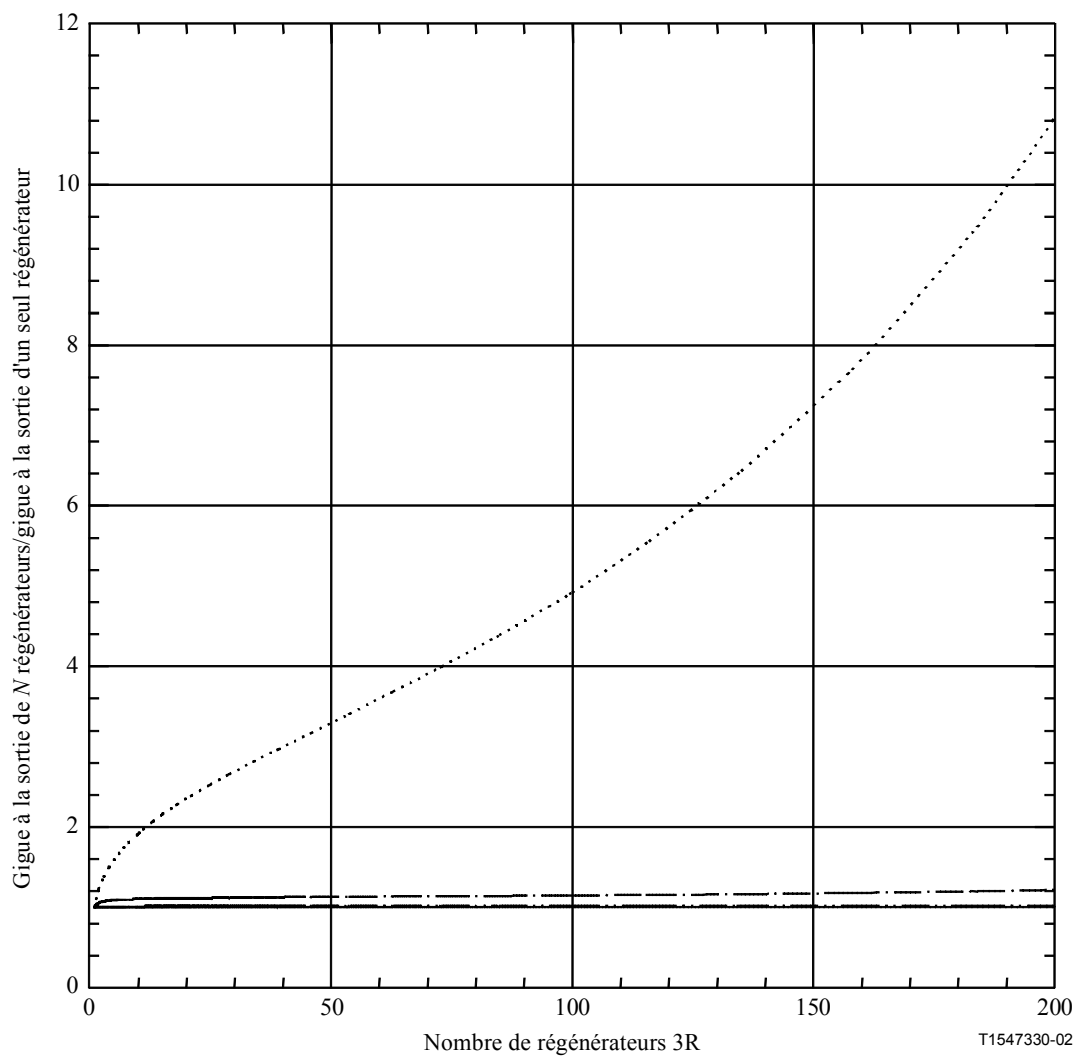
Enfin, d'après les Figures IV.2-5 et IV.2-6 les limites de gigue de réseau large bande sont observées dans le cas d'une chaîne de 50 régénérateurs 3R. Le rapport de la limite de gigue de réseau large bande à la limite de production de gigue large bande est égal à 5 (1,5/0,3). D'après la Figure V.2-5b la gigue large bande augmente dans des proportions de 5 et de 1, lorsque le nombre de régénérateurs dépasse 100, respectivement pour le bruit blanc de phase filtré passe-bas et pour le bruit blanc de phase filtré passe-haut. La Figure IV.2-6b montre que la gigue large bande augmente dans des proportions de 4,8, 4,8, et 4, au-delà de 100 régénérateurs, en présence du bruit filtré passe-haut pour des valeurs de Q respectivement égales à 30, 100, et 535.



- ..... Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- . - . . Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- - - - - Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN), accumulation de gigue aléatoire, absence de bruit blanc de fréquence dans le bruit (filtré passe-haut) de l'oscillateur à tension variable. Diagramme bilogarithmique.

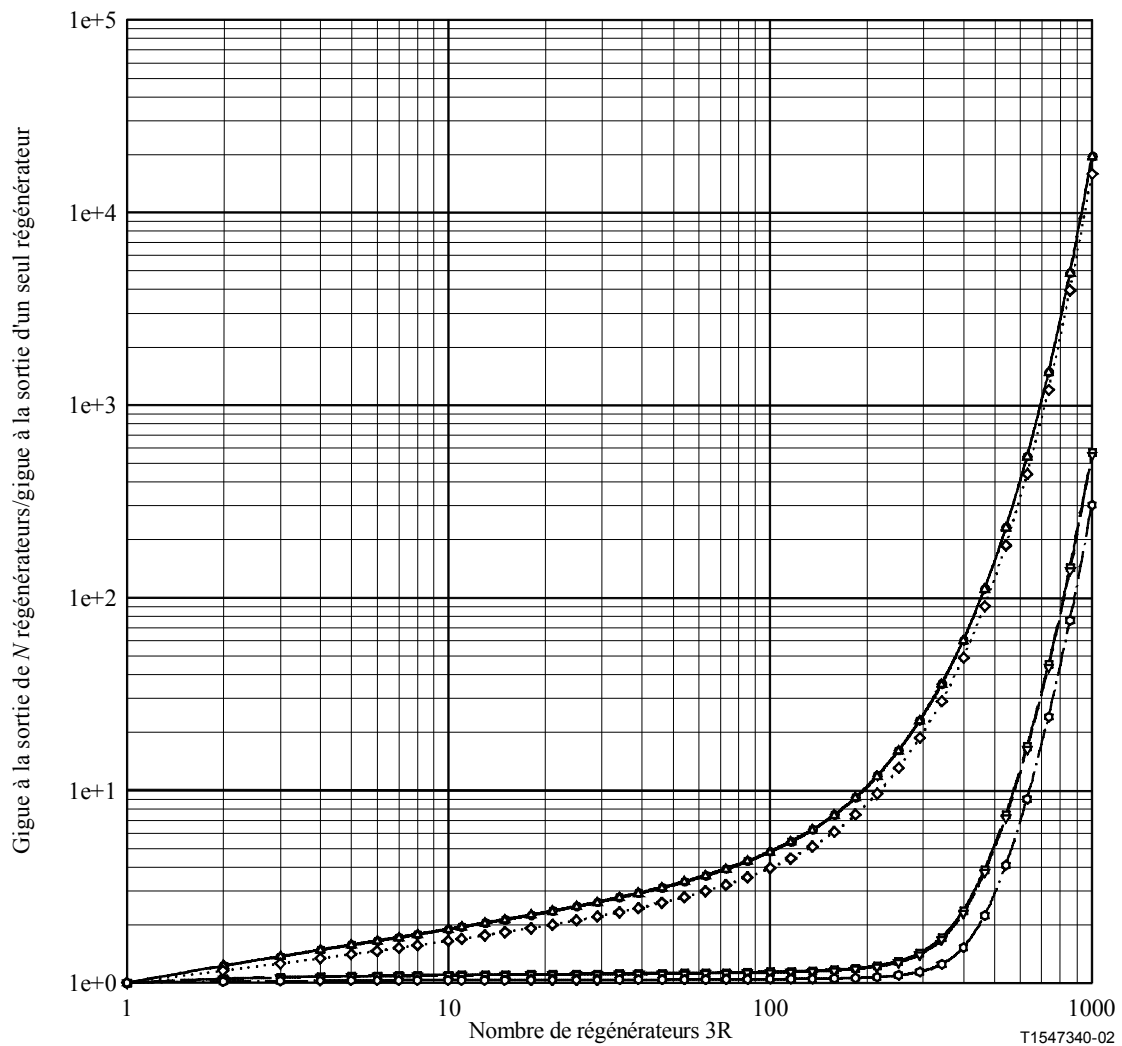
**Figure IV.2-5a/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**



- ..... Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- · - · - Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- · · - · Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- Gigue haute bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN), accumulation de gigue aléatoire, absence de bruit blanc de fréquence dans le bruit (filtré passe-haut) de l'oscillateur à tension variable. Diagramme linéaire.

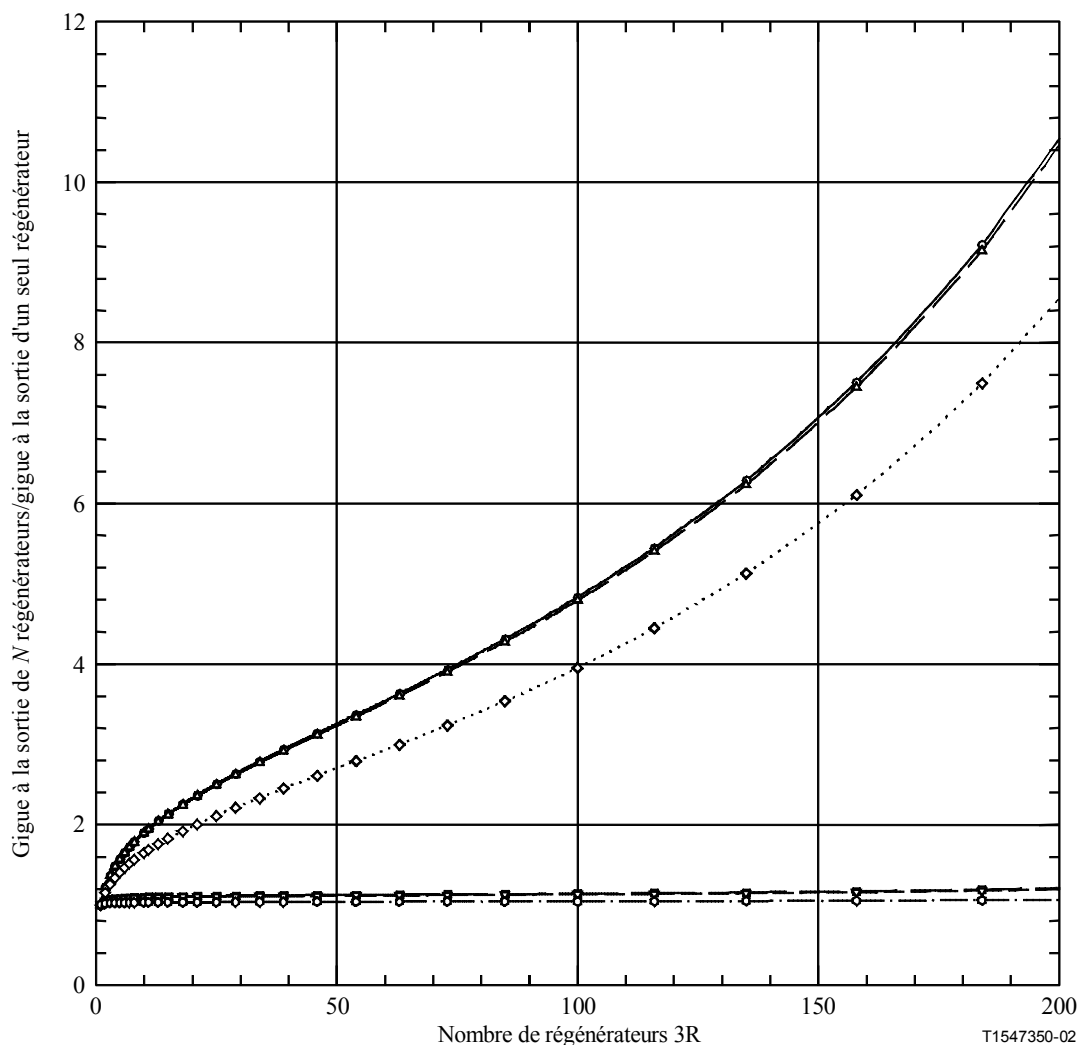
**Figure IV.2-5b/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**



- Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- △— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ▽— Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ...◇... Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$
- ◇— Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN), accumulation de gigue aléatoire, bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme bilogarithmique.

**Figure IV.2-6a/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**



- Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- △— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ▽— Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- .....◇..... Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$
- ... Gigue haute bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN), accumulation de gigue aléatoire, bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme linéaire.

**Figure IV.2-6b/G.8251 – Augmentation relative de la gigue dans  $N$  régénérateurs 3R**

#### IV.2.2.3 Résultats correspondant aux largeurs de bande de régénérateur 3R OTN (dans la présente Recommandation): gigue large bande pour régénérateur OTU3

Les Figures IV.2-7a et IV.2-7b présentent les résultats d'accumulation de gigue large bande OTU3. La comparaison avec les résultats obtenus ci-dessus pour les régénérateurs OTU1 et OTU2 ne fait apparaître pratiquement aucun changement (Figure IV.2-7a comparée aux courbes de gigue large bande des Figures IV.2-5a et IV.2-6a; Figure IV.2-7b comparée aux Figures IV.2-5b et IV.2-6b. Le Tableau IV.2-4 indique le rapport de la production de gigue efficace large bande à haute bande, concernant un seul régénérateur 3R OTU1 et OTU2. Les résultats correspondants pour OTU3, obtenus à partir des nouveaux calculs de simulations figurent au Tableau IV.2-5 (les résultats

relatifs aux régénérateurs OTU1 et OTU2 sont indiqués entre parenthèses à des fins de comparaison). Les résultats relatifs aux régénérateurs OTU3 sont pratiquement identiques aux résultats OTU1 et OTU2 correspondants.

**Tableau IV.2-5/G.8251 – Rapport de la production de gigue efficace large bande à haute bande, pour un régénérateur 3R OTU3 (les résultats OTU1 et OTU3 tirés du Tableau IV.2-4 sont indiqués entre parenthèses à des fins de comparaison)**

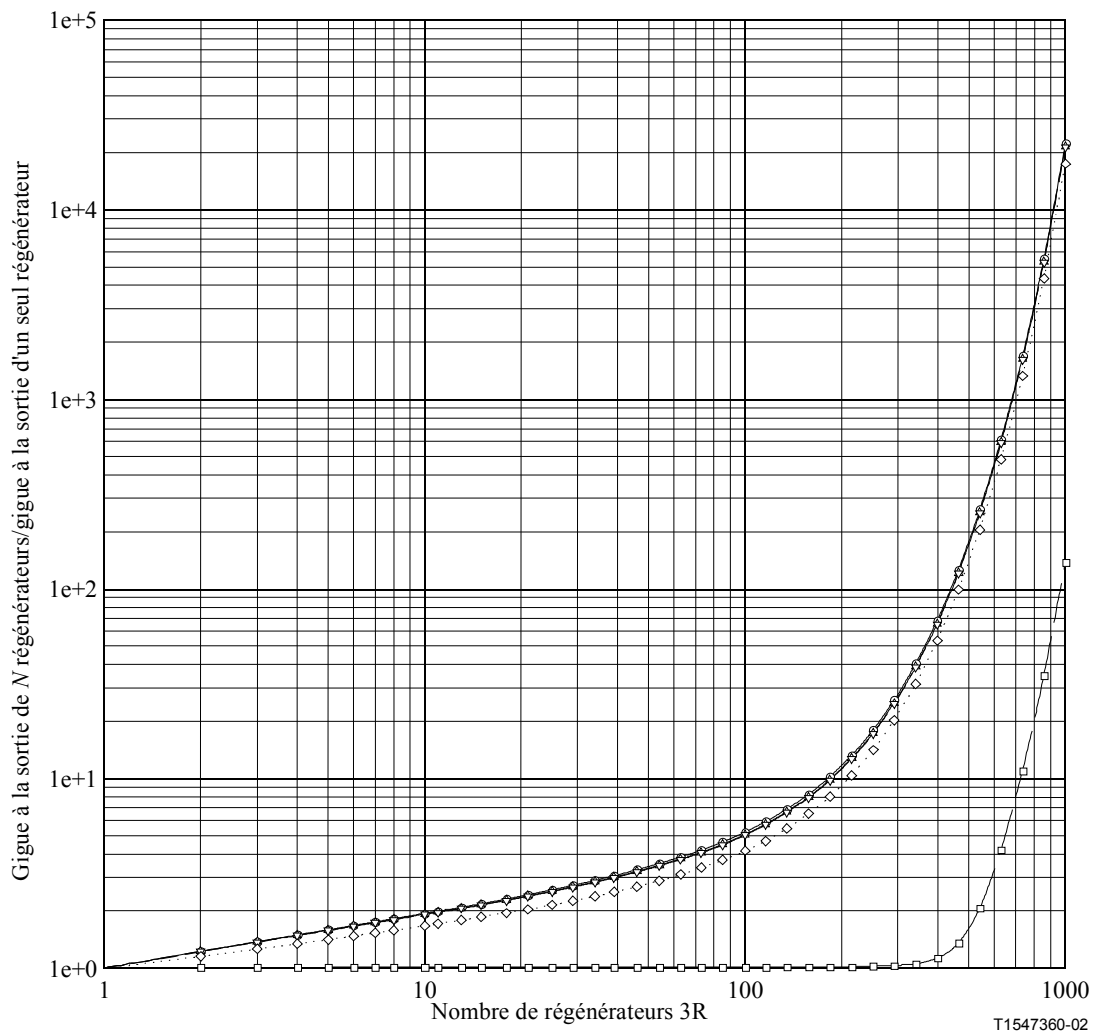
Cas	Rapport
Bruit filtré passe-bas	2,2898 (pour 2,2725)
Bruit filtré passe-haut (sans bruit blanc de fréquence)	1,0308 (identique)
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 535$ )	1,4946 (pour 1,4862)
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 100$ )	2,2055 (pour 2,1927)
Bruit filtré passe-haut avec bruit blanc de fréquence ( $Q = 30$ )	2,2734 (pour 2,2605)

Les résultats obtenus permettent maintenant de vérifier le caractère acceptable de l'accumulation de gigue large bande OTU3. D'après le Tableau IV.2-5, la valeur la plus défavorable du rapport de la production de gigue large bande à haute bande (pour tous les types de bruit) est d'environ 2,29 (contre 2,27 pour les régénérateurs OTU1 et OTU2); puisque la prescription de ce rapport est de 12, un régénérateur 3R OTU3 conforme à la spécification de production de gigue haute bande est conforme à la spécification de production de gigue large bande.

Enfin, il ressort de la Figure IV.2-7b que le facteur le plus élevé de la gigue efficace large bande après 100 régénérateurs, si l'on considère tous les types de bruit, correspond à un rapport d'environ 5,2 pour un bruit blanc de phase filtré passe-bas. Bien que ce taux d'accroissement soit supérieur à la limite de réseau de gigue large bande rapportée à la production de gigue large bande (rapport égal à 5, soit  $6,0/1,2$ ), la limite de réseau est encore observée en supposant la conformité aux spécifications de gigue haute bande. En effet et d'après les résultats indiqués au Tableau IV.2-5, l'observation de la limite de production de gigue haute bande de 0,1 UIpp signifie que la production de gigue large bande sera limitée à 0,229 UIpp et non à 1,2 UIpp. L'accumulation de gigue large bande sera donc de  $(5,2)(0,229) = 1,19$  UIpp. En tout état de cause, ce résultat est établi pour 100 régénérateurs; avec 50 régénérateurs (voir modèle théorique de référence, Appendice III HRM), la gigue large bande augmente dans une proportion de 3,4, c'est-à-dire selon un rapport nettement inférieur à 5.

Les prescriptions de production de gigue large bande des régénérateurs OTU3 sont donc compatibles avec la largeur de bande de transfert de gigue OTU3 et le modèle théorique de référence de l'Appendice III HRM.

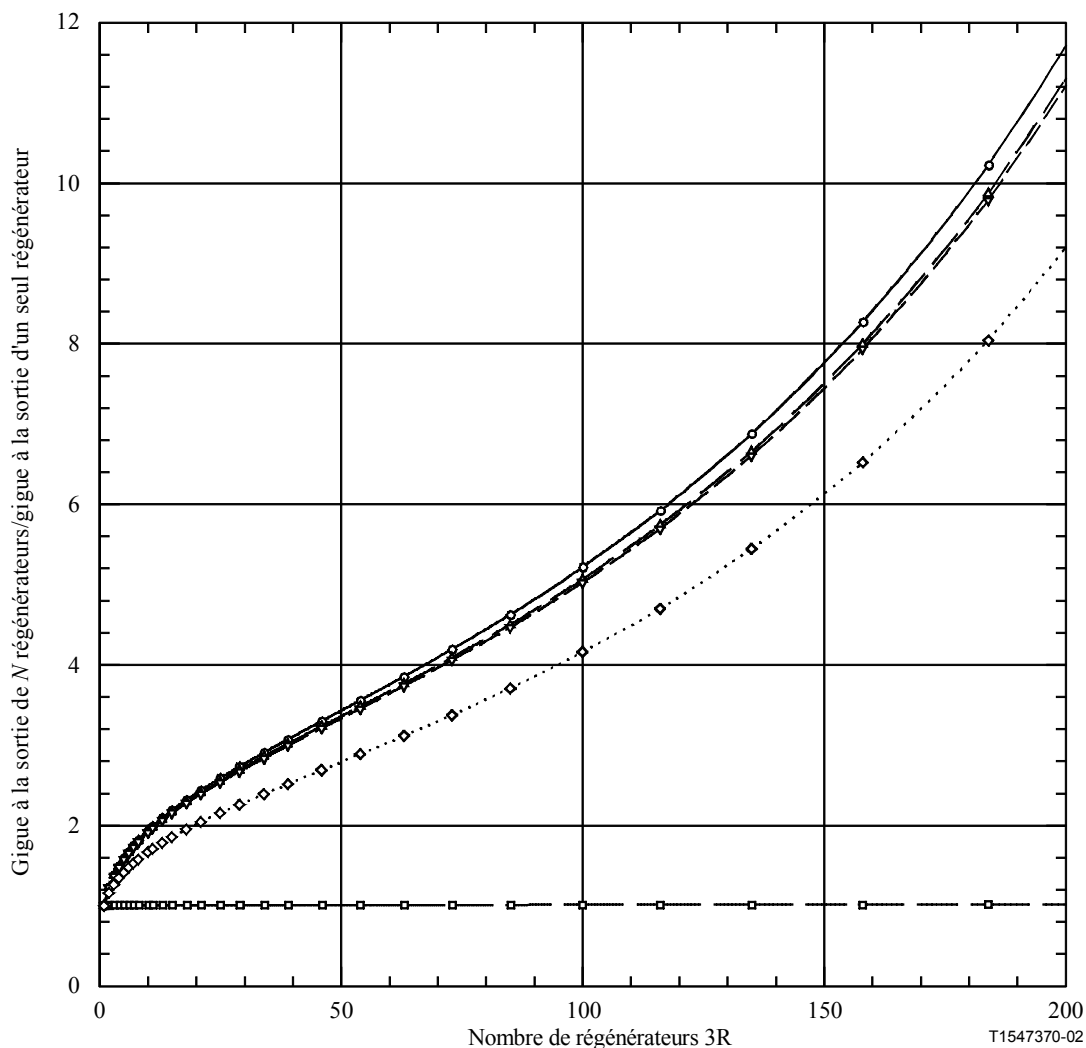




- Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- △— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- ▽— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- .....◇..... Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN); accumulation aléatoire de gigue; modèles de bruit: 1) bruit filtré passe-bas, 2) bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable sans bruit blanc de fréquence et 3) bruit (filtré passe-haut) d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme bilogarithmique.

**Figure IV.2-7a/G.8251 – Augmentation relative de la gigue large bande OTU3 dans  $N$  régénérateurs 3R**



- Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-bas
- Gigue large bande, bruit blanc de phase filtré passe-haut
- △— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 30$
- ▽— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 100$
- ◇— Gigue large bande, bruit d'oscillateur à tension variable avec  $Q = 535$

NOTE – Hypothèses: largeurs de bande des régénérateurs 3R conformes aux prescriptions G.8251 (OTN); accumulation aléatoire de gigue; modèles de bruit: 1) bruit filtré passe-bas, 2) bruit filtré passe-haut d'oscillateur à tension variable sans bruit blanc de fréquence et 3) bruit (filtré passe-haut) d'oscillateur à tension variable avec bruit blanc de fréquence et bruit blanc de phase et coefficient  $Q$  indiqué. Diagramme linéaire.

**Figure IV.2-7b/G.8251 – Augmentation relative de la gigue large bande OTU3 dans N régénérateurs 3R**

#### IV.2.3 Références (concernant l'Appendice IV)

- [1] VARMA (E. L.), WU (J.): Analysis of Jitter Accumulation in a Chain of Digital Regenerators, *Proceedings of IEEE Globecom*, Vol. 2, pp. 653-657, 1982.
- [2] TRISCHITTA (P. R.) and VARMA (E. L.): Jitter in Digital Transmission Systems, *Artech House*, Norwood, MA, 1989.
- [3] WOLAVER (D. H.): Phase-Locked Loop Circuit Design, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

- [4] GARDNER (F. M.): Phaselock Techniques, 2nd Edition, *Wiley*, New York, 1979.
- [5] LEESON (D. B.): A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum, *Proc. IEEE*, pp. 329-330, février, 1966.

### IV.3 Modèle 2

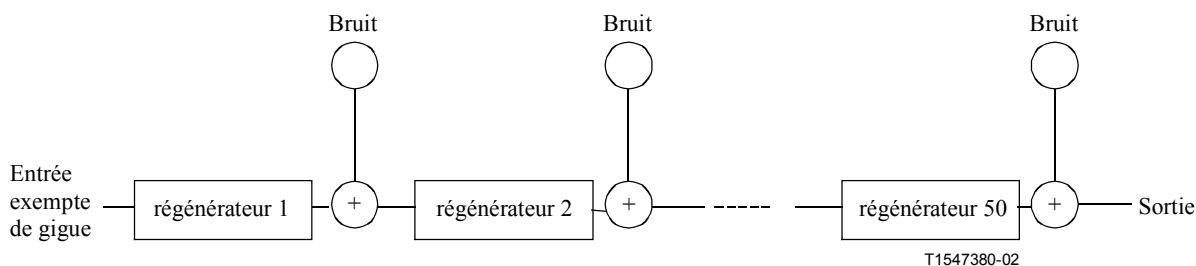


Figure IV.3-1/G.8251 – Schéma du modèle 2

#### IV.3.1 Introduction

On suppose un nombre maximal de 50 régénérateurs entre le mappage et le démappage consécutif dans un îlot OTN. Dans le cas des systèmes WDM de multiplexage par répartition de longueur d'onde utilisant des amplificateurs optiques et des dispositifs de compensation de la dispersion, il est prudent de prévoir au moins 300 km entre deux régénérations (sur une longueur totale de 15 000 km). Le modèle pris en compte dans les calculs précédents (régénérateurs SDH) consiste en une boucle à verrouillage de phase de deuxième ordre, qui filtre le bruit large bande. Le bruit large bande est assimilé par hypothèse à une gigue liée à la configuration binaire, à densité spectrale de puissance constante. La largeur de bande de 8 MHz à 3 dB du régénérateur constitue le filtre de conformation du bruit. La valeur de la gigue de sortie mesurée au moyen d'un filtre passe-bande (4 MHz à 80 MHz) est de 0,01 UI<sub>eff</sub>. La Rec. UIT-T G.825 donne une description détaillée du filtre.

Un dispositif de filtrage identique à celui de la Rec. UIT-T G.825 est utilisé ci-après en raison de la similitude entre les régénérateurs STM-64 et OTU2; le débit OTU2 dépasse d'environ 7,6% le débit STM-64. La production maximale de gigue admise d'un régénérateur STM-64 aux termes de la Rec. UIT-T G.783 est indiquée pour deux combinaisons de filtrage passe-haut et passe-bas. La gigue mesurée dans la bande 4-80 MHz ne doit pas dépasser 0,1 UI<sub>pp</sub>, tandis que la gigue mesurée dans la bande 20 kHz-80 MHz doit rester inférieure à 0,3 UI<sub>pp</sub>. Il est donc évident que les fréquences inférieures à 4 MHz peuvent concentrer 90% de la puissance de bruit totale.

En supposant une largeur de bande de 8 MHz et un crêtage de gain de 0,1 dB pour un régénérateur de ce type, il ne serait pas possible de les installer en série sans dépasser la tolérance de gigue de 0,15 UI<sub>pp</sub> spécifiée dans la Rec. UIT-T G.825, qui constitue la prescription la plus importante. Le filtre passe-haut à 4 MHz simule en fait la gigue d'alignement d'un circuit de récupération de la base de temps en supposant une largeur de bande de 4 MHz. Cette gigue d'alignement rend compte également de l'écart du temps d'échantillonnage par rapport au temps d'échantillonnage statique (sans gigue) à l'intérieur du diagramme en œil de réception.

La largeur de bande d'un régénérateur utilisé tel qu'indiqué dans la Rec. UIT-T G.783 doit être définie. Il faut par ailleurs réduire la largeur de bande du régénérateur au-dessous de 8 MHz en raison de la non-uniformité de la distribution du bruit.

#### IV.3.2 Structure des blocs fonctionnels équivalents de la simulation du bruit

Chaque régénérateur présente à sa sortie un point de sommation où la gigue intrinsèque est ajoutée. Le spectre de bruit fait l'objet d'un filtrage passe-bas du bruit blanc gaussien. Une boucle à verrouillage de phase de deuxième ordre, dotée d'un crêtage de gain de 0,1 dB modélise la fonction

de transfert de gigue du régénérateur. L'entrée du régénérateur doit être munie d'une boucle à verrouillage de phase de récupération de la base de temps, dont la fréquence d'angle (c'est-à-dire largeur de bande à 3 dB) est supérieure à 4 MHz (limite d'acceptation de la gigue) qui ajoute un certain filtrage supplémentaire à la fonction de transfert de la gigue. Cette particularité n'a pas été prise en compte dans la simulation, du fait de la largeur de bande beaucoup plus importante par comparaison à celle de la boucle à verrouillage de phase dont le rôle est prédominant.

Autrement dit, pour les calculs de simulation, la modélisation de la largeur de bande du régénérateur utilise uniquement la fonction de transfert (prédominante) de la boucle à verrouillage de phase de la partie émetteur du régénérateur.

La mise en forme spectrale de la source de bruit a été définie de façon à ce que les puissances de bruit totales mesurées à la sortie des combinaisons de filtres passe-haut et passe-bas de 20 kHz/80 MHz et 4 Mhz/80 MHz soient dans un rapport de 9. Cela correspond à un facteur 3 en valeurs efficaces et équivaut à des valeurs de gigue de  $0,3 U_{Ipp}$  et  $0,1 U_{Ipp}$  respectivement. La source de bruit ne définit pas une valeur en soi. Elle fait office de valeur normalisée de référence pour le calcul de l'accumulation de gigue.

D'après les calculs de simulation, il faut une largeur de bande inférieure à 1,5 MHz pour ne pas dépasser le niveau de gigue de  $0,15 U_{Ipp}$  au-delà de 50 régénérateurs. En supposant une certaine marge de sécurité, le choix d'une valeur de 1 MHz est suggéré.

Les valeurs cumulées pour une chaîne de 50 régénérateurs, avec une largeur de bande de 1 MHz, un crêtage de gain de 0,1 dB et une production de bruit maximale admise conforme aux valeurs définies dans la Rec. UIT-T G.783, sont respectivement de:

- 0,122  $U_{Ipp}$  dans la gamme de fréquences supérieures;
- 0,815  $U_{Ipp}$  dans la gamme de fréquences de 20 kHz à 80 MHz.

La suggestion équivalente pour la largeur de bande d'un régénérateur de réseau de transport optique acheminant 16 signaux client STM-16 est de 250 kHz.

#### **IV.4 Production de gigue des régénérateurs utilisant la conversion parallèle série**

Les régénérateurs utilisant uniquement une boucle à verrouillage de phase, c'est-à-dire la boucle de récupération de la base de temps, peuvent faire l'objet de prescriptions contradictoires. Ils doivent effectuer un certain filtrage et leur largeur de bande doit être suffisamment importante pour respecter la tolérance de gigue prescrite.

La tolérance de gigue exige une largeur de bande nécessairement supérieure à la fréquence correspondant au début de la première pente 1/f. Il peut ainsi en résulter une production de gigue relativement élevée au-delà de la valeur maximale admise. En règle générale, la récupération de la base de temps n'a pas pour fonction de réduire au minimum la gigue.

La récupération de la base de temps afin d'optimiser la performance en termes de BER doit se conformer aux principales prescriptions suivantes:

- maintenir le temps d'échantillonnage pour le circuit de resynchronisation des données indépendant de la fréquence d'horloge à l'emplacement de l'ouverture optimale du diagramme en œil (par exemple au moyen d'une boucle de commande intégratrice);
- respecter la modulation de phase du signal d'entrée sans s'écarter excessivement du temps d'échantillonnage idéal (c'est-à-dire la tolérance de gigue);
- production d'une faible gigue intrinsèque en termes de valeurs crête à crête, qui ne doit pas dépasser une faible fraction de l'ouverture utilisable du diagramme en œil.

Ces derniers points ne signifient évidemment aucune prescription quant à la répartition spectrale de la gigue intrinsèque.

Contrairement à la mesure de la gigue au moyen de filtres limiteurs de bande, la gigue produite dans le circuit de récupération de la base de temps doit être prise en compte sans filtrage, puisqu'elle représente l'écart du temps d'échantillonnage idéal.

En présence de débits très élevés, l'utilisation d'un circuit de récupération de la base de temps optimisé pour la qualité de fonctionnement en termes de BER pourrait poser un problème, si l'on ne se préoccupe pas de la gigue de sortie.

Pour résoudre cette difficulté, la solution consiste à utiliser le principe de la conversion série parallèle qui a normalement pour effet de convertir le signal entrant en octets. Ce type de convertisseur série parallèle utilise généralement une structure 16 bits parallèles.

A ce stade la fréquence à laquelle le traitement des données peut s'effectuer est réduite par un coefficient 16. Cela permet d'utiliser une boucle à verrouillage de phase qui accomplit une fonction d'élimination de la gigue, avec une largeur de bande réduite. A la sortie de ce type de régénérateur, la seule gigue est celle de cette boucle à verrouillage de phase et la gigue relativement faible de la boucle PLL assurant la fonction de multiplexage et multipliant la fréquence d'horloge par 16.

Cette solution permet des valeurs plus élevées de la gigue intrinsèque basse fréquence grâce à la largeur de bande réduite de la fonction d'élimination de la gigue. Cette fonction filtre les composantes de bruit de phase dans les régénérateurs, de sorte que l'accumulation dans des chaînes (telles que définies dans le modèle théorique de référence de l'Appendice III) ne dépasse pas la limite de réseau.

Le Tableau A.2 donne un exemple de cette gigue intrinsèque maximale pour régénérateurs OTU3. Celle-ci peut atteindre 1,2 UIpp dans le domaine des basses fréquences.

Cette valeur répond évidemment à l'utilisation éventuelle d'une triple boucle à verrouillage de phase; en effet, un régénérateur à un seul étage (uniquement récupération de la base de temps) n'autorise évidemment pas une gigue de 1,2 UIpp. Tel qu'indiqué plus haut, il en résulterait des erreurs sur les bits.

## **Appendice V**

### **Données générales complémentaires concernant les prescriptions d'erreur de phase et de production de gigue large bande du démappeur (ODCp)**

#### **V.1 Introduction**

Les prescriptions de transfert de gigue concernant l'horloge du démappeur, c'est-à-dire l'horloge ODCp, figurent au § A.7.3. Le paragraphe V.2 fournit des indications complémentaires concernant l'erreur de phase du démappeur.

Les prescriptions en matière de production de gigue relatives à l'horloge ODCp figurent au § A.5.1.2. Il y est spécifié que les prescriptions en matière de production de gigue large bande de l'horloge ODCp visent à garantir que les "espacements" ou les vides imputables à l'en-tête fixe de la trame OTUk ne produiront pas une gigue de sortie excessive. La production de gigue large bande d'une horloge ODCp est limitée à 1,0 UIpp dans le cas des démappeurs STM-16, STM-64, et STM-256. Des indications complémentaires et des généralités concernant cette prescription figurent au § V.3.

#### **V.2 Erreur de phase du démappeur**

Le démappeur (ou désynchroniseur) est représenté sous la forme d'une boucle à verrouillage de phase du deuxième ordre, avec une pente de 20 dB/décade. Le modèle utilisé est identique au modèle 1 du régénérateur 3R présenté au § IV.2 et illustré à la Figure IV.2-1; seules les valeurs

numériques des paramètres sont différentes. En se référant à la Figure IV.2-1 et à l'équation (IV.2-1), la fonction de transfert du désynchroniseur s'écrit comme suit:

$$H(s) = \frac{K_a K_o s + K_a K_o b}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{V.2-1})$$

dans laquelle  $K_a$  désigne le gain du détecteur de phase,  $K_o$  le gain de l'oscillateur à tension variable, et  $b$  la constante temporelle entière, en supposant un filtre à boucle PI dont la fonction de transfert est  $1+b/s$ . La fonction de transfert d'erreur de phase, c'est-à-dire la fonction de transfert entre l'entrée de la boucle à verrouillage de phase et la différence entre l'entrée et la sortie de cette même boucle, est donnée par l'équation (IV.2-7):

$$H_e(s) \equiv 1 - H(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{V.2-2})$$

En combinant le gain du détecteur de phase et le gain de l'oscillateur à tension variable, on obtient une constante de temps proportionnelle globale  $\tau_p$ :

$$\tau_p = \frac{1}{K_a K_o} \quad (\text{V.2-3})$$

et si l'on définit la constante de temps entière  $\tau_i = 1/b$ , la fonction de transfert d'erreur de phase peut s'écrire comme suit:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_p \tau_i}} = \frac{\tau_p \tau_i s^2}{\tau_p \tau_i s^2 + \tau_i s + 1} \quad (\text{V.2-4})$$

La fonction de transfert d'erreur de phase peut aussi s'écrire sous forme canonique en fonction de la fréquence naturelle non amortie et du rapport d'amortissement:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{V.2-5})$$

avec:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{\sqrt{\tau_p \tau_i}} \\ \zeta &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_i}{\tau_p}} \end{aligned} \quad (\text{V.2-6})$$

Enfin, d'après les équations (IV.2-30) et (IV.2-31), la fonction de transfert d'erreur de phase peut s'exprimer en fonction du crêtage du gain et de la largeur de bande à 3 dB. Pour des rapports d'amortissement suffisamment importants (des rapports de l'ordre de 4 ou 5 – ce qui est le cas présent – sont certainement suffisants) l'équation (IV.2-30) peut s'écrire de façon approchée comme suit:

$$\omega_{3dB} \cong 2\zeta\omega_n \quad (\text{V.2-7})$$

avec  $\omega_{3dB}$  largeur de bande à 3 dB exprimée en radian/s. Alors:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + \omega_{3dB}s + \epsilon\omega_{3dB}^2} \quad (\text{V.2-8})$$

dans laquelle la quantité  $\varepsilon$  est la partie fractionnaire du crêtage du gain, c'est-à-dire [voir l'équation (IV.2-31)]:

$$\varepsilon \equiv H_p - 1 = \frac{1}{4\zeta^2} \quad (\text{V.2-9})$$

La quantité  $\varepsilon$  est liée de façon approchée au crêtage du gain exprimé en dB par la relation:

$$H_p(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{1}{4\zeta^2}\right) \cong 8,6859 \ln \left(1 + \frac{1}{4\zeta^2}\right) \cong 8,6859\varepsilon \quad (\text{V.2-10})$$

Considérons comme signal d'entrée de la boucle à verrouillage de phase de l'horloge ODCp, une dérive de fréquence  $D$  ( $D$  exprimée en unités de décalage fréquentiel fractionnaire par seconde c'est-à-dire en  $\text{s}^{-1}$ ). Alors le signal d'entrée, exprimé en tant qu'historique de phase  $u(t)$ , en intervalles unitaires (UI), est donné par [les notations  $u(t)$ , et  $U(s)$  pour sa transformée de Laplace sont utilisées pour le signal d'entrée au § IV.2 et à la Figure IV.2-1]:

$$u(t) = \frac{1}{2} D f_0 t^2 \quad (\text{V.2-11})$$

dans laquelle  $f_0$  est la fréquence du signal client d'entrée (c'est-à-dire la fréquence du signal client au niveau du mappeur). La transformée de Laplace du signal d'entrée est alors:

$$U(s) = \frac{D f_0}{s^3} \quad (\text{V.2-12})$$

On obtient la transformée de Laplace de l'erreur de phase en multipliant la fonction de transfert de l'erreur de phase par la transformée de Laplace de l'entrée de phase; d'où le résultat suivant:

$$E(s) \equiv H_e(s)U(s) = \frac{\tau_p \tau_i}{\tau_p \tau_i s^2 + \tau_i s + 1} \times \frac{D f_0}{s} \quad (\text{V.2-13})$$

La forme de l'équation (V.2-13) est identique à celle de la fonction de transfert pour la réponse échelon d'un oscillateur amorti; pour un rapport d'amortissement supérieur à 1 (qui est le cas présent), l'oscillateur est suramorti et il n'y a aucune suroscillation. Dans ce cas, la réponse maximale, c'est-à-dire l'erreur de phase maximale, est égale à l'erreur de phase en régime stationnaire. Celle-ci est donnée par la formule:

$$E_{ss} \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sE(s) = D f_0 \tau_p \tau_i \quad (\text{UI}) \quad (\text{V.2-14})$$

L'erreur de phase en régime stationnaire indiquée par l'équation (V.2-14) est exprimée en UI. Si l'on veut un résultat en unités de temps, il faut alors le diviser par la fréquence client  $f_0$ :

$$E_{ss} = D \tau_p \tau_i \quad (\text{s}) \quad (\text{V.2-15})$$

Cette formule peut s'écrire également en fonction de la largeur de bande à 3 dB et du rapport d'amortissement, si l'on utilise les équations (V.2-6) et (V.2-7):

$$E_{ss} = D \frac{4\zeta^2}{\omega_{3dB}^2} = \frac{D\zeta^2}{\pi^2 f_{3dB}^2} \quad (\text{s}) \quad (\text{V.2-16})$$

En introduisant  $D = 10^{-8}/\text{s}$ ,  $\zeta = 4,6465$  [ce qui correspond au crêtage de gain de 0,1 dB]; voir l'équation (IV.2-31)], et  $f_{3dB} = 300$  Hz, alors l'erreur de phase en régime stationnaire est égale à:

$$E_{ss} = \frac{(10^{-8} \text{s}^{-1})(4,6465)^2}{\pi^2 (300 \text{ Hz})^2} = 2,43 \times 10^{-13} \text{ s} = 0,243 \text{ ps} \quad (\text{V.2-17})$$

Dans l'équation (V.2-17), la largeur de bande à 3 dB et le crêtage du gain sont simplement conformes aux prescriptions du § A.7.3 (300 Hz et 0,1 dB respectivement). En fait, largeur de bande et crêtage du gain seront légèrement inférieurs. D'après l'équation (V.2-16), une diminution de la largeur de bande à 3 dB et du crêtage du gain (c'est-à-dire une augmentation du rapport d'amortissement) entraîne une augmentation de l'erreur de phase en régime stationnaire. Par exemple, si la largeur de bande à 3 dB est égale à 150 Hz et le crêtage de gain à 0,5% [c'est-à-dire environ 0,043 dB d'après l'équation (V.2-10), ce qui correspond à un rapport d'amortissement de 7,07], alors l'erreur de phase en régime stationnaire est de:

$$E_{ss} = \frac{(10^{-8} s^{-1})(7,07)^2}{\pi^2 (150\text{Hz})^2} = 2,25 \times 10^{-12} \text{s} \cong 2,3 \text{ps} \quad (\text{V.2-18})$$

### V.3 Production de gigue large bande du démappeur imputable aux espacements dus à l'en-tête fixe dans la trame OTUk

Les prescriptions de transfert de gigue et de dérapage pour horloge ODCp indiquées au § A.7.3 et ainsi qu'au Tableau A.1, garantissent le caractère acceptable de la gigue due au mappage et au démappage des signaux client à l'entrée et à la sortie d'une horloge OPUk, éventuellement à plusieurs reprises (autrement dit, la gigue sera conforme aux limites de réseau appropriées indiquées dans la Rec. UIT-T G.825 pour les clients SDH). Les prescriptions de production de gigue ODCp indiquées au § A.5.1.2 et au Tableau A.3 garantissent la conformité aux limites spécifiées de toute gigue supplémentaire produite par l'horloge ODCp. Une horloge ODCp qui ne produit aucune gigue supplémentaire et répond aux prescriptions du § A.7.3, à savoir une largeur de bande à 3 dB inférieure à 300 Hz et un crêtage de gain inférieur à 0,1 dB, sera conforme aux prescriptions du Tableau A.3. Considérons par exemple une demi-valeur crête à crête de gigue large bande d'environ 0,4 UIpp, due à une justification unique lors du démappage d'un module STM-16 d'une unité OPU1, en supposant une largeur de bande de 300 Hz, un crêtage de gain de 0,1 dB, et un filtre de mesure passe-haut de 5 kHz pour la gigue large bande; la gigue crête à crête est alors deux fois plus élevée et vaut donc environ 0,8 UIpp. Cette valeur est inférieure à la prescription du Tableau A.3 (1,0 UIpp).

La marge supplémentaire que comportent les prescriptions du Tableau A.3 autorise une certaine production de gigue ODCp, tout en maintenant à un niveau acceptable l'accumulation de gigue totale. Parmi les causes possibles de production de gigue d'une horloge ODCp figurent les espacements produits par le surdébit (en-tête) fixe dans la trame OTUk. Ce type de gigue est pris en compte dans le présent paragraphe et il est établi que l'adjonction d'un filtre adéquat à la suite du filtre proportionnel et intégral de la boucle PLL de l'horloge ODCp permet de la réduire à une valeur négligeable.

Comme au paragraphe V.2, le démappeur est représenté par une boucle à verrouillage de phase, selon le schéma de la Figure IV.2-1; toutefois, un filtre supplémentaire est maintenant introduit  $G(s)$  entre le filtre à boucle  $(1+b/s)$  et l'oscillateur à tension variable  $(K_o/s)$ . La forme de  $G(s)$  sera précisée ultérieurement. La fonction  $H(s)$  de la boucle à verrouillage de phase s'écrit comme suit:

$$H(s) = \frac{\frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right) G(s)}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right) G(s)} = \frac{(K_a K_o s + K_a K_o b) G(s)}{s^2 + (K_a K_o s + K_a K_o b) G(s)} \quad (\text{V.3-1})$$

avec  $K_a$  gain du détecteur de phase;  $K_o$  gain de l'oscillateur à tension variable; et  $b$  constante de temps entière en supposant un filtre à boucle proportionnel et intégral avec une fonction de transfert  $1+b/s$ . Si l'on définit la constante de temps proportionnelle comme dans l'équation (V.2-3), la constante de temps entière  $\tau_i = 1/b$ , la fréquence naturelle non amortie et le rapport d'amortissement tel qu'indiqué dans l'équation (V.2-6), la largeur de bande à 3 dB comme dans



l'équation (V.2-7) (exprimée en rad/s), et enfin la partie fractionnaire du crêtage du gain comme dans l'équation (V.2-9), la fonction de transfert peut alors s'écrire:

$$H(s) = \frac{(\omega_{3dB}s + \varepsilon\omega_{3dB}^2)G(s)}{s^2 + (\omega_{3dB}s + \varepsilon\omega_{3dB}^2)G(s)} \quad (V.3-2)$$

En posant  $s = j\omega$  dans l'équation (V.3-2) afin d'obtenir la réponse en fréquence et en divisant le numérateur et le dénominateur par  $\omega_{3dB}^2$  et si l'on définit la quantité sans dimension  $x = \omega/\omega_{3dB} = f/f_{3dB}$  (avec  $\omega = 2\pi f$  et  $\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB}$ ), on obtient l'expression:

$$H(j\omega) = \frac{(jx + \varepsilon)G(j\omega)}{-x^2 + (jx + \varepsilon)G(j\omega)} \quad (V.3-3)$$

Chaque rangée d'une trame OTUk, ODUk, et OPUk comporte 3808 octets de charge utile OPUk et de 272 octets d'en-tête OPUk, ODUk et OTUk (voir la Rec. UIT-T G.709). Les 272 octets de l'en-tête sont à l'origine d'un espacement de  $(8)(272) \text{ UI} = 2176 \text{ UI}$ . Cet espacement se répète selon une période égale au quart de la période de trame OTUk (la trame OTUk comprend 4 rangées). Il en résulte une onde de phase en dents de scie, de 2176 UI d'amplitude et d'une période égale à la période de trame OTUk divisée par 4. Le cas le plus défavorable – celui de la trame OTU1 (autrement dit interface STM-16 mappée dans ODU1), puisqu'il correspond à la période de trame la plus importante – fait l'objet de la suite du présent paragraphe. La période résultante de la courbe en dents de scie est de  $48,971 \mu\text{s} / 4 = 12,243 \mu\text{s}$  (soit une fréquence de 81,68 kHz).

On peut déterminer une valeur approchée de l'amplitude de la réponse en fréquence en observant que la décomposition en série de Fourier de la courbe en dents de scie comprend une fondamentale de 81,68 kHz et des harmoniques. Puisque  $f_{3dB} = 300 \text{ Hz}$ , la quantité  $x$  est de l'ordre de  $81\,680/300 = 272$  au moins. La quantité  $\varepsilon$ , qui représente la partie fractionnaire du crêtage du gain, est de l'ordre de  $0,1 \text{ dB}/8,6859 = 0,012$  [voir l'équation (V.2-10)]. On a alors  $x \gg \varepsilon$ . De plus, le filtre  $G(s)$  est un filtre passe-bas. L'amplitude relative du signal de sortie n'est jamais très supérieure à 1 (en supposant un faible crêtage du gain) et nettement inférieure à 1 pour les fréquences supérieures à sa bande passante. Enfin, on observe que  $x^2 = (272)^2 = 73\,980 \gg x$ . L'équation (V.3-3) donne donc une valeur approchée de l'amplitude de la réponse en fréquence:

$$|H(j\omega)| \cong \frac{|G(j\omega)|}{x} \quad (V.3-4)$$

Considérons en premier lieu le cas où le filtre  $G(s)$  n'est pas présent, c'est-à-dire  $G(s) = 1$ . Alors la boucle à verrouillage de phase réduit l'amplitude de chaque composante de fréquence de la courbe en dents de scie selon un facteur  $x$ . On peut déterminer une estimation en ordre de grandeur de la gigue, en supposant que toute l'énergie de la courbe en dents de scie est concentrée dans le premier harmonique, l'amplitude étant de 2176 UIpp. La gigue résultante est alors de  $2176 \text{ UIpp} / 272 = 8 \text{ UIpp}$ . Un calcul de simulation dans le domaine temporel, avec un signal d'entrée en dents de scie, a permis d'obtenir une valeur plus exacte de 6,3 UI. De toute façon, la gigue est nettement supérieure à la limite de 1,0 UIpp indiquée au Tableau A.3.

Pour ramener la gigue à un niveau acceptable, on peut choisir un filtre  $G(s)$  du troisième ordre, de type passe-bas et comportant une largeur de bande d'environ 0,1 fois la fréquence de la courbe en dents de scie, soit:

$$G(s) = \left( \frac{a}{s+a} \right)^3 \quad (V.3-5)$$

avec  $a = 2\pi f_a = 2\pi$  (8200 Hz). Là encore, si l'on calcule la gigue de façon approchée en supposant que toute l'énergie de l'onde de phase est contenue dans le premier harmonique (81,68 kHz), l'amplitude la réponse en fréquence vaut sensiblement:

$$|G(j\omega)| = \left( \frac{f_a}{\sqrt{f^2 + f_a^2}} \right)^3 \approx (0,1)^3 = 0,001 \quad (\text{V.3-6})$$

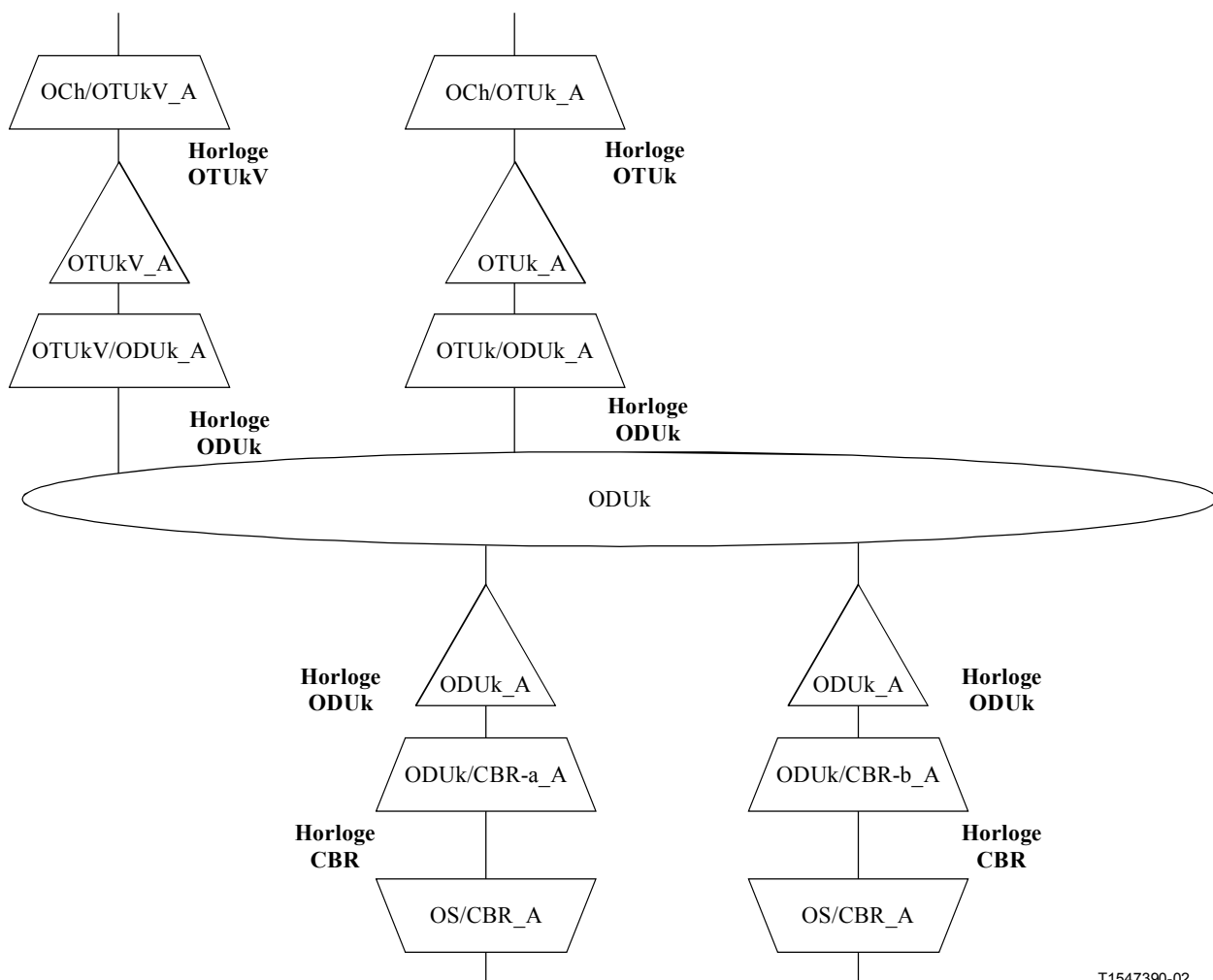
L'ordre de grandeur de l'estimation de la gigue se limite à  $8 \times 10^{-3}$  UIpp = 8 mUIpp. Un calcul de simulation sur le domaine temporel, avec un signal d'entrée en dents de scie, a permis d'obtenir une valeur plus exacte égale à  $6,3 \times 10^{-3} = 6,3$  mUIpp. De toute façon, la gigue est alors nettement inférieure à la limite de 1,0 UIpp indiquée au Tableau A.3.

## Appendice VI

### Fonctions atomiques de réseau OTN

#### VI.1 Introduction

La Figure VI.1 récapitule les différentes fonctions atomiques utilisées pour la synchronisation des réseaux OTN. Le Tableau A.1 indique les relations entre les horloges ODCa, ODCb, ODCr et ODCp et ces fonctions atomiques.



T1547390-02

**Figure VI.1/G.8251 – Fonctions atomiques utilisées pour la synchronisation des réseaux OTN**

**OCh/OTUk\_A\_Sk:** récupération de la base de temps pour l'horloge OTUk.

**OTUk/ODUk\_A\_Sk:** produit un signal d'horloge ODUk provenant d'une horloge OTUk (rapport 255:239). En cas de défaillance OTUk, notamment de défaillance de signal, il y a production d'un signal d'indication d'alarme AIS généré par une horloge AIS. L'horloge ODUk doit observer les limites prescrites, même en cas de perte de signal.

**OTUk/ODUk\_A\_So:** produit un signal d'horloge OTUk provenant d'une horloge ODUk (rapport 239:255). Puisque le signal ODUk est toujours disponible, aucune horloge AIS n'est nécessaire. L'horloge OTUk n'est pas affectée par une commutation entre plusieurs signaux ODUk dont les phases et les fréquences d'horloge sont différentes.

**OCh/OTUkV\_A\_Sk:** récupération de la base de temps pour l'horloge OTUkV.

**OTUkV/ODUk\_A\_Sk:** produit un signal d'horloge ODUk, soit avec un rapport fixe (mappage synchrone) soit d'après l'horloge et le bourrage OTUkV (mappage asynchrone).

**OTUkV/ODUk\_A\_So:** produit un signal d'horloge ODUkV, soit à partir de l'horloge ODUk avec un rapport fixe (mappage synchrone), soit en fonctionnement libre (mappage asynchrone) avec bourrage du signal d'horloge ODUk dans l'horloge OTUk.

**ODUk/CBR-a\_A\_So:** produit un signal d'horloge ODUk en fonctionnement libre. Bourrage à débit constant dans l'horloge ODUk.

**ODUk/CBR-b\_A\_So**: produit un signal d'horloge ODUk à partir d'une horloge à débit constant (rapport fixe). Production d'un signal d'horloge AIS pendant une défaillance de signal d'entrée (notamment perte d'un signal)

**ODUk/CBR\_A\_Sk**: produit un signal d'horloge à débit constant à partir d'une horloge ODUk et d'une décision de bourrage. Horloge de signal AIS suite à défaillance de signal entrant.

**OS/CBR\_A\_Sk**: récupération de la base de temps pour un signal à débit constant.



## SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
<b>Série G</b>	<b>Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques</b>
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication