

Union internationale des télécommunications

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

Y.1540

(12/2019)

SÉRIE Y: INFRASTRUCTURE MONDIALE DE
L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET, RÉSEAUX
DE PROCHAINE GÉNÉRATION, INTERNET DES
OBJETS ET VILLES INTELLIGENTES

Aspects relatifs au protocole Internet – Qualité de service
et performances de réseau

**Service de communication de données par
protocole Internet – Paramètres de performance
pour le transfert de paquets IP et la disponibilité
de ce service**

Recommandation UIT-T Y.1540

UIT-T



RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE Y
**INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET, RÉSEAUX DE
 PROCHAINE GÉNÉRATION, INTERNET DES OBJETS ET VILLES INTELLIGENTES**

INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION	
Généralités	Y.100–Y.199
Services, applications et intergiciels	Y.200–Y.299
Aspects réseau	Y.300–Y.399
Interfaces et protocoles	Y.400–Y.499
Numérotage, adressage et dénomination	Y.500–Y.599
Gestion, exploitation et maintenance	Y.600–Y.699
Sécurité	Y.700–Y.799
Performances	Y.800–Y.899
ASPECTS RELATIFS AU PROTOCOLE INTERNET	
Généralités	Y.1000–Y.1099
Services et applications	Y.1100–Y.1199
Architecture, accès, capacités de réseau et gestion des ressources	Y.1200–Y.1299
Transport	Y.1300–Y.1399
Interfonctionnement	Y.1400–Y.1499
Qualité de service et performances de réseau	Y.1500–Y.1599
Signalisation	Y.1600–Y.1699
Gestion, exploitation et maintenance	Y.1700–Y.1799
Taxation	Y.1800–Y.1899
Télévision IP sur réseaux de prochaine génération	Y.1900–Y.1999
RÉSEAUX DE PROCHAINE GÉNÉRATION	
Cadre général et modèles architecturaux fonctionnels	Y.2000–Y.2099
Qualité de service et performances	Y.2100–Y.2199
Aspects relatifs aux services: capacités et architecture des services	Y.2200–Y.2249
Aspects relatifs aux services: interopérabilité des services et réseaux dans les réseaux de prochaine génération	Y.2250–Y.2299
Améliorations concernant les réseaux de prochaine génération	Y.2300–Y.2399
Gestion de réseau	Y.2400–Y.2499
Architectures et protocoles de commande de réseau	Y.2500–Y.2599
Réseaux de transmission par paquets	Y.2600–Y.2699
Sécurité	Y.2700–Y.2799
Mobilité généralisée	Y.2800–Y.2899
Environnement ouvert de qualité opérateur	Y.2900–Y.2999
RÉSEAUX FUTURS	Y.3000–Y.3499
INFORMATIQUE EN NUAGE	Y.3500–Y.3599
INTERNET DES OBJETS ET VILLES ET COMMUNAUTÉS INTELLIGENTES	
Considérations générales	Y.4000–Y.4049
Termes et définitions	Y.4050–Y.4099
Exigences et cas d'utilisation	Y.4100–Y.4249
Infrastructure, connectivité et réseaux	Y.4250–Y.4399
Cadres, architectures et protocoles	Y.4400–Y.4549
Services, applications, calcul et traitement des données	Y.4550–Y.4699
Gestion, commande et qualité de fonctionnement	Y.4700–Y.4799
Identification et sécurité	Y.4800–Y.4899
Évaluation et analyse	Y.4900–Y.4999

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

Recommandation UIT-T Y.1540

Service de communication de données par protocole Internet – Paramètres de performance pour le transfert de paquets IP et la disponibilité de ce service

Résumé

La Recommandation UIT-T Y.1540 définit les paramètres qui peuvent servir à spécifier et à évaluer les performances en termes de rapidité, de précision, de sûreté de fonctionnement et de disponibilité du transfert de paquets IP dans les services régionaux et internationaux de communication de données par le protocole IP (*Internet Protocol*). Les paramètres définis s'appliquent à un service IP point à point de bout en bout et aux parties du réseau qui fournissent – ou contribuent à fournir – un service de ce type conformément aux références normatives spécifiées au paragraphe 2. Le transport en mode sans connexion est un aspect distinctif du service IP faisant l'objet de la présente Recommandation.

Plus de vingt ans après l'entrée en vigueur de la Recommandation, sa version de 2019 tient compte des nombreuses mutations intervenues dans la conception des services IP et les protocoles employés par les utilisateurs finaux. Cette version contient la nouvelle Annexe A, qui définit des paramètres de capacité de la couche IP permettant de procéder à une évaluation et établit les exigences applicables aux méthodes de mesure de la capacité de la couche IP. Cette nouvelle annexe est le résultat d'années d'étude et d'application des principes établis par la Commission d'études 12 de l'UIT-T pour évaluer avec précision les paramètres de performance et les méthodes de mesure par rapport à une "référence de base" concernant les mesures en laboratoire et sur le terrain. Les paramètres de débit associés aux flux et les méthodes de mesure (transport avec fourniture fiable) appellent un complément d'étude, et le texte établit une distinction claire entre ces paramètres de capacité de la couche IP. De même, les paramètres décrivant la qualité de fonctionnement d'un protocole de couche transport (TCP) fiable particulier appellent un complément d'étude; au demeurant, il est admis que les protocoles Internet de transport fiables sont en constante évolution et font actuellement l'objet de travaux de recherche.

L'Annexe B présente un second algorithme de recherche plus efficace au regard de la méthode de mesure de la capacité de la couche IP définie dans l'Annexe A.

Historique

Edition	Recommandation	Approbation	Commission d'études	ID unique*
1.0	ITU-T I.380	1999-02-26	13	11.1002/1000/4573
1.0	ITU-T Y.1540	1999-02-26	13	11.1002/1000/5302
2.0	ITU-T Y.1540	2002-12-14	13	11.1002/1000/6189
2.1	ITU-T Y.1540 (2002) Amd. 1	2003-08-01	13	11.1002/1000/6975
3.0	ITU-T Y.1540	2007-11-13	12	11.1002/1000/9270
3.1	ITU-T Y.1540 (2007) Amd.1	2009-03-19	12	11.1002/1000/9727
4.0	ITU-T Y.1540	2011-03-01	12	11.1002/1000/11079
4.1	ITU-T Y.1540 (2011) Amd.1	2016-01-21	12	11.1002/1000/12761
5.0	ITU-T Y.1540	2016-07-29	12	11.1002/1000/12975
6.0	ITU-T Y.1540	2019-12-05	12	11.1002/1000/13933
6.1	ITU-T Y.1540 (2019) Amd. 1	2020-02-06	12	11.1002/1000/14161

* Pour accéder à la Recommandation, reporter cet URL <http://handle.itu.int/> dans votre navigateur Web, suivi de l'identifiant unique, par exemple <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

AVANT-PROPOS

L'Union internationale des télécommunications (UIT) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication (ICT). Le Secteur de la normalisation des télécommunications (UIT-T) 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.

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et on considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

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 ou par des droits d'auteur afférents à des logiciels, et dont l'acquisition pourrait être requise 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 les bases de données appropriées de l'UIT-T disponibles sur le site web de l'UIT-T à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© UIT 2022

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.....	4
3	Abréviations et acronymes	4
4	Modèle stratifié de qualité du service IP	6
5	Modèle générique de qualité du service IP.....	7
	5.1 Éléments de réseau	8
	5.2 Liaisons de commutateur et sections de réseau.....	9
	5.3 Points de mesure et sections mesurables	10
	5.4 Événements de référence de transfert de paquets (IPRE)	11
	5.5 Résultats de transfert de paquets IP.....	12
6	Paramètres de qualité du transfert de paquets IP	19
	6.1 Définitions de paquets	19
	6.2 Délai de transfert de paquets IP (IPTD)	20
	6.3 Taux d'erreur sur les paquets IP (IPER)	23
	6.4 Taux de perte de paquets IP (IPLR)	23
	6.5 Débit de paquets IP erratiques	23
	6.6 Taux de reclassement des paquets IP (IPRR).....	24
	6.7 Taux dans un bloc à perte grave de paquets IP (IPSLBR)	24
	6.8 Taux de duplication des paquets IP (IPDR)	24
	6.9 Taux de paquets IP répétés (RIPR)	25
	6.10 Paramètres de réparation de flux	25
	6.11 Paramètres de capacité	25
	6.12 Paramètres concernant les flux.....	28
7	Disponibilité du service IP	29
	7.1 Fonction de disponibilité du service IP	29
	7.2 Paramètres de disponibilité du service IP.....	30
Annexe A – Paramètres et méthodes de mesure de la capacité IP et des flux fondés sur le protocole IP.....		32
	A.1 Contexte.....	32
	A.2 Paramètres et méthodes de mesure de la capacité d'accès de la couche IP (accès à l'Internet des consommateurs)	33
	A.3 Paramètres et méthodes de mesure du débit utile associé aux flux (transport avec fourniture fiable).....	37
	A.4 Plan de validation et de comparaison des méthodes de mesure des accès	37
Annexe B – Algorithme de recherche supplémentaire pour les paramètres et les méthodes de mesure de la capacité IP.....		42
	B.1 Algorithme de recherche	42
Appendice I – Considérations relatives au routage des paquets IP.....		47

Appendice II – Terminologie secondaire concernant la variation du délai de transfert de paquets IP	48
II.1 Introduction	48
II.2 Définition de la variation du délai de transfert entre les paquets	48
II.3 Définition de la variation du délai de transfert de paquets en un point.....	49
II.4 Indications sur l'application des différents paramètres.....	49
Appendice III – Paramètres liés à la capacité de débit et de débit utile.....	51
Appendice IV – Essais de l'état de disponibilité du service IP et d'estimation par échantillonnage des paramètres de disponibilité du service IP	52
IV.1 Essai minimal de l'état de disponibilité du service IP (pour les méthodes d'essai et les ensembles d'essais)	52
IV.2 Essai de l'état de disponibilité du service IP (au moyen du test progressif du rapport des probabilités)	52
IV.3 Autre essai de signification statistique pour déterminer la disponibilité du service IP	54
IV.4 Estimation par échantillonnage de la disponibilité du service IP.....	55
Appendice V – Données relatives aux méthodes de mesure de la performance du service IP	56
Appendice VI – Fondements de la disponibilité du service IP	57
VI.1 Introduction	57
VI.2 Fondements.....	57
VI.3 Définitions des plages dans la Figure VI.1.....	58
VI.4 Résumé	58
Appendice VII – Paramètres de qualité de fonctionnement en mode paquet pour l'évaluation et l'optimisation des techniques de réparation de flux	59
VII.1 Introduction	59
VII.2 Brève description des techniques de réparation des flux de la couche application	60
VII.3 Modèle simple de techniques permettant de réparer des flux de la couche application	61
VII.4 Exemple de paramètres de qualité de fonctionnement permettant de décrire des variables de réparation de flux	61
VII.5 Analyse des mesures et des emplois des paramètres.....	62
VII.6 Éléments supplémentaires	63
Appendice VIII – Cadre applicable à la capacité de couche IP	64
VIII.1 Introduction	64
VIII.2 Terminologie et rapport avec le document IETF RFC 5136.....	64
VIII.3 Éléments devant faire l'objet d'un complément d'étude.....	65
Appendice IX – Explication de l'inadéquation des mesures utilisant le protocole TCP pour respecter les exigences normatives.....	66
IX.1 Introduction	66

	Page
IX.2 Comparaison avec des exigences normatives.....	66
Appendice X – Résumé des résultats obtenus en laboratoire (phase 1) et sur le terrain (phase 2): plan d'évaluation de l'Annexe A	68
X.1 Introduction	68
X.2 Montage des essais en laboratoire de la phase 1	69
X.3 Montage détaillé des essais	69
X.4 Outils d'essai.....	70
X.5 Étalonnage des résultats communiqués pour les essais sous iPerf 2.....	71
X.6 Résumé de la méthode d'essai et des résultats.....	71
X.7 Résumé des essais visant à comparer la capacité mesurée aux débits étalonnés de la couche physique.....	72
X.8 Résumé des essais visant à comparer la capacité mesurée au délai sur le trajet aller-retour.....	73
X.9 Résumé des essais sur un trafic concurrent	73
X.10 Essai avec une mise en œuvre pilote d'un nouvel outil de test en UDP	76
X.11 Essais sur les effets de la perte de paquets de bas niveau	77
X.12 Examen des limites de transmission maximales des outils et de la plate- forme d'essai	78
X.13 Examen des essais avec dégradation précoce sur des flux UDP.....	79
X.14 Examen des paramètres du conformateur TBF employés dans les essais et comparaison avec un filtre de régulateur.....	79
X.15 Résumé des essais en laboratoire de la phase 1.....	79
X.16 Spécifications de la plate-forme	80
X.17 Résumé des essais sur le terrain de la phase 2.....	80
Appendice XI – Brève étude de l'accès à l'Internet fondée sur la recherche en matière de qualité de service et de qualité d'expérience.....	81
XI.1 Introduction	81
XI.2 Principales conclusions	81
XI.3 Analyse des recherches en matière de mesure de la qualité de service et de la qualité d'expérience.....	83
XI.4 Tendances générales en matière de qualité de fonctionnement des accès à l'Internet.....	88
Appendice XII – Mesures précises de débit binaire	90
XII.1 Introduction	90
XII.2 Principales conclusions	90
XII.3 Estimation de l'erreur de mesure de largeur de bande due à la taille de l'en-tête	91
XII.4 Exemple de calcul de données de service pour une interface filaire de réseau Ethernet IEEE 802.3.....	93
XII.5 Description de la fonction de filtre de compteur à jetons.....	94
Appendice XIII – Paramètres et méthodes de mesures liés aux flux fondés sur le protocole IP.....	95

	Page
XIII.1 Contexte.....	95
XIII.2 Raisons pour lesquelles le modèle MBM répond aux exigences de la présente Recommandation.....	95
XIII.3 Rôle et statut de la méthode de mesure MBM	96
XIII.4 Choix du flux d'essai	96
XIII.5 Points de mesure.....	97
XIII.6 Spécification des paramètres du modèle cible.....	98
XIII.7 Définition des critères d'acceptation et interprétation des résultats.....	98
XIII.8 Méthodes d'essai.....	98
XIII.9 Exemple(s).....	98
Bibliographie.....	99

Recommandation UIT-T Y.1540

Service de communication de données par protocole Internet – Paramètres de performance pour le transfert de paquets IP et la disponibilité de ce service

1 Domaine d'application

La présente Recommandation définit les paramètres qui peuvent servir à spécifier et à évaluer les performances en termes de rapidité, de précision, de sûreté de fonctionnement et de disponibilité du transfert de paquets IP dans les services régionaux et internationaux de communication de données par le protocole IP (*Internet Protocol*). Les paramètres définis s'appliquent à un service IP point à point de bout en bout et aux parties du réseau qui fournissent – ou contribuent à fournir – un service de ce type conformément aux références normatives spécifiées au paragraphe 2. Le transport en mode sans connexion est un aspect distinctif du service IP faisant l'objet de la présente Recommandation.

Aux fins de la présente Recommandation, le service IP de bout en bout s'entend du transfert de datagrammes IP produits par l'utilisateur (appelés dans la présente Recommandation paquets IP) entre deux serveurs terminaux spécifiés par leur adresse IP complète. Cette définition échappe donc aux limites que sous-entend l'expression "de bout en bout" employée dans d'autres Recommandations. Ainsi, aux termes de la Recommandation [UIT-T P.10], la qualité de bout en bout s'entend de la qualité de fonctionnement d'un système de communication, avec tous ses équipements terminaux. Dans le cas de services vocaux, la qualité de bout en bout équivaut à la qualité sur le trajet de la bouche à l'oreille.

NOTE 1 – La présente Recommandation définit les paramètres qui peuvent être utilisés pour décrire un service IP fourni au moyen de la version 4 du protocole Internet (IPv4) et de la version 6 du protocole Internet (IPv6); l'applicabilité ou l'extension de la présente Recommandation à d'autres protocoles (par exemple le protocole de réservation de ressources (RSVP)) doit faire l'objet d'un complément d'étude.

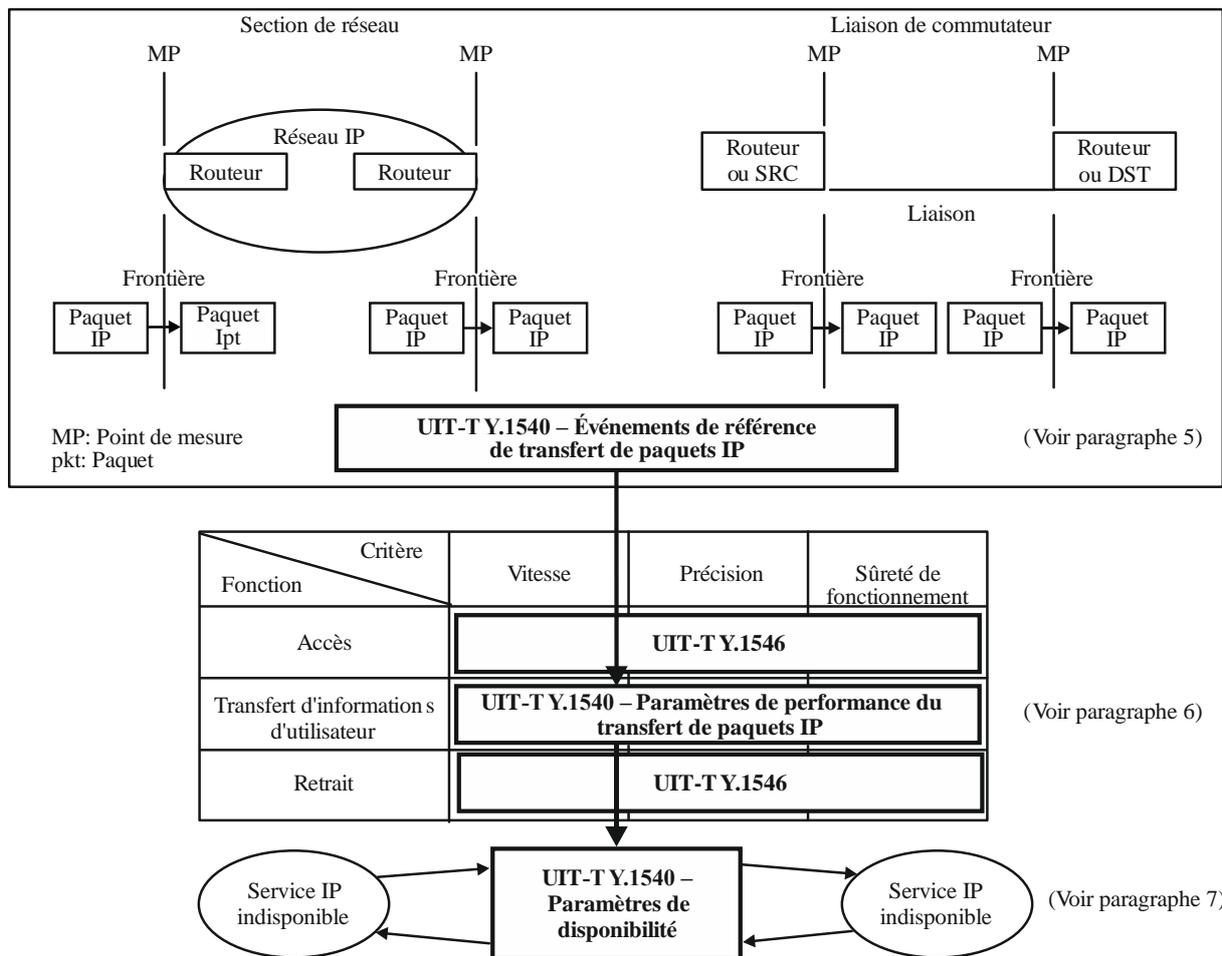
NOTE 2 – Les Recommandations relatives à la qualité d'un service IP point à multipoint sont en cours d'élaboration.

Les paramètres de performance et les méthodes de mesure (lorsque celles-ci sont définies) indiqués dans la Recommandation [UIT-T Y.1540] sont destinés à servir à la planification et à l'offre de services IP aussi bien régionaux qu'internationaux. Les utilisateurs prévus de la présente Recommandation sont en particulier les fournisseurs de services IP, les constructeurs d'équipements IP, les utilisateurs finaux (abonnés aux services IP) et d'autres utilisateurs souhaitant évaluer ou observer des services IP. La présente Recommandation peut être utilisée par des fournisseurs de services pour la planification, le développement et l'évaluation de services IP répondant aux besoins de performance de l'utilisateur, par des constructeurs d'équipements en tant qu'informations de performance ayant une incidence sur la conception des équipements, et par des utilisateurs finaux pour évaluer la qualité du service IP.

Le domaine d'application de la présente Recommandation est résumé dans la Figure 1. Les paramètres de performance du service IP sont définis sur la base d'événements de référence de transfert de paquets IP (IPRE), qui peuvent être observés aux points de mesure (MP) associés à des frontières fonctionnelles et topographiques spécifiées. Aux fins de la comparabilité et de la complétude, la qualité de service IP est considérée dans le contexte de la matrice de performance 3×3 qui est définie dans la Recommandation [UIT-T I.350]. Ces fonctions de communication indépendantes du protocole sont désignées comme suit dans la matrice: accès, transfert des informations d'utilisateur et retrait. Chaque fonction est considérée par rapport à trois qualités générales de fonctionnement (ou "critères de performance"): rapidité, précision et sûreté de

fonctionnement. La description de la disponibilité du service IP repose sur un modèle associé à deux états.

NOTE 3 – Dans la présente Recommandation, la fonction de transfert des informations d'utilisateur, illustrée dans la Figure 1, se rapporte au transfert demandé de tout paquet IP, quel que soit son type ou son contenu.



Y.1540(11)_F01

Figure 1 – Domaine d'application de la présente Recommandation

Les paramètres de performance définis dans la présente Recommandation décrivent la rapidité, la précision, la sûreté de fonctionnement et la disponibilité du transfert de paquets IP fourni par le service de communication de données par protocole IP. La qualité des services IP de bout en bout régionaux et internationaux offrant des fonctions d'accès et de retrait (comme le service de nom de domaine) et celle des capacités de transport dans les couches supérieures (comme le protocole de commande de transmission) ont fait l'objet de Recommandations distinctes, notamment la Recommandation [UIT-T Y.1546], dont l'Annexe C porte sur la disponibilité de services fondés sur le protocole IP.

La présente Recommandation est structurée de la manière suivante: le paragraphe 1 spécifie son domaine d'application; le paragraphe 2 spécifie ses références normatives; le paragraphe 3 contient une liste d'abréviations; le paragraphe 4 décrit le modèle stratifié qui crée le contexte de la spécification de la qualité du service IP; le paragraphe 5 définit le modèle utilisé pour la qualité IP, y compris les sections du réseau et les points de mesure, les événements de référence et leurs résultats; le paragraphe 6 utilise ce modèle pour définir des paramètres de performance du transfert de paquets IP; et le paragraphe 7 définit ensuite les paramètres de disponibilité du service IP.

L'Annexe A définit les paramètres de capacité IP de manière à faciliter l'évaluation, et elle établit les exigences concernant les méthodes de mesure ainsi qu'un plan permettant d'évaluer les méthodes de mesure envisageables en laboratoire et dans les réseaux de production (sur le terrain) (cette partie est nouvelle dans la version de 2019). L'Appendice I contient des considérations relatives au routage des paquets IP et à leurs effets sur la qualité de transfert. L'Appendice II fournit une terminologie secondaire concernant la variation du délai de transfert des paquets IP. L'Appendice III (Paramètres liés au débit et à la capacité de débit utile) est obsolète dans la version de 2019. L'Appendice IV décrit l'estimation de la disponibilité du service IP. L'Appendice V contient des orientations sur les méthodes de mesure des paramètres définis dans la Recommandation [UIT-T Y.1540]. L'Appendice VI donne un aperçu du contexte de la disponibilité des services IP. L'Appendice VII présente le contexte des paramètres de réparation de flux et l'Appendice VIII fournit des informations supplémentaires sur les paramètres de capacité (notamment une cartographie des anciens éléments de mesure de l'IETF et une liste de sujets nécessitant un complément d'étude). L'Appendice IX expose les raisons pour lesquelles les mesures utilisant le protocole TCP ne permettent pas de respecter les exigences normatives définies au paragraphe 6.12.

La version de 2019 contient beaucoup de nouveaux appendices. Le nouvel Appendice X fournit des documents très riches en informations sur le contexte des paramètres et des méthodes de mesure de la capacité IP, et notamment un résumé des résultats d'essais menés en laboratoire et sur le terrain pour comparer différentes méthodes de mesure. L'Appendice XI présente une étude de divers articles universitaires décrivant des séries de mesures qui permettent d'établir des comparaisons analogues. L'Appendice XII indique en détail les calculs nécessaires pour effectuer des mesures et des comparaisons précises de débit binaire dans différentes couches de la pile de protocoles. L'Appendice XIII fournit des informations sur les paramètres et les méthodes de mesures liés aux flux fondés sur le protocole IP, qui doivent faire l'objet d'un complément d'étude; il présente leur rôle complémentaire vis-à-vis des éléments de mesure et des méthodes de mesure de la capacité IP.

NOTE 4 – Les paramètres UIT-T Y.1540 pourront être augmentés ou modifiés sur la base d'une étude complémentaire des exigences à prendre en charge pour les applications IP (comme l'interactivité, les blocs, les flux).

NOTE 5 – Les paramètres UIT-T Y.1540 de rapidité, précision et sûreté de fonctionnement visent à décrire le service IP dans l'état de disponibilité.

NOTE 6 – Les paramètres définis dans la présente Recommandation peuvent s'appliquer à un unique service IP de bout en bout entre deux serveurs terminaux désignés par leur adresse IP. Ces paramètres peuvent également être appliqués aux paquets IP issus d'un service IP de bout en bout déterminé et offerts à un réseau donné ou à une liaison de commutateur (EL) donnée.

NOTE 7 – Les paramètres UIT-T Y.1540 visent à décrire la qualité du service fourni par des éléments de réseau entre des frontières de section spécifiées. Les utilisateurs de la présente Recommandation doivent toutefois tenir compte du fait que des éléments de réseau extérieurs aux frontières spécifiées peuvent parfois influencer la performance de ces éléments, mesurée entre ces frontières. Des exemples en sont donnés dans l'Appendice V.

NOTE 8 – Les paramètres définis dans la présente Recommandation peuvent également être appliqués à tout sous-ensemble des paquets IP offerts à un ensemble donné d'équipement de réseau. Les méthodes permettant de calculer la performance globale d'un ensemble d'équipements de réseau ou d'un réseau entier sont hors du domaine d'application de la présente Recommandation.

NOTE 9 – La présente Recommandation ne fournit pas les outils permettant de décrire explicitement la stabilité du routage. Les effets de l'instabilité de routage peuvent cependant être quantifiés au moyen des paramètres de perte, de délai et de bloc à perte grave définis dans la présente Recommandation.

NOTE 10 – La spécification d'objectifs numériques de performance pour une partie des paramètres de performance UIT-T Y.1540 figure dans la Recommandation [UIT-T Y.1541].

NOTE 11 – Le mot "provisoire", tel qu'il est utilisé dans la présente Recommandation, signifie qu'il existe un accord sur la stabilité de la valeur référencée, mais que la valeur peut être modifiée après un complément d'étude ou en fonction de l'exploitation réelle du réseau.

2 Références

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. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

- [UIT-T I.350] Recommandation UIT-T I.350 (1993), *Aspects généraux relatifs à la qualité de service et à la performance des réseaux numériques, y compris les RNIS.*
- [UIT-T P.10] Recommandation UIT-T P.10/G.100 (2017), *Vocabulaire relatif à la qualité de fonctionnement, à la qualité de service et à la qualité d'expérience.*
- [UIT-T Y.1541] Recommandation UIT-T Y.1541 (2011), *Objectifs de qualité de fonctionnement pour les services en mode IP.*
- [UIT-T Y.1546] Recommandation UIT-T Y.1546 (2014), *Performance de transfert entre plusieurs réseaux d'accès.*
- [UIT-T Y.1565] Recommandation UIT-T Y.1565 (2011), *Paramètres de qualité de fonctionnement des réseaux domestiques.*
- [IETF RFC 791] IETF RFC 791 (1981), *Internet Protocol.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>>
- [IETF RFC 4737] IETF RFC 4737 (2006), *Packet Reordering Metrics.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc4737.txt>>
- [IETF RFC 5136] IETF RFC 5136 (2008), *Defining Network Capacity.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc5136.txt>>
- [IETF RFC 5481] IETF RFC 5481 (2009), *Packet Delay Variation Applicability Statement.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc5481.txt>>
- [IETF RFC 8200] IETF RFC 8200 (2017), *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc8200.txt>>
- [IETF RFC 8337] IETF RFC 8337 (2018), *Model-Based Metrics for Bulk Transport Capacity.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc8337.txt>>

3 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations et acronymes suivants:

- ARQ demande de répétition automatique (*automatic repeat-request*)
- ATM mode de transfert asynchrone (*asynchronous transfer mode*)
- BTC capacité de transfert en masse (*bulk transfer capacity*)
- DSCP point de code des services différenciés (*differentiated services code-point*)
- DST serveur de destination (*destination host*)
- EL liaison de commutateur (*exchange link*)
- ER routeur de bord (*edge router*)

FEC	correction d'erreur directe (<i>forward error correction</i>)
FTP	protocole de transfert de fichiers (<i>file transfer protocol</i>)
HTTP	protocole de transfert hypertexte (<i>hypertext transfer protocol</i>)
IP	protocole Internet (<i>Internet protocol</i>)
IPDR	taux de duplication des paquets IP (<i>Internet protocol packet duplicate ratio</i>)
IPDV	variation du délai de transfert de paquets IP (<i>Internet protocol packet delay variation</i>)
IPER	taux d'erreur sur les paquets IP (<i>Internet protocol packet error ratio</i>)
IPIBR	taux de blocs dégradés sur les paquets IP (<i>Internet protocol packet impaired block ratio</i>)
IPIIR	taux d'intervalles dégradés sur les paquets IP (<i>Internet protocol packet impaired interval ratio</i>)
IPLR	taux de perte de paquets IP (<i>Internet protocol packet loss ratio</i>)
IPOR	débit utile de paquets IP en octets (<i>octet-based IP packet rate</i>)
IPPM	mesures de performance en mode IP (<i>IP performance metrics</i>)
IPPR	débit de paquets IP (<i>Internet protocol packet rate</i>)
IPRE	événement de référence de transfert de paquets IP (<i>Internet protocol packet transfer reference event</i>)
IPRR	taux de reclassement des paquets IP (<i>Internet protocol packet reordering ratio</i>)
IPSLB	résultat pour un bloc à perte grave de paquets IP (<i>Internet protocol packet severe loss block outcome</i>)
IPSLBR	taux dans un bloc à perte grave de paquets IP (<i>Internet protocol packet severe loss block ratio</i>)
IPTD	délai de transfert de paquets IP (<i>Internet protocol packet transfer delay</i>)
IPv4	protocole Internet version 4 (<i>Internet protocol version 4</i>)
IPv6	protocole Internet version 6 (<i>Internet protocol version 6</i>)
ISP	fournisseur de services Internet (<i>Internet service provider</i>)
LL	couches inférieures (protocoles et techniques prenant en charge la couche IP) (<i>lower layers (protocols and technology supporting the Internet protocol layer)</i>)
M _{av}	nombre minimal de paquets recommandé pour évaluer l'état de disponibilité (<i>the minimum number of packets recommended for assessing the availability state</i>)
MBM	mesures fondées sur un modèle (<i>model-based metrics</i>)
MP	point de mesure (<i>measurement point</i>)
MTBISO	temps moyen entre interruptions du service IP (<i>mean time between IP service outages</i>)
MTTISR	temps moyen jusqu'à restauration du service IP (<i>mean time to Internet protocol service restoral</i>)
N	nombre de paquets dans un échantillon de débit de taille N (<i>number of packets in a throughput probe of size N</i>)
NS	section de réseau (<i>network section</i>)

NSE	ensemble de sections de réseau (<i>network section ensemble</i>)
NSP	fournisseur de services de réseau (<i>network service provider</i>)
PDH	hiérarchie numérique plésiochrone (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PDV	variation du délai de transfert des paquets (<i>packet delay variation</i>)
PIA	pourcentage de disponibilité du service IP (<i>percent Internet protocol service availability</i>)
PIU	pourcentage d'indisponibilité du service IP (<i>percent Internet protocol service unavailability</i>)
QoS	qualité de service (<i>quality of Service</i>)
R	routeur (<i>router</i>)
RIPR	taux de paquets IP répétés (<i>replicated Internet protocol packet ratio</i>)
RSVP	protocole de réservation de ressource (<i>resource reservation protocol</i>)
RTCP	protocole de commande en temps réel (<i>real-time control protocol</i>)
RTO	temporisation avant retransmission (<i>retransmission time-out</i>)
RTP	protocole de transport en temps réel (<i>real-time transport protocol</i>)
RTT	temps de transmission aller-retour (<i>round-trip time</i>)
SDH	hiérarchie numérique synchrone (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SPRT	test progressif du rapport des probabilités (<i>sequential probability ratio test</i>)
SRC	serveur d'origine (<i>source host</i>)
STD	norme (<i>standard</i>)
T _{av}	durée minimale de disponibilité ou d'indisponibilité IP (<i>minimum length of time of Internet protocol availability; minimum length of time of Internet protocol unavailability</i>)
TBF	filtre de compteur à jetons (<i>token bucket filter</i>)
TCP	protocole de commande de transmission (<i>transmission control protocol</i>)
T _{max}	délai maximal de paquet IP au-delà duquel le paquet est déclaré perdu (<i>maximum Internet protocol packed delay beyond which the packed is declared to be lost</i>)
ToS	type de service (<i>type of service</i>)
T _s	temps définissant le bloc en cas de perte grave (<i>length of time defining the block in the severe loss block outcome</i>)
TTL	durée de vie (<i>time to live</i>)
UDP	protocole datagramme d'utilisateur (<i>user datagram protocol</i>)

4 Modèle stratifié de qualité du service IP

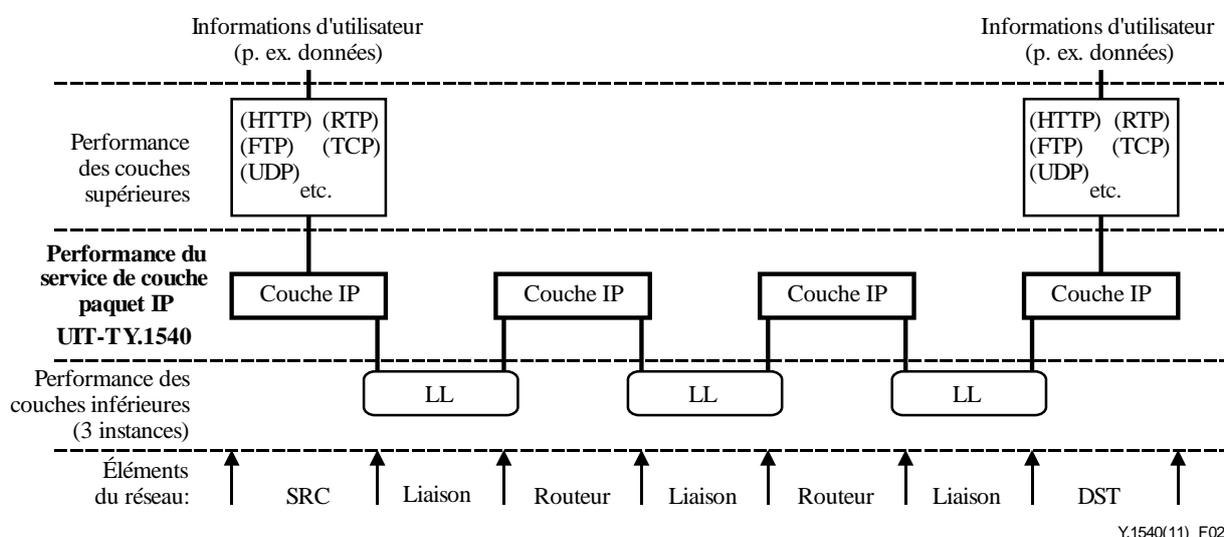
La Figure 2 illustre la nature stratifiée de la qualité d'un service IP. La qualité offerte aux utilisateurs du service IP dépend de la performance d'autres couches:

- celle des couches inférieures (LL) fournissant (via des "liaisons") un transport en mode connexion ou sans connexion prenant en charge la couche IP. Les liaisons se terminent aux points où les paquets IP sont réexpédiés (c'est-à-dire aux points désignés par "routeur", "SRC" et "DST"). Elles n'ont donc pas de portée de bout en bout.

- Les liaisons peuvent mettre en œuvre plusieurs sortes de techniques comme le mode de transfert asynchrone (ATM), le relais de trames, la hiérarchie numérique synchrone (SDH), la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH), le RNIS et les lignes louées. Il peut y avoir plusieurs couches de protocoles et de services au-dessous de la couche IP et ces couches peuvent, finalement, faire appel à divers types de supports physiques;
- celle de la couche IP qui assure le transport sans connexion des datagrammes (ou paquets) IP. La couche IP a une portée de bout en bout pour une paire donnée d'adresses IP d'origine et de destination. Certains éléments contenus dans les en-têtes de paquets IP peuvent être modifiés par les réseaux mais les données d'utilisateur IP ne peuvent pas être modifiées dans la couche IP ou au-dessous de cette couche;
- les couches supérieures prises en charge par le protocole IP, qui participent aux communications de bout en bout. Il peut s'agir par exemple d'une couche du protocole de commande de transmission (TCP), du protocole de datagramme utilisateur (UDP), du protocole de transfert de fichiers (FTP), du protocole de transport en temps réel (RTP) ou du protocole de transport hypertexte (HTTP). Les couches supérieures modifient et peuvent améliorer la performance de bout en bout assurée par la couche IP.

NOTE 1 – Le paragraphe 5 définit le modèle de qualité de service IP et définit plus précisément les termes clés utilisés dans ce modèle stratifié.

NOTE 2 – Les interactions qualitatives entre ces couches feront l'objet d'une étude complémentaire.



Y.1540(11)_F02

Figure 2 – Modèle stratifié de qualité du service IP – Exemple

5 Modèle générique de qualité du service IP

Le présent paragraphe définit un modèle générique de qualité du service IP. Ce modèle se compose essentiellement de deux types de section: la liaison de commutateur et la section de réseau (NS), qui sont définies au paragraphe 5.2. Elles constituent les blocs de construction qui permettent de représenter tout service IP de bout en bout. Chacun des paramètres de qualité définis dans la présente Recommandation peut être appliqué au transfert dans un seul sens de paquets IP sur une section ou sur une série de sections concaténées.

Le paragraphe 5.4 spécifie l'ensemble des événements de référence de type transfert de paquets IP qui forment la base de la définition des paramètres de performance. Ces événements de référence sont déduits des définitions appropriées du service et du protocole IP, auxquelles ils sont conformes. Le paragraphe 5.5 s'appuie ensuite sur ces événements de référence pour énumérer les résultats possibles lorsqu'un paquet est acheminé dans une section.

NOTE – L'intégration, dans la Recommandation [b-UIT-T I.353], de tout ou partie du modèle de qualité et des événements de référence UIT-T Y.1540 doit faire l'objet d'un complément d'étude.

5.1 Éléments de réseau

5.1.1 Serveur

Un serveur est un ordinateur qui communique au moyen des protocoles Internet. Il implémente des fonctions de routage (c'est-à-dire qu'il fonctionne dans la couche IP) et peut implémenter des fonctions supplémentaires, y compris des protocoles de couche supérieure (comme le protocole TCP dans un serveur d'origine ou de destination (DST)) et des protocoles de couche inférieure (comme le mode ATM).

5.1.2 Routeur

Un routeur est un serveur qui permet la communication entre d'autres serveurs en réexpédiant des paquets IP sur la base du contenu de leur champ d'adresse IP de destination.

5.1.3 Serveur d'origine (SRC)

Un serveur d'origine est un serveur désigné par une adresse IP complète qui émet les paquets IP de bout en bout. En général, un serveur peut posséder plusieurs adresses IP; cependant, un serveur d'origine (SRC) est associé à une unique adresse IP. Les serveurs d'origine émettent également des protocoles de couche supérieure (comme TCP) si de tels protocoles sont implémentés.

5.1.4 Serveur de destination (DST)

Un serveur de destination est un serveur désigné par une adresse IP complète qui reçoit les paquets IP de bout en bout. En général, un serveur peut posséder plusieurs adresses IP. Cependant, un serveur de destination est associé à une unique adresse IP. Les serveurs de destination émettent également des protocoles de couche supérieure (comme TCP) si de tels protocoles sont implémentés.

5.1.5 Liaison

Une liaison est une connexion (physique ou virtuelle) point à point utilisée pour transporter des paquets IP entre une paire de serveurs. Elle ne comporte pas de parties de serveur ni d'autres serveurs. Elle fonctionne au-dessous de la couche IP. Par exemple, une liaison peut être une ligne louée ou une connexion logique appliquée dans un réseau de type Ethernet, dans un réseau à relais de trames, dans un réseau en mode ATM ou dans toute autre technique de réseau fonctionnant au-dessous de la couche IP.

La Figure 3 décrit les éléments de réseau correspondant à un service IP entre un serveur SRC et un serveur DST. Les liaisons, qui peuvent être des connexions téléphoniques, des lignes louées, des anneaux ou des réseaux, sont illustrées sous la forme de lignes tracées entre les serveurs. Les routeurs sont représentés par des cercles et les deux serveurs (SRC et DST) sont représentés par des triangles.

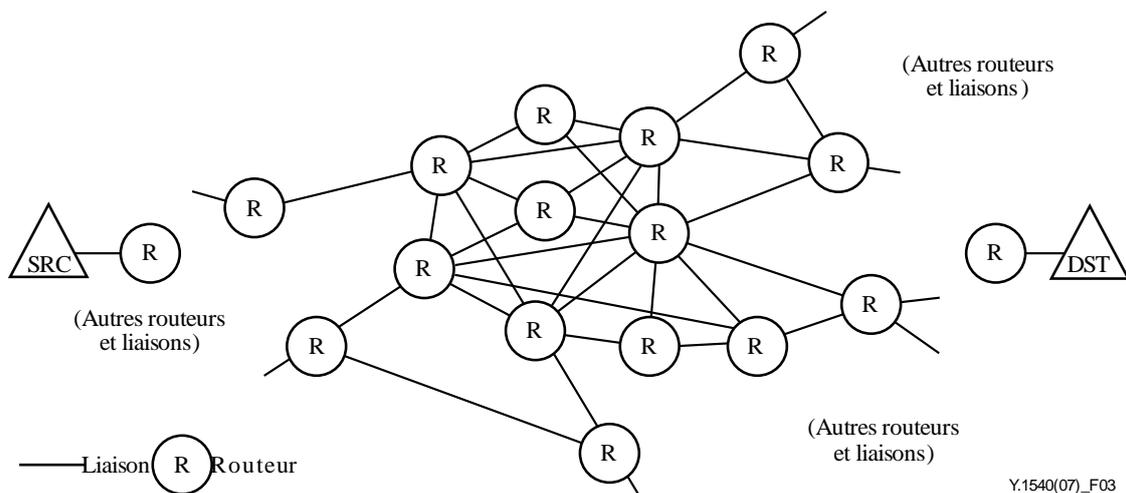


Figure 3 – Éléments d'un réseau IP

5.2 Liaisons de commutateur et sections de réseau

5.2.1 Liaison de commutateur (EL)

Il s'agit d'une liaison reliant:

- 1) un serveur d'origine ou de destination à son serveur adjacent (par exemple un routeur), éventuellement dans une autre zone topographique que l'on désigne parfois par le terme de liaison d'accès, de liaison d'entrée ou de liaison de sortie;
- 2) un routeur dans une section de réseau donnée avec un routeur dans une autre section de réseau.

Noter que la responsabilité d'une liaison de commutateur, de sa capacité et de sa performance est normalement partagée entre les correspondants connectés.

NOTE – L'expression "liaison de commutateur" ("*exchange link*") a un sens analogue au terme "commutateur" ("*exchange*") défini dans le document [b-IETF RFC 2330].

5.2.2 Section de réseau (NS)

Une section de réseau est un ensemble de serveurs associés à leurs liaisons d'interconnexion qui fournissent ensemble une partie du service IP entre un serveur SRC et un serveur DST, et qui relèvent d'une même compétence territoriale, unique ou collégiale. Certaines sections de réseau se composent d'un serveur unique sans liaisons d'interconnexion. Les sections NS d'origine et de destination sont des cas particuliers de sections de réseau. Les paires de sections de réseau sont connectées par des liaisons de commutateur.

NOTE – L'expression "section de réseau" ("*network section*") a plus ou moins le même sens que le terme "nuage" ("*cloud*") défini dans le document [b-IETF RFC 2330].

Tout ensemble de serveurs interconnectés par des liaisons peut être considéré comme formant une section de réseau. Cependant, pour l'objet (futur) de l'attribution d'objectifs de qualité IP, il conviendra de ne retenir que l'ensemble des serveurs et des liaisons relevant d'une même compétence territoriale, unique ou collégiale (comme un fournisseur de services Internet (ISP) ou un fournisseur de services de réseau (NSP)). Ces serveurs possèdent normalement le même identificateur de réseau dans leur adresse IP. Ils ont normalement leurs propres règles de routage interne. Des processus mondiaux et des politiques locales régissent les choix de routage vers les destinations extérieures à une section de réseau (vers d'autres sections de réseau via des liaisons de commutateur). Ces sections de réseau sont normalement limitées par des routeurs qui mettent en œuvre les protocoles IP d'accès extérieur.

5.2.3 Section de réseau d'origine

La section de réseau d'origine est la section de réseau qui inclut le serveur d'origine relevant de la même compétence territoriale. Dans certains cas, le serveur SRC est le seul serveur contenu dans la section de réseau d'origine.

5.2.4 Section de réseau de destination

La section de réseau de destination est la section de réseau qui inclut le serveur de destination relevant de la même compétence territoriale. Dans certains cas, le serveur DST est le seul serveur contenu dans la section de réseau de destination.

La Figure 4 montre la connectivité de réseau correspondant à un service IP entre un serveur SRC et un serveur DST. Aux frontières de chaque section de réseau, des routeurs d'accès reçoivent et émettent des paquets en passant par des liaisons de commutateur.

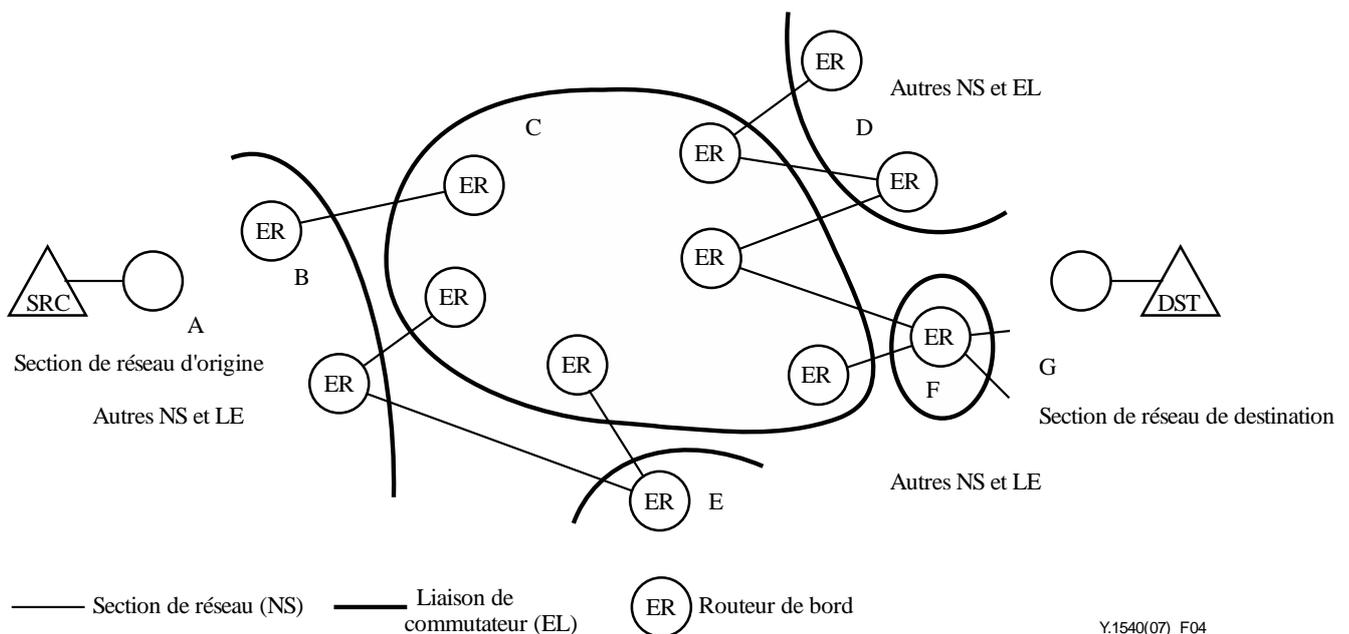


Figure 4 – Connectivité d'un réseau IP

5.3 Points de mesure et sections mesurables

5.3.1 Point de mesure (MP)

Le point de mesure est la frontière entre un serveur et une liaison adjacente, au niveau de laquelle il est possible d'observer et de mesurer des événements de référence concernant la performance. Conformément à la Recommandation [b-UIT-T I.353], les protocoles Internet normalisés peuvent être observés aux points de mesure IP (MP). La Recommandation [b-UIT-T I.353] contient d'autres informations sur les points de mesure destinés aux services numériques.

NOTE – L'emplacement exact d'un point de mesure du service IP dans la pile protocolaire IP fera l'objet d'un complément d'étude.

Une section ou une combinaison de sections est mesurable si elle est délimitée par un ensemble de points de mesure. Dans la présente Recommandation, les sections suivantes sont mesurables.

5.3.2 Section de base

Une section de base est une liaison de commutateur, une section de réseau, un serveur SRC ou un serveur DST. Les sections de base sont délimitées par des points de mesure.

La performance d'une liaison de commutateur ou d'une section de réseau quelconque est mesurable par rapport à tout service IP de bout en bout dans un seul sens. Les *points de mesure d'entrée* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et pénétrant dans une section de base. Les *points de mesure de sortie* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et quittant une section de base.

5.3.3 Réseau IP de bout en bout

Ensemble constitué par des liaisons de commutateur et des sections de réseau qui assurent le transport de paquets IP émis par le serveur SRC vers le serveur DST. Les points de mesure qui délimitent le réseau IP de bout en bout sont ceux qui sont délimitent les serveurs SRC et DST.

La performance d'un réseau IP de bout en bout est mesurable par rapport à tout service IP de bout en bout dans un seul sens. Les *points de mesure d'entrée* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et pénétrant dans un réseau de bout en bout au niveau du serveur SRC. Les *points de mesure de sortie* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et quittant un réseau de bout en bout au niveau du serveur DST.

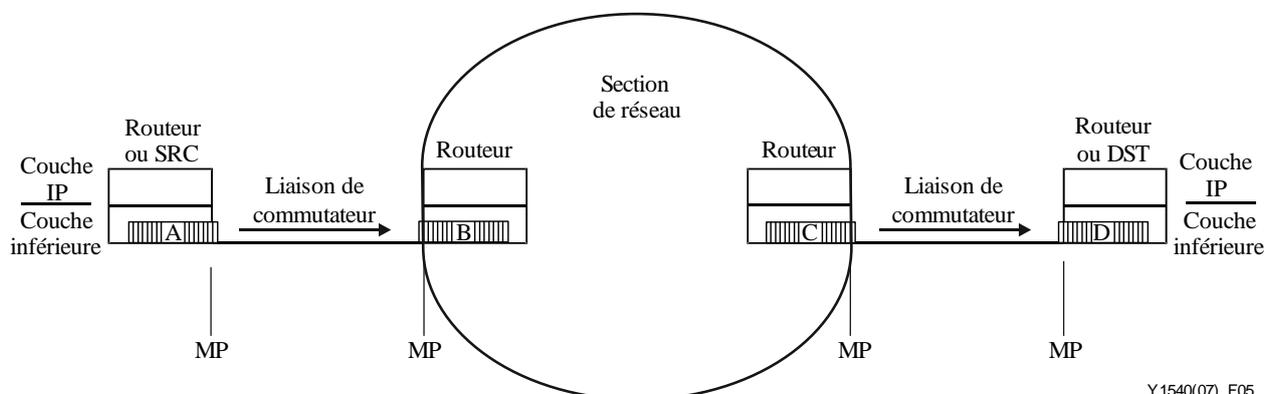
5.3.4 Ensemble de sections de réseau (NSE)

Un ensemble de sections de réseau (NSE) se compose de tout sous-ensemble de sections de réseau connectées avec toutes les liaisons de commutateur qui les interconnectent. Le terme NSE peut se rapporter à une seule section de réseau, à deux ou à un nombre quelconque de sections de réseau, avec leurs liaisons de commutateur connexes. Des paires d'ensembles NSE distincts sont connectées par des liaisons de commutateur. Le terme NSE peut également servir à représenter l'ensemble d'un réseau IP de bout en bout. Les ensembles NSE sont délimités par des points de mesure.

La performance d'un ensemble NSE quelconque est mesurable par rapport à tout service IP de bout en bout dans un seul sens. Les *points de mesure d'entrée* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et pénétrant dans un ensemble NSE. Les *points de mesure de sortie* constituent l'ensemble des points de mesure traversés par des paquets issus du service et quittant un ensemble NSE.

5.4 Événements de référence de transfert de paquets (IPRE)

Dans le contexte de la présente Recommandation, la définition suivante s'applique à un service IP de bout en bout spécifique. Les termes définis sont illustrés dans la Figure 5.



NOTE 1 – Évènements de sortie IP pour paquets A et C.
 NOTE 2 – Évènements d'entrée IP pour paquets B et D.

Figure 5 – Exemple d'événements de référence de transfert de paquets IP

Un événement de transfert de paquets IP se produit:

- lorsqu'un paquet IP traverse un MP; et
- lorsque l'application de procédures IP normalisées à ce paquet permet de vérifier que la somme de contrôle de l'en-tête est valide; et
- lorsque les champs d'adresse d'origine et de destination contenus dans l'en-tête du paquet IP représentent les adresses IP des serveurs SRC et DST prévus.

NOTE – L'en-tête de paquet IP contient des informations, en particulier le type de service (ToS) ou le point de code des services différenciés (DSCP). La mesure dans laquelle ces informations pourraient affecter la qualité de transfert de paquets doit faire l'objet d'un complément d'étude.

Les événements de référence de transfert de paquets sont définis sans tenir compte de la fragmentation des paquets. Ils se produisent à chaque traversée de point MP par un paquet IP, quelle que soit la valeur contenue dans le "fanion de fragments supplémentaires".

Quatre types d'événements de transfert de paquets IP sont définis comme suit:

5.4.1 Événement d'entrée de paquet IP dans un serveur

Un événement d'entrée de paquet IP dans un serveur se produit lorsqu'un paquet IP traverse un point de mesure pour pénétrer dans un serveur (routeur NS ou DST) en provenance de la liaison de commutateur connexe.

5.4.2 Événement de sortie de paquet IP d'un serveur

Un événement de sortie de paquet IP d'un serveur se produit lorsqu'un paquet IP traverse un point de mesure pour sortir d'un serveur (routeur NS ou SRC) en direction de la liaison de commutateur connexe.

5.4.3 Événement d'entrée de paquet IP dans une section de base ou dans un ensemble NSE

Un événement d'entrée de paquet IP dans une section de base ou dans un ensemble NSE se produit lorsqu'un paquet IP traverse un point de mesure d'entrée pour pénétrer dans une section de base ou dans un ensemble NSE.

5.4.4 Événement de sortie de paquet IP hors d'une section de base ou d'un ensemble NSE

Un événement de sortie de paquet IP hors d'une section de base ou d'un ensemble NSE se produit lorsqu'un paquet IP traverse un point de mesure de sortie pour sortir d'une section de base ou d'un ensemble NSE.

NOTE 1 – Les événements d'entrée et de sortie de paquet IP représentent toujours, respectivement, l'entrée dans un serveur et la sortie d'un serveur. Les événements d'entrée et de sortie de paquet IP représentent toujours l'entrée dans une section ou dans un ensemble NSE ou la sortie hors d'une section ou d'un ensemble NSE. Pour illustrer ce point, on notera que l'entrée dans une liaison de commutateur crée un événement de sortie hors du serveur précédent, alors qu'une entrée dans une section de réseau est un événement d'entrée parce que, par définition, une section de réseau est toujours délimitée par des serveurs.

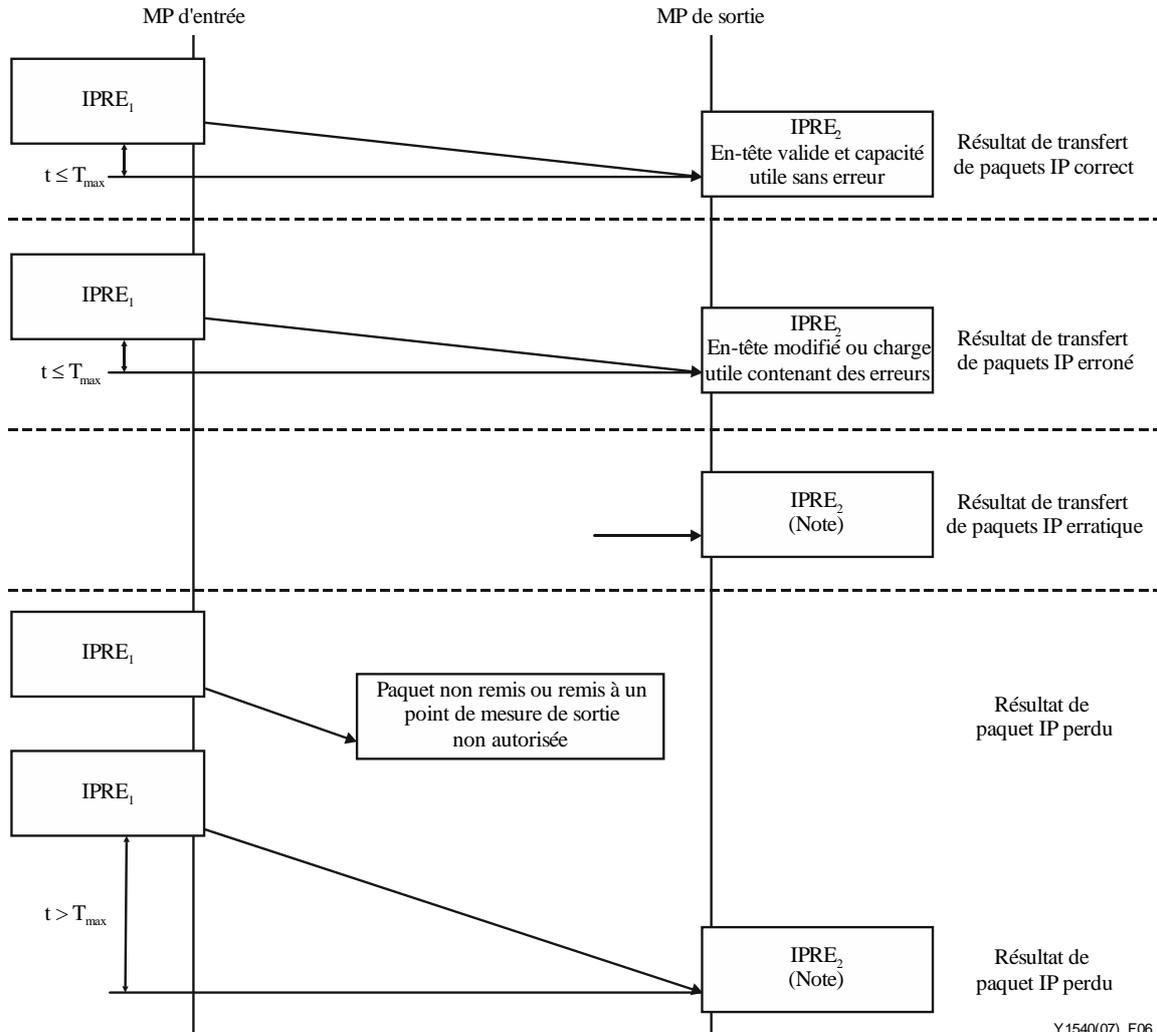
NOTE 2 – Aux fins des mesurages proprement dits, les événements de référence de transfert de paquets IP ne doivent pas nécessairement être observés à l'intérieur de la pile protocolaire IP du serveur. En revanche, l'instant d'apparition de ces événements de référence peut être approché par l'observation de la traversée d'une interface physique associée par des paquets IP. Il convient cependant que cette interface physique soit aussi proche que possible du point de mesure souhaité. Si les événements de référence sont surveillés à l'interface physique, l'instant d'apparition d'un événement de sortie de serveur sera approché par l'observation de l'arrivée du premier bit du paquet IP en provenance du serveur ou de l'équipement d'essai. L'instant d'apparition d'un événement d'entrée dans un serveur est approché par l'observation du dernier bit du paquet IP allant vers le serveur ou vers l'équipement d'essai.

5.5 Résultats de transfert de paquets IP

À la suite des événements de référence de transfert de paquets IP, un certain nombre de résultats possibles de transfert IP peuvent être définis pour tout paquet tentant de traverser une section de

base ou un ensemble NSE. Un paquet IP émis est soit *transféré normalement*, *erroné*, ou *perdu*. Un paquet IP qui a été remis alors qu'aucun paquet IP correspondant n'a été envoyé est considéré comme *erratique*. La Figure 6 illustre les résultats de transfert de paquets IP.

Les définitions des résultats de transfert de paquets IP sont fondées sur les concepts de *points de mesure d'entrée autorisée*, de *points de mesure de sortie autorisée* et de *paquets correspondants*.



Y.1540(07)_F06

NOTE – Le résultat du transfert est indépendant du contenu des paquets IP

Figure 6 – Résultats de transfert de paquets IP

5.5.1 Informations de routage mondial et liaisons de sortie autorisées

Théoriquement, dans un réseau IP connecté, un paquet peut être remis à tout routeur, à toute section de réseau ou à tout ensemble NSE sans que cela empêche qu'il arrive à sa destination. Les informations de routage mondial définissent cependant un ensemble restreint d'adresses de destination que chaque réseau (ou système autonome) est désireux et capable de desservir pour le compte de la section de réseau qui lui est adjacente. Il est logique de penser que (dans le cas le moins favorable), une section de réseau ignorera complètement les paquets dont l'adresse de destination a fait l'objet d'une annonce d'incapacité (ou de réticence) de desserte de la part de la section de réseau. Tous les paquets IP (et leurs fragments) quittant une section de base ne devront donc être réexpédiés que vers d'autres sections de base, selon *autorisation* par les informations de routage mondial disponibles.

Aux fins de la qualité de service, le transport d'un paquet IP par un ensemble NSE ne sera considéré comme correct que si ce NSE réexpédie l'ensemble des contenus des paquets vers d'autres sections de base, selon autorisation par les informations de routage mondial actuellement disponibles. Si l'adresse de destination correspond à un serveur rattaché directement à ce NSE, la seule sortie autorisée et le seul transport IP correct sont une réexpédition vers le serveur de destination.

NOTE 1 – Les procédures IP comprennent la mise à jour des informations de routage mondial. Une section de réseau qui était autorisée peut ne plus l'être à la suite d'une mise à jour des informations de routage partagées entre sections de réseau. Parallèlement, une section de réseau qui jusque-là n'était pas autorisée peut obtenir une autorisation à la suite d'une mise à jour des informations de routage mondial.

NOTE 2 – Les informations de routage peuvent être complétées d'informations relatives à la convenance relative de chacune des liaisons de sortie autorisées. Les implications qualitatives de ces informations supplémentaires doivent faire l'objet d'un complément d'étude.

À un moment donné et par rapport à un service IP de bout en bout donné et à une section de base ou un ensemble NSE donné:

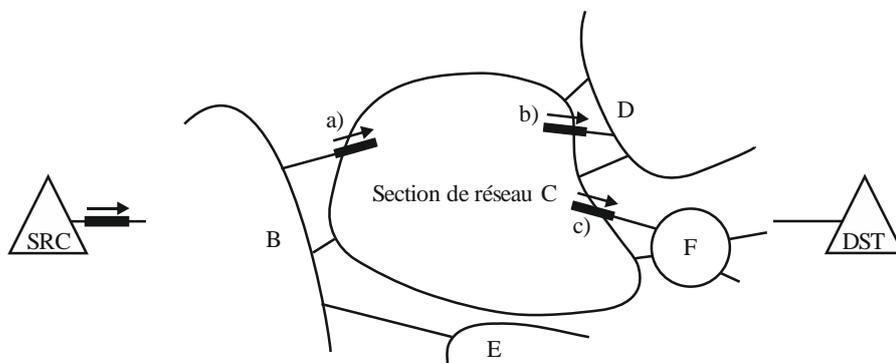
- un point de mesure d'entrée est un *point de mesure d'entrée autorisée* si le passage par ce point de mesure est autorisé par les informations de routage mondial pour pénétrer dans cette section de base;
- un point de mesure *de sortie* est un *point de mesure de sortie autorisée* si le passage par ce point de mesure est autorisé par les informations de routage mondial pour pénétrer dans une autre section de base.

5.5.2 Événements correspondants

L'analyse de performance oblige à associer les paquets passant par un point de mesure aux paquets qui sont passés par un autre point de mesure. Le routage sans connexion implique qu'un paquet puisse sortir d'une section de base en passant par tout point de mesure appartenant à un ensemble de plusieurs (éventuels) points de mesure de sortie autorisée. La fragmentation des paquets implique qu'un paquet pénétrant dans une section de base puisse se fragmenter pour quitter cette section et entrer dans (éventuellement) plusieurs autres sections de base. Finalement, le routage IP en mode sans connexion peut même renvoyer un paquet ou un fragment dans une section de base qu'il a déjà traversée (éventuellement en raison de la mise à jour de tables de routage).

Un événement de sortie IP est dit *correspondre* à un événement d'entrée antérieur si ces deux événements ont été créés par le "même" paquet IP. Ce concept s'applique sans considération du fait que le paquet situé au point de mesure de sortie est le paquet entier ou seulement un fragment du paquet original. La Figure 7 illustre un cas où un paquet entre dans la section de réseau C en provenance de la section de réseau B puis est fragmenté en deux parties dans la section de réseau C. Un des deux fragments est envoyé à la section de réseau D et l'autre est envoyé à la section de réseau F. Ces deux événements de sortie *correspondent* à l'événement d'entrée isolé. Pour éviter une confusion due à des paquets pénétrant de nouveau dans l'ensemble NSE, ce concept de *correspondance* nécessite également qu'il s'agisse de la première fois que ce contenu particulier a quitté l'ensemble NSE (depuis son entrée).

La détermination concrète de la correspondance éventuelle d'événements de référence IP est habituellement effectuée *ad hoc*. Elle se fonde souvent sur l'examen des adresses IP, des informations de routage mondial, du champ d'identification de paquet IP d'autres informations d'en-tête et du contenu des paquets IP.



Y.1540(07)_F07

Un paquet IP provenant du serveur SRC et allant vers le serveur DST pénètre dans la section du réseau C, crée un événement d'entrée, est fragmenté puis crée deux événements de sortie correspondants, b) et c).

Figure 7 – Événements correspondants lorsqu'une fragmentation se produit

5.5.3 Remarques au sujet des définitions de résultats de transfert de paquets correct, erroné, avec perte et erratique

Chacune des définitions suivantes, concernant un résultat individuel de transfert de paquets, est fondée sur l'observation d'événements de référence IP à des points de mesure IP. Après sélection des points de mesure IP appropriés, chaque définition peut être utilisée pour évaluer la qualité d'une liaison de commutateur particulière, d'une section de réseau particulière ou d'un ensemble NSE particulier. Ces définitions peuvent être appliquées à la performance des services de bout en bout.

Ces résultats sont définis sans limitation à un type de paquet particulier (ToS, DSCP, protocole, etc.). La performance de service IP sera différente selon le type de paquet.

Dans chaque définition, la possibilité d'une fragmentation de paquet est prise en considération par la possibilité qu'un même événement de référence IP puisse donner lieu à plusieurs événements subséquents. Noter que si un fragment quelconque est perdu, l'ensemble du paquet original est considéré comme perdu. Si aucun fragment n'est perdu mais que certains fragments soient erronés, l'ensemble du paquet original est considéré comme erroné. Pour que la remise du paquet original soit considérée comme correcte, chaque fragment doit être correctement remis à l'une des liaisons de commutateur de sortie autorisées.

5.5.4 Résultat d'un transfert correct de paquets IP

Le résultat d'un transfert correct de paquets IP est obtenu lorsqu'un même événement de référence de transfert de paquets IP donne lieu, à un point de mesure d'entrée autorisée MP_0 , à un ou à plusieurs événements de référence correspondants à un ou plusieurs points de mesure de sortie MP_i , ces événements intervenant tous dans une durée spécifiée T_{max} à partir de l'événement d'entrée original, et lorsque:

- 1) tous les points de mesure de sortie MP_i , auxquels les événements de référence correspondants se produisent, sont autorisés;
- 2) le contenu complet du paquet original observé au point MP_0 est inclus dans le ou les paquets remis;
- 3) le contenu binaire du ou des champs d'information de paquet IP remis est exactement conforme à celui du paquet original;
- 4) le ou les champs d'en-tête du ou des paquets remis sont valides.

NOTE – Pour une utilisation générale, il est recommandé de fixer la valeur de T_{max} à 3 secondes. Certains trajets de bout en bout mondiaux peuvent toutefois nécessiter une valeur plus élevée pour s'assurer que des paquets ayant un temps de transfert plus long puissent arriver correctement. La valeur de 3 secondes a été utilisée dans la pratique.

5.5.5 Résultat d'un transfert erroné de paquets IP

Le résultat d'un transfert erroné de paquets IP est obtenu lorsqu'un même événement de référence de transfert de paquets IP donne lieu, à un point de mesure d'entrée autorisée MP_0 , à un ou à plusieurs événements de référence correspondants à un ou plusieurs points de mesure de sortie MP_i , tous ces événements intervenant dans une durée spécifiée T_{max} à partir de l'événement de référence original, et lorsque:

- 1) tous les points de mesure de sortie MP_i , auxquels les événements de référence correspondants se produisent, sont autorisés;
- 2) le contenu complet du paquet original observé au point MP_0 est inclus dans le ou les paquets remis;
- 3) soit:
 - le contenu binaire du ou des champs d'information du paquet IP remis n'est pas exactement conforme à celui du paquet original;
 - soit le ou les champs d'en-tête du ou des paquets remis sont altérés.

NOTE – La plupart des paquets à en-tête erroné qui ne sont pas détectés par la somme de contrôle d'en-tête effectuée dans la couche IP seront ignorés ou renvoyés par d'autres procédures de couche IP (par exemple sur la base d'une altération des champs d'adresse ou de type ToS/DSCP). Il en résulte qu'aucun événement de référence n'est créé pour les protocoles de couche supérieure attendant de recevoir ce paquet. Comme il n'y a pas d'événement de référence IP, ces tentatives de transfert de paquets seront considérées comme des résultats de perte de paquet. Les en-têtes erronés qui ne donnent pas lieu à une mise à l'écart ou à un renvoi seront considérés comme des résultats de transfert de paquets erroné.

5.5.6 Résultat d'une perte de paquets IP

Le résultat d'une perte de paquets IP est obtenu lorsqu'un même événement de référence de paquet IP se produit à un point de mesure d'entrée autorisée MP_1 et qu'une partie ou la totalité du contenu correspondant à ce paquet entrant ne donne lieu à aucun événement de référence de paquet IP en tout point de sortie MP_n pendant la durée T_{max} .

Ce résultat peut en réalité se composer d'un ou de plusieurs résultats de *paquets mal acheminés* (qui n'ont pas été observés) au sens de la définition ci-après.

Un paquet mal acheminé apparaît lorsqu'un même événement de référence de transfert de paquets IP à un point MP_0 d'entrée autorisée donne lieu à un ou à plusieurs événements de référence correspondants à un ou à plusieurs points de sortie MP_i , tous ces événements intervenant dans une durée spécifiée T_{max} à partir de l'événement de référence original, et quand:

- 1) le contenu complet du paquet original observé au point MP_0 est inclus dans le ou les paquets remis;
- 2) un ou plusieurs des points de mesure de sortie MP_i , où les événements de référence correspondants se produisent, ne sont pas des points de mesure de sortie autorisée.

5.5.7 Résultat pour des paquets IP erratiques

Le résultat de paquets IP erratiques de bout en bout est obtenu, pour une section de base ou pour un ensemble NSE, dans un service IP de bout en bout lorsqu'un seul paquet IP donne lieu à un événement de sortie pour lequel il n'y a pas d'événement d'entrée correspondant.

5.5.8 Résultats pour des paquets IP secondaires

Les résultats suivants reposent sur les résultats fondamentaux décrits ci-dessus.

5.5.8.1 Résultats pour des paquets IP ordonnés ou réordonnés

La définition de ces résultats de paquets IP nécessite quelques explications de fond.

Le fait de fournir des paquets dans un ordre donné constitue une propriété des tentatives réussies de transport de paquets en vertu de laquelle l'ordre d'envoi de paquets est préservé à l'arrivée dans le serveur de destination (ou au point de mesure). L'ordre d'arrivée est déterminé par la position par rapport à d'autres paquets considérés, bien que le degré de reclassement d'un paquet donné puisse être quantifié en unités de position et de temps et par les distances entre les octets de charge utile. Il est utile de disposer d'un paramètre de performance des paquets réordonnés dans la plupart des applications, surtout lorsqu'il s'agit d'évaluer la prise en charge par le réseau de flux médias en temps réel, compte tenu de leur capacité finie à rétablir l'ordre, ou lorsque la qualité de fonctionnement révèle l'absence de cette capacité. Les paquets comportent généralement un identificateur unique, qui peut se présenter parfois sous la forme d'un numéro de séquence; ce nombre, ou toute autre information (par exemple les horodates du point MP_0), constitue la référence de l'ordre original à la source. En outre, pour pouvoir évaluer l'ordre d'arrivée, il faut aussi être capable de déterminer quel paquet particulier est le "paquet prévu suivant"; or cette tâche est considérablement plus simple lorsque les numéros de séquence sont des entiers croissants consécutifs.

Un résultat de paquets arrivant dans l'ordre se produit lorsqu'un même événement de référence de paquet IP donne lieu, à un point de mesure de sortie autorisée, à ce qui suit:

- Le paquet comporte un numéro de séquence supérieur ou égal à la valeur de paquet prévue suivante. La valeur prévue suivante est incrémentée pour tenir compte de l'arrivée de ce paquet et devient la nouvelle valeur prévue.

Un résultat de paquets réordonné ou arrivant en désordre se produit lorsqu'un même événement de référence de paquet IP donne lieu, à un point de mesure de sortie autorisée, à ce que suit:

- Le paquet comporte un numéro de séquence inférieur à la valeur de paquet prévue suivante; le paquet est donc réordonné. La valeur prévue suivante n'est pas modifiée en raison de l'arrivée de ce paquet.

5.5.8.2 Résultat pour un bloc à perte grave de paquets IP

Un résultat pour un bloc à perte grave de paquets IP (IPSLB) se produit pour un bloc de paquets observés pendant un intervalle de temps T_s au point MP_0 d'entrée, lorsque le nombre de paquets perdus au point MP_i de sortie par rapport au nombre total de paquets dans le bloc est supérieur à s_1 .

La valeur de l'intervalle de temps T_s est fixée provisoirement à 10 secondes. La valeur de seuil s_1 est fixée provisoirement à 0,2. L'évaluation des blocs successifs (intervalles de temps) ne doit pas chevaucher.

NOTE – Ces valeurs visent à identifier des modifications du trajet IP imputables à des actualisations du routage, qui entraînent une dégradation importante de la plupart des applications d'utilisateur. Les valeurs pourront changer à l'issue de nouvelles études ou après l'obtention de nouvelles données d'expérience. Des valeurs inférieures de s_1 représenteraient des événements de réseau supplémentaires pouvant affecter l'utilisation d'applications dépendantes de la connectivité. De même, on pourrait établir une bonne corrélation entre une dégradation importante des applications vidéo et audio et le résultat IPSLB lorsqu'on utilise des longueurs de bloc T_s d'environ 1 seconde, valeur dont l'utilisation peut être importante à l'avenir.

Le nombre minimal de paquets à utiliser en vue d'évaluer le résultat pour un bloc à perte grave est M_{1b} et ces paquets devraient être répartis dans un intervalle T_s . La valeur de M_{1b} appelle un complément d'étude.

5.5.8.3 Résultat pour des paquets IP dupliqués

Le résultat obtenu en cas de transfert de paquets dupliqués est un sous-ensemble des résultats obtenus pour des transferts de paquets réussis. Il est obtenu lorsqu'un même événement de référence de transfert de paquets IP survenant à un point d'entrée autorisée MP_0 donne lieu à au moins deux événements de référence correspondant à un ou à plusieurs points de sortie autorisée MP_i et lorsque

les champs d'informations binaires de tous les paquets ayant fourni le résultat sont identiques au paquet original (généralement aussi au point MP_i).

Il convient de noter que dans une communication point à point, il n'existe qu'un seul point de sortie autorisée MP_i dans lequel le serveur de destination est directement intégré dans l'ensemble NSE. Dans une communication point à multipoint, il peut exister plusieurs points de sortie autorisée MP_i pour les différentes destinations.

5.5.8.4 Résultat pour des paquets IP répétés

Le résultat d'un transfert de paquets répétés est obtenu lorsqu'un même événement de référence de transfert de paquets IP survenant à un point d'entrée autorisée MP_0 donne lieu à au moins deux événements de référence correspondant à un ou à plusieurs points de sortie autorisée MP_i et lorsque les champs d'informations binaires de tous les paquets ayant fourni le résultat sont identiques au paquet original. L'événement de référence en sortie au point MP_i concernant un paquet répété est le premier du paquet original et se produit avant au moins un autre événement de référence en sortie concernant un paquet dupliqué (généralement aussi au point MP_i).

5.5.9 Résultat pour des paquets IP de réparation de flux

Les résultats ci-après reposent sur les résultats fondamentaux et sur une analyse supplémentaire qui découle d'un modèle de systèmes de réparation de flux. On trouvera à l'Appendice VII de plus amples informations générales sur ce sujet et sur les techniques d'atténuation des dégradations (au-dessus de la couche IP) qui sont examinées.

5.5.9.1 Modèle simple de techniques de réparation de flux dans la couche application

L'Appendice VII contient aussi la définition d'un modèle simple qui est décrit ci-dessous. Chaque flux de paquets de la couche application est modélisé de manière à contenir deux catégories de paquets:

- des intervalles ou des paquets de blocs d'informations;
- le nombre maximum de paquets réparables associés au bloc d'informations.

La difficulté, pour concevoir une technique de réparation, consiste à choisir la bonne taille de bloc d'informations, compte tenu de la capacité (maximale) de réparation suffisante pour compenser une proportion élevée de dégradations de paquets sur le réseau (perte, retard excessif et altération), tout en restant dans les limites générales de la capacité de transfert de paquets et en assurant une qualité suffisante dans le flux de la couche application.

Les nouveaux paramètres de performance devraient faciliter ces décisions.

5.5.9.2 Résultat pour des paquets dégradés et pour des intervalles dégradés entre des paquets IP

Le *résultat d'un intervalle dégradé entre des paquets IP* est obtenu pour un ensemble de paquets observés pendant l'intervalle de temps T_1 au point de mesure d'entrée MP_0 lorsque le nombre de résultats concernant des paquets dégradés au point de sortie MP_i est supérieur à x . Il convient de noter que l'intervalle de temps T_1 comprend à la fois des paquets d'informations et des paquets de données de service ou de réparation (s'ils sont intégrés dans le flux entrant).

Les *résultats pour des paquets dégradés* sont obtenus en effectuant la somme des résultats suivants:

- les résultats des paquets perdus, en utilisant un temps T_{max} associé à l'intervalle T_1 et le temps de transfert théorique, qui peut être égal au temps de transfert de paquets minimum pour la population considérée auquel on ajoute (un multiple de) T_1 . Ce résultat tient compte des paquets ayant été placés trop longtemps en file d'attente et des paquets qui ne sont jamais arrivés;
- les résultats des paquets dont le transfert est erroné.

À noter que l'un des facteurs permettant de distinguer ce résultat des autres mesures de perte de paquets ou de blocs tient au fait que les paquets ayant subi un retard exceptionnel (supérieur au seuil de variation du délai de transfert) et les paquets qui ne sont jamais arrivés (et se sont réellement perdus pendant le transfert) sont regroupés dans une même catégorie, celle des paquets dégradés.

Aucune valeur provisoire n'est fixée pour l'intervalle de temps T_1 et le seuil x . En revanche, l'analyse peut se fonder sur une fourchette de valeurs pour ces deux paramètres. La longueur de la charge utile du paquet IP doit aussi être définie car elle a une incidence sur le temps de mise en séquence, et donc sur l'intervalle de temps occupé par un bloc de paquets.

5.5.9.3 Résultat pour des blocs dégradés de paquets IP

Le résultat pour des blocs dégradés de paquets IP est obtenu pour un ensemble de paquets ayant une taille de bloc b , observés au point de mesure d'entrée MP_0 lorsque le nombre de résultats concernant des paquets dégradés au point de sortie MP_i dans le bloc est supérieur à x . Aucune valeur provisoire n'est fixée pour la taille de bloc b et le seuil de réparation x .

6 Paramètres de qualité du transfert de paquets IP

Le présent paragraphe définit un ensemble de paramètres de qualité du transfert d'informations par paquets IP faisant appel aux résultats de transfert de paquets IP définis au paragraphe 5.5. Tous ces paramètres peuvent être estimés sur la base d'observations faites au point de mesure qui délimite la section de base ou l'ensemble NSE faisant l'objet de l'essai.

NOTE – Les définitions des paramètres supplémentaires de qualité de transfert de paquets IP (par exemple le taux de blocs de paquets IP gravement erronés) doivent faire l'objet d'un complément d'étude.

6.1 Définitions de paquets

Le présent paragraphe contient la terminologie essentielle permettant de définir l'applicabilité des paramètres de performance aux ensembles de paquets.

6.1.1 Populations considérées

La plupart des paramètres de qualité sont définis sur des ensembles de paquets dénommés *populations considérées*. Pour le *transfert de bout en bout*, la population considérée est habituellement l'ensemble total des paquets qui sont envoyés par le serveur SRC au serveur DST. Les points de mesure sont, dans le transfert de bout en bout, ceux des serveurs SRC et DST.

Pour une section de base ou un ensemble NSE et par rapport à une paire particulière de serveurs SRC et DST, la population considérée est, à un point de mesure d'entrée autorisé particulier, l'ensemble des paquets qui sont envoyés du serveur SRC au serveur DST et qui sont acheminés vers la section de base ou l'ensemble NSE en passant par ce point de mesure particulier. Ce cas est appelé *transfert à entrée spécifique*.

La population totale considérée pour une section de base ou un ensemble NSE par rapport à une paire particulière de serveurs SRC et DST est l'ensemble total des paquets envoyés du serveur SRC au serveur DST qui sont remis à cette section de base ou à cet ensemble NSE en passant par l'un quelconque de ses points de mesure d'entrée autorisée. Ce cas est appelé *transfert indépendant de l'entrée*.

Chacun de ces paramètres de qualité de transfert IP est défini sans référence à un type de paquet particulier (ToS, DSCP, protocole, etc.). La qualité différera selon le type de paquet et toute déclaration relative à la qualité mesurée devra contenir des informations sur le ou les types de paquet qui ont été inclus dans la population.

6.1.2 Flux de paquets

Un flux de paquets est l'ensemble de paquets associé à un certain flux en mode connexion ou sans connexion ayant la même adresse de serveur d'origine (SRC), la même adresse de serveur de destination (DST), la même classe de service et la même identification de session (par exemple des numéros de port provenant du protocole d'une couche plus élevée). Dans d'autres documents, on peut trouver des termes tels que microflux ou sous-flux pour désigner des flux de paquets ayant ce niveau de classification. Un flux de paquets constitue l'exemple le plus courant d'une population considérée.

Les paquets transportés selon le protocole IPv6 disposent d'un champ supplémentaire destiné au serveur d'origine qui permet d'étiqueter les séquences de paquets devant subir un traitement spécial dans les routeurs IPv6. Ce champ est appelé "étiquette de flux" et définit de manière unique un flux de paquets en combinaison avec l'adresse source.

6.2 Délai de transfert de paquets IP (IPTD)

Le délai de transfert de paquets IP (IPTD) est défini pour tous les résultats de transfert de paquets (corrects ou erronés) de part et d'autre d'une section de base ou d'un ensemble NSE. Le délai IPTD est le temps ($t_2 - t_1$) qui s'écoule entre l'apparition de deux événements de référence correspondants de transfert de paquets IP: l'événement d'entrée $IPRE_1$ à l'instant t_1 et l'événement de sortie $IPRE_2$ à l'instant t_2 , où ($t_2 > t_1$) et ($t_2 - t_1 \leq T_{max}$). Si le paquet est fragmenté à l'intérieur de l'ensemble NSE, t_2 est l'instant de l'événement de sortie correspondant. Le délai de transfert de paquets IP de bout en bout est le délai dans un seul sens entre les points de mesure du serveur SRC et du serveur DST, comme indiqué sur la Figure 8.

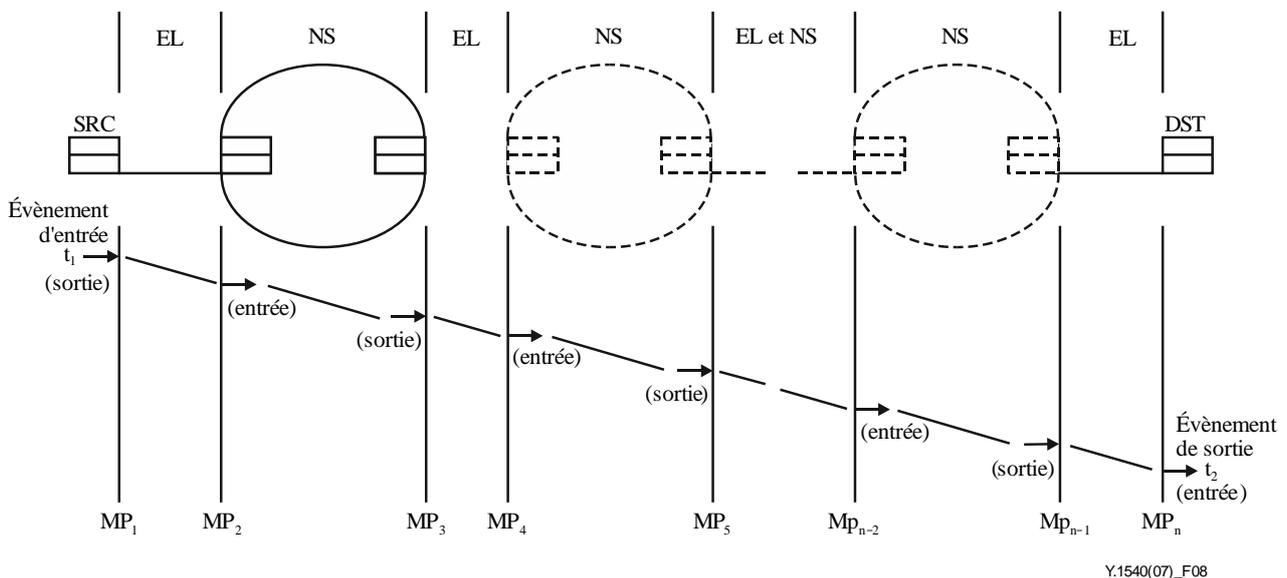


Figure 8 – Événements de délai de transfert de paquets IP (illustrés pour le transfert de bout en bout d'un seul paquet IP)

6.2.1 Délai moyen de transfert de paquets IP

Le délai moyen de transfert de paquets IP est la moyenne arithmétique des délais de transfert de paquets IP pour une population considérée.

6.2.2 Délai minimum de transfert de paquets IP

Le délai minimum de transfert de paquets IP est la plus petite valeur de délai de transfert de paquets IP parmi tous les délais de transfert de la population considérée. Il comprend le délai de propagation et les délais de file d'attente communs à tous les paquets. Ce paramètre ne correspond donc pas nécessairement au délai minimum théorique du trajet entre les points de mesure.

6.2.3 Délai médian de transfert de paquets IP

Le délai médian de transfert de paquets IP est le 50ème centile de la distribution de fréquences des délais de transfert de paquets IP relative à une population considérée. La valeur médiane est la valeur centrale après reclassement des délais de transfert par ordre de longueur. Si la population contient un nombre pair de valeurs, on prend la moyenne des deux valeurs centrales.

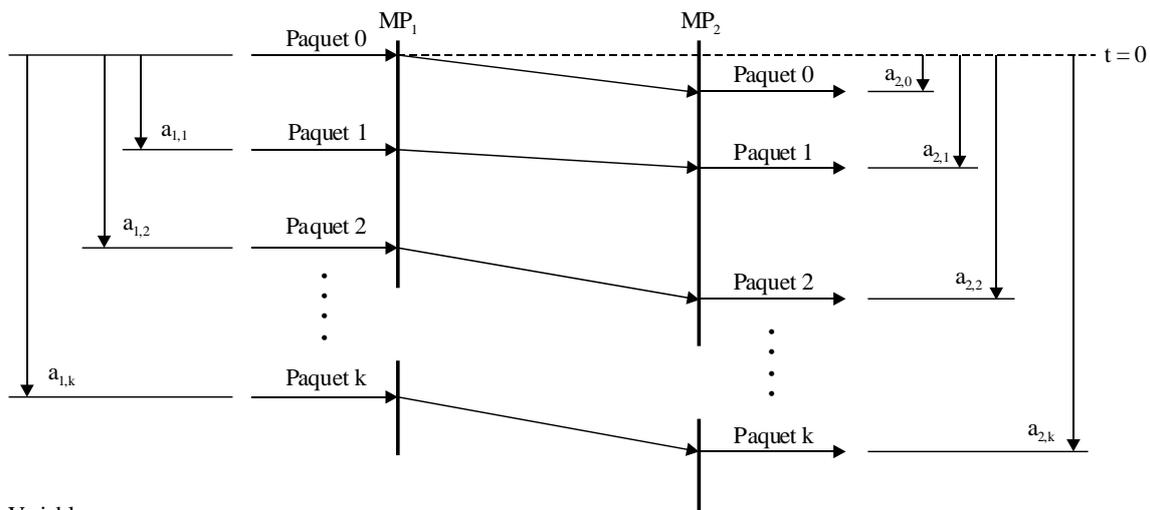
6.2.4 Variation du délai de transfert de paquets IP entre deux points de bout en bout

Les variations du délai de transfert de paquets IP sont également importantes. Des applications de lecture en temps réel peuvent utiliser des informations sur l'étendue totale de la variation du délai IP afin d'éviter des sous-remplissages et des débordements de tampons. Des variations extrêmes du délai IP feront croître les seuils des temporisateurs de retransmission TCP et peuvent également provoquer des délais de retransmission de paquet ou des retransmissions inutiles de paquets.

La variation du délai de transfert (PDV) de paquets IP entre deux points de bout en bout est définie sur la base des observations d'arrivées de paquets IP correspondants aux points de mesure d'entrée et de sortie (par exemple MP_{DST} , MP_{SRC}). Ces observations caractérisent la variabilité de la configuration des événements d'arrivée de paquets IP au point de mesure de sortie et de la configuration des événements correspondants au point de mesure d'entrée par rapport à un délai de référence.

La variation PDV entre deux points (v_k) d'un paquet IP k entre le serveur SRC et le serveur DST est la différence entre le temps absolu de transfert (x_k) du paquet k et un délai de transfert de paquets IP $d_{1,2}$ défini à titre de référence entre les mêmes points de mesure (voir la Figure 9):

$$v_k = x_k - d_{1,2}.$$



Variables:

$a_{1,k}$ instant d'arrivée réel du paquet k au point MP_1

$a_{2,k}$ instant d'arrivée réel du paquet k au point MP_2

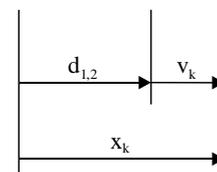
$d_{1,2}$ délai absolu de transfert du paquet 0 entre MP_1 et MP_2

x_k délai absolu de transfert du paquet k entre MP_1 et MP_2

v_k valeur de variation du délai de transfert de paquets entre 2 points entre MP_1 et MP_2

$$x_k = a_{2,k} - a_{1,k}$$

$$v_k = x_k - d_{1,2}$$



Y.1540(16)_F09

Figure 9 – Variation du délai de transfert de paquets IP entre deux points

Le délai de transfert de paquets IP de référence, $d_{1,2}$, entre les serveurs SRC et DST, est le temps absolu de transfert subi par un paquet IP choisi entre ces deux points de mesure.

Des valeurs positives de la variation du délai de transfert de paquets IP (IPDV) entre deux points correspondent à des délais de transfert de paquets IP supérieurs à ceux qui sont subis par le paquet IP de référence; des valeurs négatives de la variation PDV entre deux points correspondent à des délais de transfert de paquets IP inférieurs à ceux qui sont subis par le paquet IP de référence. La répartition des variations PDV entre deux points est identique à celle des délais absolus de transfert de paquets IP, après déplacement d'une constante égale à $d_{1,2}$.

6.2.4.1 Utilisation du délai minimum pour déterminer la variation du délai de transfert de paquets IP

Comme indiqué sur la Figure 9, la variation du délai de transfert d'un paquet individuel est normalement définie comme la différence entre le temps de transfert réel subi par ce paquet et un délai de transfert théorique ou un délai de référence. La référence à privilégier (qui est reprise dans les objectifs IPDV de la Recommandation UIT-T Y.1541) est le délai minimum de la population considérée. Cette méthode permet de faire en sorte que toutes les variations soient indiquées sous forme de valeurs positives et simplifie la communication de la fourchette de variations (la valeur maximale de la variation étant égale à la fourchette). Les répartitions des variations de délais sur les réseaux IP mettent souvent en évidence un biais en faveur de la valeur minimale (par exemple lorsque le minimum et le mode sont égaux). Beaucoup d'autres fonctionnalités utiles de cette forme de variation de délais (variation PDV par rapport au délai minimum) sont décrites en détail dans le document [IETF RFC 5481].

L'emploi du délai moyen à titre de référence pour la variation de délais est obsolète dans la version actuelle de cette Recommandation.

Dans de précédentes versions de cette Recommandation, il existait une autre manière possible d'employer le délai de transfert de paquets minimum en tant que délai théorique; il consistait à utiliser le délai moyen de la population considérée à titre de délai théorique ou de délai de référence. Cette solution avait pour effet de centrer sur zéro la distribution des valeurs de la variation du délai de transfert (lorsque la distribution était symétrique) et de produire à la fois des variations positives et négatives. Cependant, le délai moyen de la population peut être notablement différent du délai d'un paquet donné; la référence de variation créée ainsi est donc artificielle (notamment en cas de distribution bimodale).

6.2.4.2 Limites de la variation du délai de transfert de paquets IP fondées sur des quantiles

La méthode à privilégier (qui est reprise dans les objectifs de la Recommandation [UIT-T Y.1541]) pour déterminer la variation du délai de transfert d'une population considérée consiste à choisir un quantile supérieur et un quantile inférieur de la distribution de la variation du délai de transfert, puis à mesurer la distance entre ces quantiles. On peut par exemple choisir les quantiles $1 - 10^{-3}$ et le quantile 0 (ou minimum), effectuer les mesures et observer la différence entre les valeurs de la variation du délai de transfert à ces deux quantiles. Cet exemple peut aider les concepteurs d'applications à déterminer la taille du tampon de suppression de gigue pour limiter à 0,1% au maximum le débordement de tampon total.

On pourrait fixer un objectif de variation du délai de transfert de paquets IP en fixant une limite supérieure à la différence entre des quantiles prédéterminés de la distribution de la variation du délai de transfert. Il pourrait s'agir par exemple de l'objectif suivant: "la différence entre le quantile 99,9% et la variation minimum du délai de transfert ne devrait pas dépasser 50 ms".

6.2.4.3 Limites de la variation du délai de transfert de paquets IP fondées sur des intervalles

Il existe une autre méthode permettant de déterminer la variation du délai de transfert de paquets IP subie par une population considérée: elle consiste à définir au préalable un intervalle de variation du délai de transfert, (par exemple 50 ms), puis à observer les pourcentages de variations du délai de transfert des différentes cellules à l'intérieur ou hors de cet intervalle. Avec un intervalle de ± 50 ms, les applications utilisant des tailles de mémoire tampon fixes égales à ou proches de 50 ms connaîtraient approximativement le nombre de paquets susceptible de provoquer des sous-remplissages et des débordements de tampons.

NOTE – Si cette méthode est retenue pour déterminer la variation du délai de transfert de paquets IP, il convient de calculer la variation du délai de transfert de chaque paquet en choisissant comme délai minimum le délai théorique défini au paragraphe 6.2.4.1 au lieu de la définition énoncée au paragraphe 6.2.4. En effet, dans cette définition du paragraphe 6.2.4, l'intervalle prédéfini (par exemple 50 ms) risque parfois d'être ancré dans une valeur exceptionnellement élevée ou exceptionnellement faible.

On pourrait fixer un objectif pour la variation du délai de transfert de paquets IP en choisissant une limite inférieure pour le pourcentage de variation du délai de transfert des différents paquets compris dans un intervalle prédéterminé. Il pourrait s'agir par exemple de l'objectif suivant: "≥99,9% des variations du délai de transfert de paquets devraient être compris dans l'intervalle [0 ms, 50 ms]".

6.2.4.4 Paramètres secondaires de la variation du délai de transfert de paquets IP

Il peut s'avérer utile d'avoir un ou plusieurs paramètres représentant l'effet, sur diverses applications, des variations du délai de transfert de paquets IP. Il peut aussi être indiqué de différencier les variations (relativement faibles) du délai de paquet à paquet des discontinuités de délai, éventuellement plus importantes, qui peuvent se traduire par un changement de routage IP. L'Appendice II donne plusieurs définitions secondaires de la variation du délai de transfert ainsi que des indications sur l'application des différents paramètres.

6.3 Taux d'erreur sur les paquets IP (IPER)

Le taux d'erreur sur les paquets IP (IPER) est le rapport du nombre total de résultats erronés de transfert de paquets IP au nombre total de résultats corrects et de résultats erronés de transfert de paquets IP dans une population considérée.

6.4 Taux de perte de paquets IP (IPLR)

Le taux de perte de paquets IP (IPLR) est le rapport du nombre total de résultats de perte de paquets IP au nombre total de paquets IP transmis dans une population considérée.

NOTE – Les critères permettant de décrire les configurations de perte dans un seul sens sont indiqués dans le document [b-IETF RFC 3357]. Une perte de paquets consécutifs revêt un intérêt particulier pour certaines applications non élastiques en temps réel, par exemple la voix et la vidéo.

6.5 Débit de paquets IP erratiques

Le débit de paquets IP erratiques à un point de mesure de sortie est le nombre total de paquets IP erratiques observés au cours d'un intervalle de temps spécifié divisé par la durée de cet intervalle (ce qui équivaut au nombre de paquets IP erratiques par seconde de service)¹.

¹ Étant donné que les mécanismes provoquant l'apparition de paquets IP erratiques sont censés avoir peu de rapport avec le nombre de paquets IP transmis de part et d'autre des sections en essai, ce paramètre de qualité n'est pas exprimé sous la forme d'un taux mais seulement d'un débit.

6.6 Taux de reclassement des paquets IP (IPRR)

Le taux de reclassement des paquets IP (IPRR) est le rapport du nombre total de résultats de paquets réordonnés au nombre total de résultats de transferts réussis de paquets IP dans une population considérée.

La Figure 10 montre un résultat de paquet arrivant en désordre pour le paquet 2 et une tolérance hypothétique pour le temps d'arrivée lorsque le tampon de sortie est capable de rétablir l'ordre.

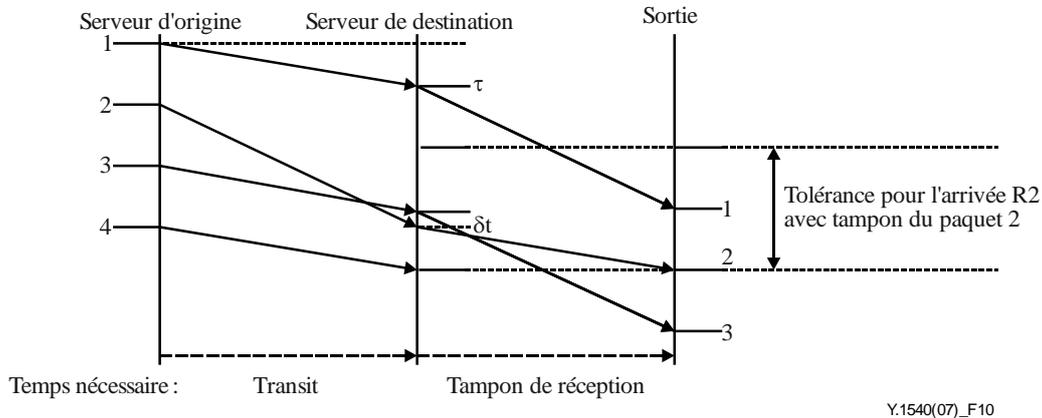


Figure 10 – Illustration de l'arrivée de paquets en désordre

S'il est possible de distinguer des événements de reclassement distincts, il est alors également possible de communiquer le résultat d'un comptage d'événements (ainsi que les critères d'événement).

Il est en outre possible d'évaluer dans quelle mesure un paquet est réordonné. Tout paquet dont le numéro de séquence a pour effet de faire augmenter la valeur prévue suivante d'un pas supérieur au pas normalisé révèle une discontinuité dans l'ordre d'arrivée. À partir de ce point, tout paquet (réordonné) dont le numéro de séquence est inférieur à la valeur prévue suivante peut être quantifié en termes de distance au regard de la discontinuité. Cette distance peut être exprimée en unités de position ou de temps ou par la somme des octets de la charge utile des paquets intermédiaires. À titre d'exemple, si l'on considère la Figure 10, on peut dire que le paquet 2 est "en retard" de δt secondes ou de 1 paquet en termes de position.

On trouvera des paramètres de reclassement supplémentaires dans le document [IETF RFC 4737].

6.7 Taux dans un bloc à perte grave de paquets IP (IPSLBR)

Le taux dans un bloc à perte grave de paquets IP (IPSLBR) est le rapport du nombre de résultats pour un bloc à perte grave de paquets IP au nombre total de blocs dans une population considérée.

NOTE – Ce paramètre permet de détecter des changements multiples du trajet IP imputables à des actualisations du routage, également appelées basculements de voies, qui entraînent une dégradation importante de la plupart des applications d'utilisateur.

6.8 Taux de duplication des paquets IP (IPDR)

Le taux de duplication des paquets IP (IPDR) est le rapport du nombre total de résultats de paquets IP dupliqués au nombre total de résultats de transfert de paquets IP réussis moins les résultats de paquets IP dupliqués dans une population considérée.

6.9 Taux de paquets IP répétés (RIPR)

Le taux de paquets IP répétés (RIPR) est le rapport du nombre total de résultats de paquets IP répétés au nombre total de résultats de transfert de paquets IP réussi moins les résultats de paquets IP dupliqués dans une population considérée.

6.10 Paramètres de réparation de flux

Dans l'idéal, nous aimerions connaître la probabilité qu'un intervalle donné entre des paquets (ou un bloc d'informations b) contienne plus de x paquets dégradés.

$$P(b, x) = p, \text{ or } P(T_I, x) = p$$

La mesure des résultats de paquets dégradés dans une *population considérée* devrait nous fournir une évaluation empirique de cette probabilité au cours du temps disponible.

6.10.1 Taux d'intervalles dégradés sur les paquets IP (IPIIR)

Le taux d'intervalles dégradés sur les paquets IP est le rapport du nombre de résultats d'intervalles dégradés sur les paquets IP au nombre total d'intervalles sans chevauchement dans une population considérée.

6.10.2 Taux de blocs dégradés sur les paquets IP (IPIBR)

Le taux de blocs dégradés sur les paquets IP (IPIBR) est le rapport du nombre de résultats de blocs dégradés sur les paquets IP au nombre total de blocs sans chevauchement dans une population considérée.

6.11 Paramètres de capacité

Un service de transfert de paquets IP de bout en bout suit une séquence ordonnée de sections de base depuis le serveur d'origine jusqu'au serveur de destination. Les paramètres de capacité décrits ci-après définissent les propriétés de ces sections de base au regard de leur aptitude à acheminer du trafic IP, ainsi que les propriétés correspondantes des ensembles de sections de réseau (NSE), également appelés "trajets". Il convient de noter qu'une section de base, tout comme une séquence de sections de base, est associée à une direction. Celle-ci est importante car les propriétés d'une séquence de sections dans la direction aller ne sont pas nécessairement identiques aux propriétés d'une séquence dans la direction retour.

À noter aussi que contrairement aux paramètres de flux définis au paragraphe 6.12, les paramètres de capacité ne dépendent pas de protocoles de couches supérieures à la couche IP (par exemple la couche TCP). Il faut également noter que les paramètres de la capacité utilisée, de l'utilisation et de la capacité disponible ne sont pas mesurables de manière externe; ils nécessitent l'appui de systèmes d'observation ayant accès à des mesures d'utilisation de la liaison, etc.

6.11.1 Éléments de mesure des sections

6.11.1.1 Bits transférés dans la couche IP

Pour une population considérée, les bits transférés dans la couche IP correspondent à huit (8) fois le nombre d'octets de tous les paquets IP ayant produit des résultats de transfert de paquets IP réussi à un point de mesure de sortie, depuis le premier octet de l'en-tête IP jusqu'au dernier octet de la charge utile du paquet IP, ces deux octets étant inclus.

À noter que cette définition est identique à celle des bits de la couche IP indiquée dans le document [IETF RFC 5136]. Il convient aussi de noter que la définition des bits de la couche IP est indépendante de la version du protocole IP.

6.11.1.2 Capacité des sections de la couche IP

Pour une population considérée, la capacité des sections de la couche IP est la suivante:

$$C(t, \Delta t) = \frac{n_0(t, \Delta t)}{\Delta t}$$

où n_0 est le nombre (total) le plus élevé de bits de la couche IP pouvant être transférés par une section de base ayant produit des résultats de transfert de paquets IP réussis à un point de mesure de sortie au cours d'un intervalle de temps défini $[t, t + \Delta t]$.

À noter que cette définition est théorique et ne constitue pas un élément pouvant être mesuré de manière répétitive. L'expression "nombre le plus élevé" de bits n'est pas très claire, sauf dans le cas de mesures répétées. Elle s'entend plus probablement du nombre total de bits présents dans les résultats de transfert réussis au cours de l'intervalle $[t, t + \Delta t]$. On trouvera dans l'Annexe A une définition normative de la capacité mesurable des sections de la couche IP.

6.11.1.3 Capacité utilisée des sections de la couche IP

Pour une population considérée, la capacité utilisée des sections de la couche IP est la suivante:

$$U(t, \Delta t) = \frac{n(t, \Delta t)}{\Delta t}$$

où n est le nombre réel de bits de la couche IP transférés par une section de base ayant produit des résultats de transfert de paquets IP réussis à un point de mesure de sortie au cours d'un intervalle de temps défini $[t, t + \Delta t]$.

6.11.1.4 Utilisation des sections de la couche IP

Pour une population considérée, l'utilisation des sections de la couche IP $V(t, \Delta t)$ est définie comme le rapport de la capacité des sections utilisées de la couche IP $U(t, \Delta t)$ à la capacité des sections utilisées de la couche IP $C(t, \Delta t)$, à savoir:

$$V(t, \Delta t) = U(t, \Delta t) / C(t, \Delta t)$$

6.11.1.5 Capacité disponible des sections de la couche IP

Pour une population considérée, la capacité disponible des sections de la couche IP, $A(t, \Delta t)$, est la partie inutilisée de la capacité des sections de la couche IP pendant un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$. Elle peut être calculée en faisant la différence entre la capacité des sections de la couche IP et la capacité utilisée des sections de la couche IP, à savoir:

$$A(t, \Delta t) = C(t, \Delta t) - U(t, \Delta t)$$

ou cette expression équivalente:

$$A(t, \Delta t) = C(t, \Delta t)(1 - V(t, \Delta t))$$

6.11.2 Mesures des ensembles de sections de réseau (NSE)

6.11.2.1 Capacité des ensembles NSE de la couche IP

La définition de la capacité des sections de la couche IP peut être étendue aux ensembles de sections de réseau (NSE), également appelés "trajet". Pour une population considérée, la capacité d'un ensemble NSE de la couche IP $C_{NSE}(t, \Delta t)$ pendant un intervalle de temps défini $[t, t + \Delta t]$ est la plus petite capacité des sections de la couche IP tout au long de cet ensemble NSE. En d'autres termes, la capacité d'un ensemble NSE de la couche IP est la suivante:

$$C_{NSE}(t, \Delta t) = \min_{i=1..n} C_i(t, \Delta t)$$

où C_i est la capacité de la section de la couche IP portant le numéro i ($i=1..n$) dans l'ensemble NSE.

6.11.2.2 Capacité disponible des ensembles NSE de la couche IP

La définition de la capacité disponible des sections de la couche IP peut être étendue à un ensemble NSE, également appelé "trajet". Pour une population considérée, la capacité disponible d'un ensemble NSE de la couche IP $A_{NSE}(t, \Delta t)$ pendant un intervalle de temps défini $[t, t + \Delta t]$ est la plus petite capacité disponible des sections de la couche IP tout au long de cet ensemble NSE, à savoir:

$$A_{NSE}(t, \Delta t) = \min_{i=1..n} A_i(t, \Delta t)$$

où A_i est la capacité disponible de la section de la couche IP portant le numéro i ($i=1..n$) dans l'ensemble NSE. À noter que le numéro de section déterminant la capacité disponible de l'ensemble NSE de la couche IP peut être différent du numéro de la section déterminant la capacité de l'ensemble NSE de la couche IP.

6.11.2.3 Capacité de la section restreinte de la couche IP

Pour une population considérée, la section restreinte de la couche IP est la section d'un ensemble NSE ayant la plus petite capacité disponible des sections de la couche IP. Si plusieurs sections répondent à ce critère, la section restreinte de la couche IP n'est pas définie de manière unique.

Pour une population considérée, la capacité de la section restreinte de la couche IP dans un ensemble NSE est la capacité de section de la couche IP de la section restreinte de la couche IP.

À noter que la capacité disponible de section de la couche IP de la section restreinte de la couche IP est égale à la capacité disponible de la couche IP de l'ensemble NSE. En d'autres termes, la capacité de la section restreinte de la couche IP est la suivante:

$$C_{TL}(t, \Delta t) = C_i(t, \Delta t) \text{ par conséquent } A_i(t, \Delta t) = A_{NSE}(t, \Delta t)$$

Il convient de noter que la section restreinte de la couche IP ne doit pas nécessairement être identique à la section déterminant la capacité de l'ensemble NSE de la couche IP.

6.11.3 Variabilité

Chaque mesure de capacité P représente une valeur moyenne dans un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$. Pour tout ensemble d'observations consécutives $P_1..P_N$ concernant un paramètre P donné pendant un intervalle de temps $[T, T + \Delta T]$, où $T > t$, on peut employer la moyenne, l'écart-type et les quantiles pour décrire la variabilité.

6.11.3.1 Moyenne

La moyenne est calculée de la manière suivante:

$$a_p(T, \Delta T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1..n} P_i(t, \Delta t)$$

6.11.3.2 Écart-type

L'écart-type est calculé de la manière suivante:

$$s_p(T, \Delta T) = \sqrt{\sum_{i=1..n} (P_i(t, \Delta t) - a_p(T, \Delta T))^2}$$

6.11.3.3 Quantiles

Pour une liste ordonnée de N valeurs $P_1..P_n$ le k ème 100-quantile (c'est-à-dire le k ème centile) est défini de la manière suivante:

$$P_I : I = \left\lceil N \frac{k}{100} \right\rceil$$

où P_I est la valeur de donnée correspondant au k ème 100-quantile. (le symbole $\lceil \rceil$ signifie que si $N \frac{k}{100}$ n'est pas un nombre entier, il doit être arrondi à l'entier supérieur suivant pour obtenir l'indice de la liste I .)

Les quantiles correspondant au minimum ($k = 0$), au médian ($k = 50$) et au maximum ($k = 100$) sont particulièrement intéressants et doivent être communiqués. On peut aussi employer d'autres quantiles, par exemple $k = 95$ ou $k = 99$.

6.12 Paramètres concernant les flux

Il est utile de décrire la qualité de transfert en termes de paramètres de flux ou de débit utile, car ces paramètres permettent d'évaluer l'aptitude des réseaux ou des sections IP à acheminer des volumes de paquets IP. Il convient de noter qu'un paramètre destiné à décrire le débit utile d'une application IP ne fournit pas une valeur égale au volume des ressources (la capacité) disponibles pour cette application (tel que quantifié selon le paragraphe 6.11 et mesuré par les méthodes décrites à l'Annexe A). En effet, les protocoles des couches supérieures qui emploient des contrôles de flux en boucle fermée sur la couche IP (comme le contrôle de flux TCP) influencent également le débit utile mesuré de la couche IP.

Dans cette version de la présente Recommandation, il est recommandé que tous les paramètres associés au flux ou au débit utile soient conformes aux exigences suivantes:

- 1) un paramètre décrivant le débit utile offert à un service IP doit normalement mettre en relation le nombre de paquets IP correctement transportés par un réseau ou par une section IP avec le nombre de paquets IP qui sont acheminés dans ce réseau ou dans cette section;
- 2) un paramètre associé au débit utile doit s'appliquer à un réseau IP de bout en bout et au transport IP par une liaison de commutateur, une section de réseau ou un ensemble de sections de réseau.

Certains paramètres associés au flux ou au débit utile tentent de décrire la capacité d'écoulement d'un réseau IP, c'est-à-dire son aptitude à soutenir un débit donné de transfert de paquets IP. Il est recommandé que ces paramètres et méthodes de mesure soient conformes aux exigences supplémentaires suivantes:

- 1) Le schéma d'écoulement du trafic offert au réseau ou à la section IP doit en principe être décrit, étant donné que l'aptitude du réseau ou de la section IP à acheminer correctement ces paquets dépend de ce schéma d'écoulement du trafic;
- 2) Le débit auquel le trafic est offert ne devrait pas dépasser la capacité (en bits/s) de la liaison qui connecte les sections en essai aux sections de destination qui ne sont pas en essai;
- 3) Il convient de déclarer le type de paquet IP considéré dans toute déclaration relative à la qualité de transfert en termes de débit utile (le type comportant la version IP, la présence d'en-têtes d'extension, le protocole de la couche de transport, les autres en-têtes de protocole et toute autre information pertinente, par exemple la longueur des paquets employés);
- 4) Certaines formes de contrôle de flux employées dans la couche IP ou une couche supérieure peuvent provoquer des erreurs de mesure. Si par exemple une mesure de débit utile dans la couche IP est soumise à un suivi des confirmations, à des limites de taille de la fenêtre ou à un contrôle de flux visant à atténuer l'encombrement (par exemple en TCP), l'erreur de mesure qui lui est associée doit être évaluée et communiquée. Cette erreur de mesure indique quelle est la capacité de la couche IP éventuellement non utilisée lorsque les spécifications et les résultats du service Internet sont comparés aux méthodes fondées sur le contrôle de flux.

Par ailleurs, il est recommandé de suivre les lignes directrices relatives aux paramètres du débit utile et à leur mesure énoncées dans la Recommandation IETF RFC 3148, qui établit un cadre de mesure de la capacité de transfert en masse (BTC).

Les paramètres relatifs au flux et au débit utile sont définis dans l'Annexe A. On trouvera dans l'Appendice IX une explication des raisons pour lesquelles les mesures utilisant le protocole TCP ne respectent pas les exigences du présent paragraphe.

NOTE – L'Appendice III (Paramètres liés au débit et à la capacité de débit utile) est obsolète dans la version de 2019.

7 Disponibilité du service IP

La disponibilité du service IP est applicable aux services, aux sections de base et aux ensembles NSE employés dans le transfert IP de bout en bout.

Une fonction de disponibilité (définie au paragraphe 7.1) permet de classer, en périodes disponibles et en périodes indisponibles, la durée totale de service prévue d'un service IP. Sur la base de cette classification, on définit au paragraphe 7.2 le pourcentage de disponibilité IP ainsi que le pourcentage d'indisponibilité IP. Finalement, un modèle à deux états de la disponibilité du service IP sert de base à la définition, au paragraphe 7.2 de paramètres de disponibilité associés.

NOTE – Sauf indication contraire d'un fournisseur de service IP, on suppose que la durée prévue d'un service IP est de 24 heures, sept jours sur sept.

7.1 Fonction de disponibilité du service IP

La base de la fonction de disponibilité du service IP est un seuil de qualité en termes de taux IPLR.

Le service IP est disponible de bout en bout si le taux IPLR pour le transfert de bout en bout est inférieur au seuil c_1 qui est défini dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Fonction de disponibilité du service IP

Critère d'interruption du service	Seuil
IPLR > c_1	$c_1 = 0,20$
<p>NOTE – La valeur de 0,20 pour c_1 est considérée comme provisoire et comme nécessitant un complément d'étude. La valeur provisoire précédente de c_1 était de 0,75. Les valeurs de 0,9 et 0,99 ont également été suggérées pour ce critère. Toutefois, à la date d'approbation de la présente Recommandation, la majorité des causes d'indisponibilité semblait provenir de défaillances lorsque le taux de perte était essentiellement de 100% et que de nombreuses applications des réseaux IP ne fonctionnaient plus si le taux de perte était supérieur à 0,20. Lorsque les réseaux IP prendront en charge de multiples qualités de service, il sera peut-être approprié d'envisager différentes valeurs de c_1 pour différents services. Dans ce cas, des valeurs de c_1 comprises entre 0,03 et 0,2 (compte tenu de la résilience des différents dispositifs de codage de la parole) ont été suggérées pour des services offrant la classe 0 ou la classe 1 définis dans la Recommandation UIT-T Y.1541, et de $c_1 = 0,75$ pour la classe 5 définie dans cette même Recommandation.</p> <p>Le seuil c_1 ne doit être utilisé que pour déterminer le moment où les ressources du réseau IP sont (temporairement) incapables de prendre en charge un service utile de transfert de paquets IP. La valeur c_1 ne doit pas être considérée comme une déclaration de la qualité de transfert en termes de taux IPLR ni comme un objectif de taux IPLR convenant pour toute application IP. Il y a lieu que les objectifs de qualité en termes de taux IPLR excluent toutes les périodes d'indisponibilité du service, c'est-à-dire tous les intervalles pendant lesquels IPLR > c_1.</p>	

Pour une paire particulière de serveurs SRC et DST, *une section de base ou un ensemble NSE est disponible pour un transfert indépendant de l'entrée* si le taux IPLR pour ce transfert de bout en bout est inférieur au seuil c_1 , mesuré de part et d'autre de tous les points de mesure d'entrée autorisée.

Par rapport à une paire particulière de serveurs SRC et DST, *une section de base ou un ensemble NSE est disponible pour un transfert à entrée spécifique* si, pour cette paire, le taux IPLR est inférieur au seuil c_1 , mesuré à partir d'un point de mesure spécifique d'entrée autorisée.

NOTE 1 – Du point de vue des opérations, il sera possible de mesurer et de surveiller la disponibilité à partir d'un point de mesure spécifique d'entrée autorisée, puis d'utiliser ces informations pour en déduire la disponibilité de transfert indépendant de l'entrée.

NOTE 2 – La relation quantitative entre la disponibilité de service IP de bout en bout et la disponibilité de service IP de la section de base ou de l'ensemble NSE reste à étudier.

Si le critère d'interruption du service indiqué dans le Tableau 1 est satisfait (c'est-à-dire si le taux IPLR dépasse son seuil), le service IP est dans l'état d'indisponibilité (c'est-à-dire qu'il est interrompu). Le service IP est dans l'état de disponibilité (sans interruption) si les critères d'interruption ne sont pas satisfaits. Le nombre minimal de paquets à utiliser pour évaluer la fonction de disponibilité du service est M_{av} (la valeur de cette variable doit faire l'objet d'un complément d'étude. Dans les essais de disponibilité fondés sur le trafic produit par l'utilisateur terminal, on a proposé un nombre minimal M_{av} de 60 paquets, transférés pendant T_{av} au débit d'un paquet par seconde.). La durée minimale d'un intervalle pendant lequel la fonction de disponibilité du service IP doit être évaluée est T_{av} ; la valeur de cette variable est provisoirement fixée à une minute. L'étude a révélé que cette valeur est conforme aux limites fixées dans la pratique pour les opérations de la couche IP. L'observation des performances des couches inférieures et des défaillances des éléments du réseau peut permettre de détecter une indisponibilité imminente dans un délai plus court et donc de prendre une mesure corrective directe). L'Appendice VI expose les raisons pour lesquelles on a actuellement choisi ces définitions et ces valeurs de T_{av} et de c_1 dans la fonction de disponibilité des services IP.

NOTE 3 – Le critère d'interruption fondé sur le taux IPLR est censé décrire de manière satisfaisante la disponibilité du service IP. Celle-ci peut cependant tenir compte également de la performance en termes de paquets gravement erronés (taux IPER et débit de paquets IP erratiques). L'inclusion de paramètres supplémentaires de décision de disponibilité avec leurs seuils associés reste à étudier.

NOTE 4 – Cette définition dans un seul sens de la disponibilité est fondée sur le fait que les paquets IP empruntent plus souvent des itinéraires différents entre le serveur SRC et le serveur DST que dans le sens inverse. Si du point de vue d'un utilisateur de réseau IP, une définition de disponibilité dans les deux sens est nécessaire, une telle définition peut être facilement déduite de cette définition dans un seul sens en faisant la somme du temps d'indisponibilité sans chevauchement sur le trajet retour.

Il est prévu que cette définition de la disponibilité du service IP soit applicable aussi bien au trafic IP produit par l'utilisateur terminal (c'est-à-dire au flux normal de paquets IP entre le serveur SRC et le serveur DST) ainsi qu'au trafic produit par des prototypes et par des méthodes d'essai. Dans un cas comme dans l'autre, l'origine du trafic IP doit être indiquée lors de la notification des conclusions de disponibilité. Une telle indication doit inclure les types spécifiques de paquets utilisés dans chaque sens du flux.

Le trafic expressément produit pour vérifier l'état de disponibilité doit être limité de façon qu'il ne provoque pas d'encombrement pouvant avoir une incidence sur un autre trafic et augmenter notablement la probabilité que les critères d'interruption soient dépassés.

On trouvera dans l'Appendice IV de plus amples informations sur la détermination de l'état de disponibilité.

7.2 Paramètres de disponibilité du service IP

7.2.1 Pourcentage d'indisponibilité du service IP (PIU)

Le pourcentage d'indisponibilité du service IP (PIU) est le pourcentage du temps total de service IP prévu (pourcentage d'intervalles T_{av}) qui est classé comme indisponible par la fonction de disponibilité du service IP.

7.2.2 Pourcentage de disponibilité du service IP (PIA)

Le pourcentage de disponibilité du service IP (PIA) est le pourcentage du temps total de service IP prévu (pourcentage d'intervalles T_{av}) qui est classé comme disponible par la fonction de disponibilité du service IP. Les pourcentages PIU et PIA ont la relation suivante:

$$PIU = 100 - PIA$$

NOTE – Étant donné que le taux IPLR augmente normalement en proportion directe de la charge offerte par le serveur SRC au serveur DST, la probabilité de dépasser le seuil c_1 augmente en même temps que la charge offerte. Les valeurs de pourcentage PIA sont donc susceptibles d'être plus petites lorsque la demande de capacité est plus grande entre le serveur SRC et le serveur DST.

L'Appendice IV contient des renseignements sur l'échantillonnage permettant de déterminer les pourcentages PIA et PIU.

Annexe A

Paramètres et méthodes de mesure de la capacité IP et des flux fondés sur le protocole IP

(Cette Annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation.)

A.1 Contexte

La normalisation des architectures de mesure permettant de décrire le "service Internet" a débuté en 2013. On emploie fréquemment un produit d'accès aux réseaux de consommateurs qui prend en charge le protocole Internet pour établir une connexion à l'Internet. La plupart des applications de consommateurs emploient habituellement le transport TCP dans leurs communications. Le TCP assure une transmission fiable des datagrammes. Lorsqu'on tente de décrire un service Internet par des mesures normalisées, on emploie souvent des méthodes visant à décrire les propriétés de la couche de transport TCP pour évaluer les propriétés de la couche Internet ou de la couche de liaison, par exemple la largeur de bande de l'accès. Cependant, certains s'étant inquiétés des éventuels défauts de cette démarche, d'autres méthodes ont été proposées pour décrire par des mesures les services d'accès à l'Internet destinés aux consommateurs.

Parallèlement, on constate une forte tendance à remplacer le transport TCP par le transport UDP avec des charges utiles ayant des parties ouvertes et des parties chiffrées, une retransmission dans la couche application et un contrôle de l'encombrement. L'emploi du protocole QUIC de Google et l'approbation imminente du protocole QUIC de l'IETF [b-QUIC] vont rapidement transformer l'environnement de transport de l'Internet, et les consommateurs qui utilisent les moteurs de recherche les plus répandus sont ou seront parmi les premiers à les adopter.

La présente annexe contient la définition des paramètres et des méthodes permettant de mesurer la largeur de bande d'accès correspondant à la capacité maximale de la couche IP. Les paramètres et les méthodes de mesure liés aux flux (débit utile de transport) pourront également être définis dans le présent document à l'avenir après un complément d'étude. Ces paramètres et méthodes de mesure peuvent être employés aussi bien par les abonnés au service Internet (utilisateurs finaux) que par les fournisseurs du service Internet, étant entendu que les points de mesure d'entrée et de sortie choisis déterminent entièrement la possibilité d'employer ces outils par une comparaison entre les mesures effectuées et les spécifications des services de la couche IP.

La Commission d'études 12 de l'UIT-T (CE 12) a une longue expérience de l'élaboration de normes de mesure et de modélisation dans le domaine des télécommunications. En outre, il existe des spécialistes des méthodes et outils statistiques permettant de comparer objectivement des méthodes de mesure et de modélisation proposées. Chacun reconnaît qu'il est judicieux de s'appuyer sur les compétences et les méthodes de la CE 12 pour déterminer si différentes propositions concurrentes peuvent être employées pour décrire le "service Internet destiné aux consommateurs". Il s'agit de dépasser le stade de l'échange d'opinions pour présenter une comparaison des concepts et des preuves obtenues dans des conditions d'essai reproductibles. La Recommandation [b-UIT-T P.800] établit les exigences suivantes:

Il importe que les conditions simulées lors de l'essai soient correctement spécifiées et réalisées, et qu'elles soient mesurées exactement avant et après chaque expérience; (...) et des enregistrements fidèles des résultats de chaque essai doivent être conservés.

L'IETF a approuvé et publié en mars 2018 le document RFC 8337, intitulé "*Model-Based Metrics for Bulk Transport Capacity*" (Mesures fondées sur un modèle concernant la capacité de transport en masse) [IETF RFC 8337]. Les travaux sur les mesures fondées sur un modèle (MBM) étaient le fruit de nombreuses années d'efforts au cours desquelles on a étudié le problème de la mesure de la capacité de transport; ils ont surtout été menés au sein du groupe de travail sur les mesures de performance IP (IPPM) de l'IETF. Cette spécification décrit en détail les nombreux problèmes et

difficultés liés à la nécessité de pouvoir reproduire des essais sur un transport TCP conforme à la norme (chapitre 4). La solution de ces problèmes repose essentiellement sur la conception d'une méthode et d'un ensemble de tests de diagnostic dans lesquels le contrôle de flux du TCP est désactivé. Cette méthode prévoit d'évaluer la qualité de fonctionnement d'un transport cible en termes de débit de transmission et de temps de transmission aller-retour (RTT).

Avant la présente Recommandation, certains rapports ou normes avaient décrit quelques outils (comme iPerf) et brièvement mentionné les mesures de capacité IP fondées sur le protocole UDP. Le secteur considère aujourd'hui que la publication d'une norme de mesure et la création d'un outil conforme à celle-ci constituent le meilleur moyen de proposer de nouvelles méthodes et mesures en la matière. La présente annexe contient une spécification de mise en œuvre suffisamment détaillée pour produire des résultats statistiquement équivalents (comme l'indique le document [b-IETF RFC 6576] issu des travaux du groupe IPPM). Un outil de mesure conforme à cette annexe sera fourni séparément.

On trouvera dans la présente annexe le plan d'essai permettant d'évaluer les méthodes de mesure pertinentes. Ce plan s'appuie sur les principes de la CE 12 énoncés dans le document [b-UIT-T P.800] pour établir une "référence de base" afin de comparer les méthodes de mesure proposées. Les essais se sont déroulés en deux phases: dans la phase 1, des essais ont été menés en laboratoire pour établir la "référence de base" et les limites de la plate-forme de test et pour examiner les méthodes de mesure proposées dans des conditions contrôlées. Au cours de la phase 2, des essais ont été effectués sur le terrain conformément au plan d'essai.

Les résultats des évaluations (conformément au plan d'essai) sont résumés dans l'Appendice X (à titre d'information), tant pour la phase 1 en laboratoire que pour la phase 2 sur le terrain. On trouvera dans d'autres appendices des informations recueillies à l'appui du consensus présenté ici, ainsi que des détails supplémentaires sur les calculs et les facteurs de conversion entre les mesures employés dans les différentes couches.

A.2 Paramètres et méthodes de mesure de la capacité d'accès de la couche IP (accès à l'Internet des consommateurs)

A.2.1 Définition des éléments de mesure d'une capacité IP mesurable

Le paragraphe 6.11.1.2 définit un paramètre idéal de la capacité des sections de la couche IP de la manière suivante: il s'agit du "nombre (total) le plus élevé de bits de la couche IP pouvant être transférés (...) au cours d'un intervalle de temps défini $[t, t + \Delta t]$ ". On trouvera dans le présent paragraphe un version mesurable (plus pratique) de cette définition idéale.

Pour une population considérée, la capacité maximale des sections de la couche IP au cours d'un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ est la suivante:

$$Maximum_C(t, \Delta t) = \frac{\max_{[t, \Delta t]}(n_0(dt_n, dt_{n+1}))}{dt}$$

où:

l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ se compose de x sous-intervalles égaux, dt étant exprimé en termes de longueur;

n_0 est le nombre total de bits d'en-tête et de charge utile de la couche IP pouvant être transférés par une section de base ayant produit des résultats de transfert de paquets IP réussi à un point de mesure de sortie au cours d'un intervalle de temps défini $[dt_1, dt_2]$ ou d'autres intervalles dt exprimés en termes de longueur, et

la capacité $Maximum_C(t, \Delta t)$ correspond à la valeur maximale du nombre n_0 mesuré à tout sous-intervalle $[dt_n, dt_{n+1}]$ de l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$, divisée par la durée du sous-intervalle.

À noter qu'il faut employer le transport UDP pour évaluer la mesure de capacité IP mesurable.

Cette méthode de mesure nécessite en outre une définition de son débit d'envoi, qui est présentée ci-dessous.

A.2.1.1 Débit binaire d'envoi de paquets IP (IPSBR)

Pour une population considérée, le débit binaire d'envoi de paquets IP (IPSBR) produit par un expéditeur à un point de mesure d'entrée est égal à huit fois le nombre total d'octets transmis dans les en-têtes et les charges utiles des paquets IP ayant créé un événement de référence de transfert de paquets IP à ce point de mesure pendant un intervalle de temps défini, divisé par la durée de l'intervalle de temps. On peut aussi employer le nombre d'octets transmis dans les en-têtes et les charges utiles des paquets IP ayant créé des événements de référence de transfert de paquets IP par seconde de service.

A.2.2 Méthode de mesure

Les étapes générales de la méthode (ou procédure) de mesure sont les suivantes:

- L'expéditeur fait en sorte d'envoyer et de recevoir le flux de paquets IP au moyen de la couche de transport UDP en employant les principaux paramètres définis, notamment:
 - le type de paquets, y compris les longueurs d'en-tête et de charge utile, les en-têtes et les options présents et toute indication de traitement particulier dans le réseau;
 - le débit binaire d'envoi de départ ou variable des paquets pendant un intervalle de temps défini (par exemple l'intervalle cohérent avec le paramètre HZ, qui est très inférieur à dt , celui-ci étant le sous-intervalle de signalement pendant l'essai);
 - la longueur, la durée et les caractéristiques de la phase de préambule ou de préparation de l'essai (ces éléments sont essentiels pour certains types de réseaux comme les réseaux mobiles);
 - les règles d'envoi particulières, qui comprennent la sporadicité tolérée ou prévue (envoi dos à dos).
- Au cours d'un essai, le débit binaire d'envoi doit varier en fonction d'un algorithme de recherche défini et doit présenter les caractéristiques suivantes:
 - un objectif de recherche précis, composé d'un ou de plusieurs éléments de mesure et de leurs seuils de fonctionnement correspondants;
 - une durée d'essai définie, qui se compose de la durée des différentes étapes de l'algorithme de recherche;
 - l'ensemble des mesures effectuées aux sous-intervalles dt qui confirment les mesures de synthèse effectuées à la fin de chaque essai;
 - la durée maximale du processus de recherche (limite de temps).

La présente annexe doit définir un algorithme de recherche obligatoire; d'autres algorithmes peuvent être obligatoires ou facultatifs (selon le chapitre ou l'annexe qui les définissent). L'emploi d'un algorithme obligatoire ou facultatif doit être communiqué à l'utilisateur en même temps que les résultats.
- Toutes les mesures (les résultats des essais) recueillies au fil de la recherche doivent être stockées sous forme de séries chronologiques pour permettre l'analyse du processus de recherche.
- Il convient de définir le post-traitement de toutes les mesures (les résultats des essais) recueillies au fil de la recherche pour déterminer la ou les valeurs de synthèse obtenues à la fin d'un processus de recherche particulier. Il peut s'agir par exemple des traitements suivants (pour le débit de réception, la capacité mesurée ou d'autres paramètres comme le temps de latence, l'affaiblissement de transmission et le reclassement):

le calcul d'une moyenne de toutes les mesures de valeur du débit de réception pendant tous les essais;

le calcul d'une moyenne de toutes les mesures de valeur du débit de réception lorsque l'objectif de la recherche a été atteint;

le calcul de la valeur maximale parmi toutes les mesures de valeur du débit de réception lorsque l'objectif de la recherche a été atteint;

le calcul d'une moyenne de toutes les mesures de valeur du débit de réception pour tous les essais lorsque des critères d'exclusion de résultat particuliers ont été satisfaits (par exemple la suppression des valeurs aberrantes telles que déterminées par des critères précis);

la synthèse de paramètres connexes (voir le paragraphe A.2.3 ci-après).

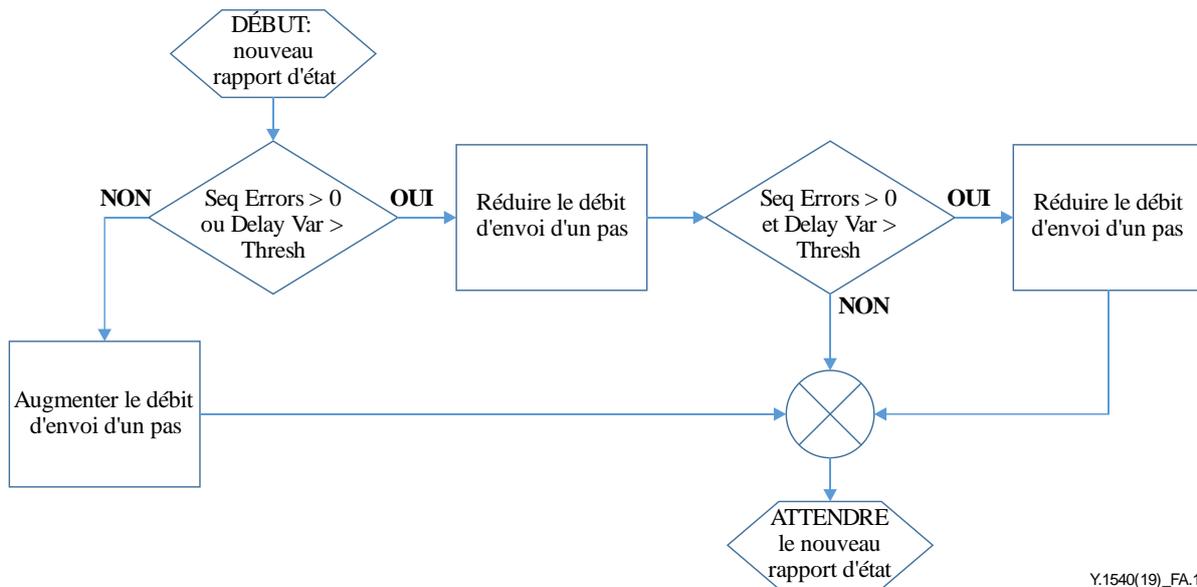
- Il convient de définir des critères permettant d'invalidier les résultats d'un processus de recherche donné, par exemple lorsque le débit d'envoi requis n'a pas été atteint, ou que du trafic concurrent a été détecté (quoique ce trafic ne puisse être détecté systématiquement dans toutes les circonstances).
- Lorsque des essais sont renouvelés pour examiner la cohérence des résultats ou pour tout autre motif, le processus permettant de synthétiser les résultats doit prévoir l'analyse post-essai correspondante pour garantir la qualité des données et détecter et exclure les perturbations liées aux données (dans la mesure du possible). Si elles sont employées, les méthodes d'analyse post-essai doivent être publiées avec les résultats.
- Sécurité: le récepteur (ou le serveur) employé pour l'essai doit être configuré de manière à n'accepter les demandes d'essai que de la part de la population des utilisateurs autorisés, et à rejeter les autres demandes.
- Capacité: le récepteur (ou le serveur) employé pour l'essai doit être configuré de manière à n'accepter les demandes d'essai que lorsque l'hôte et l'interface disposent de ressources suffisantes, et à rejeter les demandes lorsque cette condition n'est pas satisfaite.
- Communiquer les résultats: le système de mesure doit indiquer la capacité IP maximale, le taux de perte de paquets IP pendant les essais et d'autres mesures éventuellement disponibles (voir le paragraphe A.2.4). Il peut aussi communiquer la capacité UDP en termes de bits de charge utile transmis par le protocole UDP, car c'est cette capacité dont les applications des utilisateurs peuvent se servir une fois que les en-têtes IP et UDP ont été retirés.

A.2.2.1 Algorithme de recherche obligatoire

Le système de mesure répond aux exigences énoncées au paragraphe A.2.2 et offre de plus les fonctionnalités suivantes, qui permettent de prendre en charge l'algorithme de recherche:

- 1) Le responsable des essais doit recommander une taille de paquet maximale pour l'essai et autoriser un certain volume imprévu de données de services pour éviter la fragmentation.
- 2) Il existe un tableau des débits de transmission (IPSBR) indiquant le nombre de paquets émis pendant chaque intervalle et les tailles de paquets. Ce tableau est classé par ordre croissant des taux de charge offerte, les taux minimum et maximum étant inclus.
- 3) Le récepteur de charge offerte doit mesurer les éléments suivants: débit de réception, perte, reclassement, variation du temps de transmission (conformément à la présente Recommandation) et temps de transmission aller-retour [ITU-T Y.1565].
- 4) Le récepteur de charge offerte doit envoyer régulièrement un message d'état à l'expéditeur pour communiquer les résultats des mesures.

- 5) Compte tenu des résultats indiqués dans le message d'état, l'expéditeur doit adapter sa charge offerte conformément au diagramme présenté dans la Figure A.1. Dans ce diagramme, l'expression "un pas" indique un changement de débit effectué en appliquant une nouvelle valeur (dans le rang supérieur ou inférieur au rang en cours d'utilisation dans l'envoi) choisie dans le tableau des taux de charge offerte.



Y.1540(19)_FA.1

Figure A.1 – Diagramme d'adaptation de la charge offerte dans le processus d'un algorithme de recherche

NOTE – Les décisions algorithmiques peuvent être prises par l'un des deux serveurs participant au système de mesure, ce qui rend la mise en œuvre dans l'autre serveur bien moins complexe et plus indépendante de la version de l'algorithme. Cette méthode permet aussi de mettre à jour l'algorithme dans un serveur plus facile d'accès.

Par la suite, de nouveaux algorithmes obligatoires ou facultatifs seront définis dans des annexes distinctes.

A.2.3 Éléments de mesure du taux de perte de paquets IP (IPLR) pendant les essais

Pour une population considérée, le taux de perte de paquets IP (IPLR) pendant les essais est le rapport des résultats totaux des paquets IP perdus aux résultats totaux des paquets IP dont le transfert a réussi pendant chaque essai (ou chaque sous-intervalle dt).

À noter que l'IPLR pendant les essais varie légèrement de la définition de l'IPLR figurant dans la partie principale de la présente Recommandation, car il est impossible d'employer un temps d'attente long (T_{max}) pour distinguer les résultats des paquets IP dont le transfert a réussi des résultats des paquets perdus lors de l'évaluation des résultats de chaque essai (ou sous-intervalle dt) et de transmettre immédiatement les résultats à l'algorithme de recherche. Des délais inhabituellement longs ou des paquets réordonnés seraient pris en compte dans les mesures des essais suivants pour tous les paramètres, y compris la variation du délai de transfert de paquets IP (IPDV).

A.2.4 Paramètres et méthodes connexes

Il est évident que les taux IPLR, les délais IPTD (évalués en termes de temps de transfert aller-retour ou de temps de latence aller-retour conformément au paramètre défini dans la Recommandation [ITU-T Y.1565]) et les variations IPDV sont des paramètres importants qui doivent être communiqués en même temps que la synthèse finale du débit de réception (la capacité mesurée).

D'autres paramètres de mesure doivent aussi être disponibles:

- la durée réelle du processus de recherche (qui devrait être Δt);
- le nombre total de paquets perdus observé pendant le processus de recherche;
- La fourchette et la variation des résultats après plusieurs processus de recherche.

A.3 Paramètres et méthodes de mesure du débit utile associé aux flux (transport avec fourniture fiable)

Le présent paragraphe, qui doit faire l'objet d'un complément d'étude, contient la définition de mesures et de méthodes de mesures du débit utile associé aux flux, compte tenu du paragraphe 6.12 de la présente Recommandation. On trouvera à l'Appendice X de cette Recommandation une explication de la raison pour laquelle le protocole TCP classique associé à un contrôle de flux en boucle fermée ne répond pas aux exigences énoncées. L'Appendice XIII présente une mesure et une méthode possibles qui répondent aux exigences du paragraphe 6.12.

A.3.1 Définition des paramètres

Cette question doit faire l'objet d'un complément d'étude; voir l'Appendice XIII.

A.3.2 Méthode de mesure

Cette question doit faire l'objet d'un complément d'étude.

A.3.3 Paramètres et méthodes connexes

Cette question doit faire l'objet d'un complément d'étude.

A.4 Plan de validation et de comparaison des méthodes de mesure des accès

La Recommandation UIT-T P.800 et d'autres Recommandations de cette série, bien qu'essentiellement consacrées à la téléphonie, contiennent des lignes directrices générales sur la manière d'organiser, d'effectuer et d'évaluer des campagnes de mesure permettant de comparer des modèles au regard de données mesurées dans des conditions réelles. Pour comprendre la portée et les limites des essais, des outils et des résultats destinés à décrire les différents types d'accès à l'Internet, il est utile de disposer d'un processus analogue, qui est décrit ci-dessous.

Il convient de créer un ensemble de conditions de transmission diverses pour effectuer l'essai en laboratoire. On définit dans un premier temps des conditions proches de celles du terrain. Ces conditions doivent être stables et doivent pouvoir être vérifiées au cours des essais par les instruments de mesures du laboratoire. Par la suite, chaque méthode conçue pour décrire les différents types d'accès à l'Internet peut être testée selon un ensemble de conditions diverses. Des erreurs de mesures peuvent être signalées. En se fondant sur les résultats de chaque paramètre et de chaque méthode, il est possible de recenser les zones (ou conditions) opérationnelles dans lesquelles une méthode de mesure donnée est efficace et celles dans lesquelles elle est moins fiable (et de quantifier les sources des erreurs de mesure).

Les conditions mises en place pour mener les essais sont énumérées ci-après.

A.4.1 Points de mesure

Le document [b-IETF RFC 7398] définit un trajet et des points de mesure de référence pour les mesures de performance couramment employées. D'autres projets de mesure analogues peuvent aussi s'appuyer sur les extensions décrites ici pour déterminer l'emplacement des points de mesure. Le document [b-IETF RFC 7398] a pour but de proposer une méthode efficace de description de l'emplacement du ou des points de mesure employés pour effectuer une mesure particulière, notamment en précisant les situations dans lesquelles une mesure comprend des sous-trajets gérés et non gérés (réseau privé).

À noter que le trajet de mesure tel que délimité par les points de mesure définis dans le document [b-IETF RFC 7398] détermine l'applicabilité des paramètres d'abonnement, notamment les débits de données couramment offerts, et indique si les paramètres d'abonnement peuvent faciliter le choix de paramètres comme le débit de données à atteindre pour des mesures fondées sur un modèle, qui est défini dans le document [IETF RFC 8337]. On emploie aussi des paramètres tels que la taille des trames dans les essais UDP au moment de déterminer la couche dans laquelle le trafic d'essai est inséré, afin d'éviter la fragmentation.

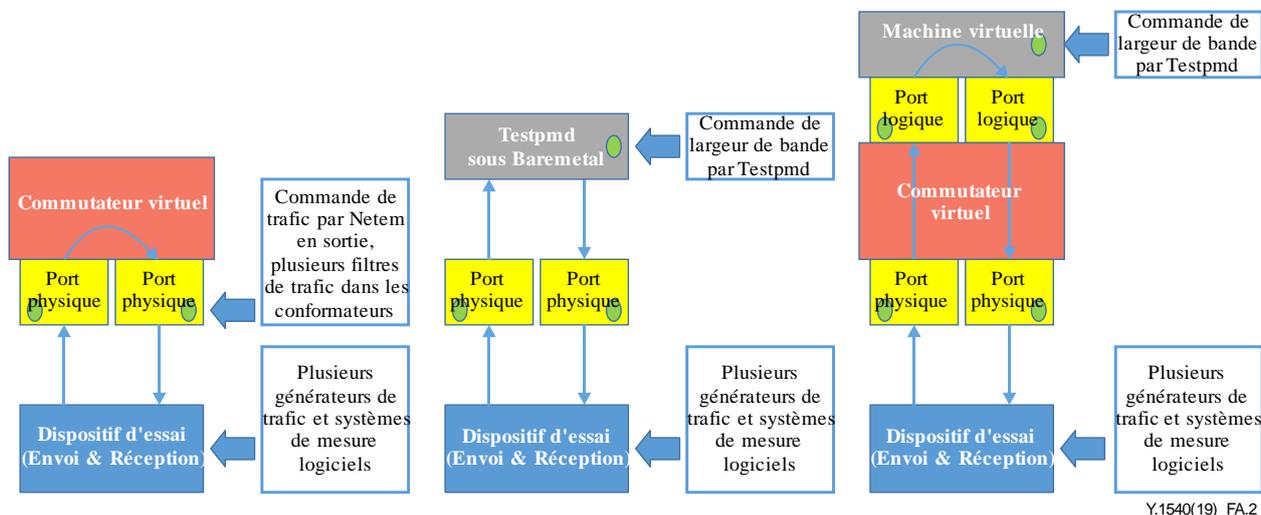
A.4.2 Conditions d'essai

Toutes les configurations et tous les comportements du trafic d'arrière-plan doivent être aussi proches que possible des conditions d'exploitation réelles du réseau. Il est suggéré de définir un essai de base, puis de faire varier les paramètres d'essai. Il s'agit de la phase 1 des essais.

A.4.2.1 Conditions d'essai en laboratoire en phase 1

Il ressort des exigences définies par l'organisme BEREC dans [b-BEREC] que les essais de phase 1 doivent comporter des conformateurs (et des régulateurs jusqu'à 10 Mbit/s, voir [b-Google-Police]). En outre, le responsable des essais doit connaître la couche dans laquelle se trouvent les conformateurs, les régulateurs, les observateurs passifs, les expéditeurs, les récepteurs et les paquets de mesure des résultats finaux. Par ailleurs, il convient de mettre en œuvre et de tester différentes dégradations du réseau, par exemple des retards.

La figure ci-après illustre deux modules différents permettant de piloter le trafic et le débit avec souplesse sur une plate-forme informatique à usage général. Les modules de commande du trafic peuvent être utilisés de trois manières différentes.



Y.1540(19)_FA.2

Figure A.2 – Trois trajets d'essai possibles sur une plate-forme informatique à usage général

Dans la Figure A.2, le dispositif d'essai est connecté à un serveur à usage général par des liaisons physiques à 10 Gbit/s. Ce dispositif est lui-même un serveur à usage général, mais il est entièrement isolé du serveur assurant la commande de trafic, ce qui permet d'attribuer à chaque nœud des ressources dédiées à leur rôle unique dans l'environnement d'essai. On peut installer et tester différentes mises en œuvre des méthodes de mesure possibles grâce au nœud de commande du trafic.

Il existe trois méthodes différentes pour mettre en œuvre la fonction de conformateur du trafic. La première, illustrée à gauche, repose sur un émulateur de réseau doté d'un noyau Linux, appelé "Netem", qui peut simuler un délai et favoriser la commande de trafic une fois que les interfaces NIC et physique pertinentes ont été configurées. Le commutateur virtuel se contente de commuter les trames entre les deux ports. Cette configuration est généralement appelée "phy2phy" (physique à physique).

La deuxième méthode (au centre) repose sur l'hypothèse que l'application "Testpmd", qui fait partie du kit de développement DPDK de la société Intel, sera installée et configurée de manière à acheminer les trames entre les interfaces physiques pertinentes et à commander la largeur de bande passante sur le trajet d'acheminement.

La dernière méthode (à droite) utilise l'application "Testpmd" installée sur une machine virtuelle et un commutateur virtuel configuré pour raccorder les interfaces physiques aux ports pertinents de la machine virtuelle. Là encore, l'application "Testpmd" (ou tout autre module exécuté sur la machine virtuelle) commande la largeur de bande sur le trajet entre les ports logiques.

Ces trois configurations peuvent être mises en œuvre dans un module physique ("pod") de gestion de projets comportant l'outil d'essai VSPERF, qui fonctionne sous l'environnement OPNFV, si un module de ce type a été attribué à des fins d'essai, de développement et d'évaluation au moyen de VSPERF [b-Pod12].

On peut ensuite créer différentes conditions pour chaque essai individuel. À chaque fois, on change une seule propriété par rapport à l'essai de base en conservant toutes les autres propriétés de la configuration.

- Les largeurs de bande du conformateur et du régulateur sont configurées en fonction des débits proposés par le BEREC, jusque dans la gamme des Gbit/s, et doivent être testées.
- Les temps de transmission aller-retour (RTT) sont définis aux valeurs suivantes: 5, 10, 20, 40 ms.
- Le taux de perte de paquets aléatoire est défini aux valeurs suivantes: 0, 10^{-4} , 10^{-5} .
- La tolérance aux rafales du conformateur peut être fixée à 0 ou à toute valeur jusqu'au maximum autorisé par le conformateur (5 kbit/s).
- Les méthodes permettant de limiter le débit sont soit la conformation, soit la régulation (mais pas les deux en même temps).
- La stratégie de gestion du dépassement de la file d'attente est le rejet en fin de file d'attente.
- Les essais doivent être effectués sans trafic d'arrière-plan. Néanmoins, un essai supplémentaire peut être effectué avec du trafic d'arrière-plan (en concurrence). La charge moyenne d'arrière-plan doit être publiée avec les résultats.
- Tout le trafic d'essai et d'arrière-plan doit être généré au mieux.
- L'intervalle de mesure maximum est de 30 secondes par mesure.
- Pour chaque mesure, la tolérance de largeur de bande configurée par rapport à la largeur de bande mesurée pendant un essai doit être dans une fourchette de 5% pour que l'on considère que la largeur de bande a été correctement mesurée par le système de mesure proposé.
- Le logiciel de mesure employé dans l'essai doit être disponible sous une licence libre. Des produits commerciaux peuvent déroger à cette condition jusqu'au début de la normalisation d'une méthode. Les systèmes d'essai doivent être étalonnés, et le Groupe pour la Question 17 doit être informé des limites de tout système soumis à évaluation. Il convient en outre de fournir tous les détails sur l'environnement de développement et le système d'exploitation requis.
- Les résultats doivent être publiés dans un appendice à la présente Recommandation.

- La taille des trames du réseau Ethernet (ETH) correspond à une taille de trames de la couche 2, soit 64 octets, et la taille maximale de l'unité de transfert maximale (MTU) du réseau ETH est de 1512 octets (et de 1516 octets si l'on inclut le contrôle de redondance cyclique (CRC) du réseau ETH).
- Il est conseillé d'effectuer les essais en utilisant la famille d'adresses IPv6 en plus des adresses IPv4.

On peut employer un équipement de test en laboratoire classique pour étalonner des propriétés du réseau [b-TST 009] comme la largeur de bande maximale de la couche IP, le temps de transfert aller-retour minimum et maximum, la taille du tampon, etc. avant chaque mesure pour déterminer les conditions d'essai du réseau. Cette méthode permet d'acquérir les informations de référence nécessaires pour comparer les performances du réseau et effectuer les évaluations connexes.

Le critère de référence du bon fonctionnement du conformateur, compte tenu de la configuration, est la transmission en débit constant (CBR) sous le protocole UDP; ce critère permet en définitive d'évaluer correctement les conditions des voies (conformément au document [b-PAM-12]). Si la capacité UDP diffère de la configuration du conformateur, on peut recourir à un troisième facteur pour déterminer la validité du transfert, qui est la saisie des paquets du flux UDP. La détection et l'analyse des erreurs éventuellement observées sont essentielles à la comparaison.

Les essais préliminaires d'étalonnage en laboratoire et l'évaluation de la méthode de mesure sont à présent achevés. En s'appuyant sur le texte actuel de l'Annexe A de la présente Recommandation et les exigences du BEREC concernant la vérification des outils de mesure, AT&T a testé l'une des trois configurations possibles en utilisant une plate-forme de calcul à usage général qui répond aux prescriptions (phy2phy).

Les principales conclusions de ces essais sont les suivantes:

- Le débit utile était de 213,85 Mbit/s, ce qui était relativement proche de la valeur configurée de 100 Mbit/s x2. L'excédent est peut-être un effet de bord de la taille de rafales autorisée.
- La recherche binaire avec vérification de perte a été configurée de manière à permettre une tolérance relativement importante en Mbit/s pour pouvoir accepter le résultat. Cette tolérance devrait être remise en cause lors des essais sur des débits inférieurs au Gbit/s.

A.4.2.2 Conditions d'essai en phase 2

Pour que ce programme d'essai puisse être mis en œuvre, le présent plan s'appuiera sur le comparatif UDP concernant les réseaux en service (après validation des spécifications des paramètres de service) afin de pouvoir comparer par la suite des spécifications et des méthodes de service telles que iPerf 2, qui utilise le TCP, et des méthodes fondées sur l'UDP. Cette démarche est analogue à celle qui est décrite dans le document [b-PAM-12] et à d'autres références, comme nous le verrons plus loin.

Les essais de configurations d'équipements de réseau en service PEUVENT aussi être menés en laboratoire, lorsque c'est possible et à titre facultatif.

Les essais de la phase 2 doivent être menés selon une méthode proche des travaux publiés par Goga et Teixeira en 2012 [b-PAM-12]. En l'état actuel des connaissances sur les systèmes de mesure les plus couramment employés aujourd'hui, il semble qu'aucun système n'emploie la méthode ayant démontré par le passé qu'elle produisait les estimations de capacité IP les plus précises, à savoir les mesures fondées sur le protocole UDP [b-PAM-12]. Malheureusement, les travaux publiés dans [b-PAM-12] avaient été menés avec des capacités d'accès moyennes inférieures à 50 Mbit/s; à présent (soit plus de cinq ans plus tard), cette fourchette de capacités est dépassée même pour des accès par l'Internet mobile. Les principales conclusions du document [b-PAM-12] étaient les suivantes:

- L'outil iPerf a été employé pour émuler des outils d'inondation des liaisons car il permet de définir le nombre de connexions parallèles et la durée ou la taille du transfert, entre autres paramètres.
- "Comparatif. La première ligne du tableau 1 montre la capacité UDP obtenue lorsqu'on inonde la liaison en UDP avec l'outil iPerf (...) La capacité UDP représente le débit IP maximum qu'il est possible d'atteindre sur chaque ligne."
- Les outils les plus précis pour évaluer la largeur de bande disponible (c'est-à-dire la capacité résiduelle) sont Spruce, Pathload (pour des essais plus volumineux) et des connexions TPC en parallèle. Toutefois, dans certaines zones, les essais avec des connexions TPC parallèles n'ont pas produit de résultat utile en présence de trafic parallèle non identifié.

Les inconvénients généraux des systèmes de mesure employés dans les travaux de 2021 sont examinés dans [b-MortonPQS].

Il convient de mener des essais de phase 2 pour chaque type d'accès de base.

Ces types sont les suivants:

Filaire: accès des consommateurs en DSL, accès par câble en large bande, accès par fibre optique, autres accès.

Hertzien: points d'accès WiFi, UMTS, accès hertzien LTE, autres accès.

Les résultats et les trajets d'essai de la phase 1 constituent le fondement des essais de la phase 2. Celle-ci doit couvrir plusieurs types d'accès à l'Internet, par exemple un accès ayant les propriétés classiques requises pour un marché des télécommunications national. Il en va de même pour tous les autres paramètres: il convient notamment de prendre pour hypothèse un temps de transmission aller-retour courant pour des contenus fréquemment consultés, un trafic d'arrière-plan classique, etc. Les conditions du réseau doivent donc être proches d'un environnement d'abonné réel.

On peut ensuite créer différentes conditions pour chaque essai individuel. À chaque fois, on change une seule propriété par rapport à l'essai de base en conservant toutes les autres propriétés de la configuration.

- On peut ajouter du trafic d'arrière-plan pour tester l'accès (avec ou sans éléments de service différencié, selon les caractéristiques probables du marché considéré).

On peut en outre employer un équipement de test en laboratoire classique pour étudier les propriétés du réseau mesuré.

Les tailles des paquets doivent être indiquées lorsqu'elles sont connues, mais il est possible qu'elles varient, et cette variation peut découler des conditions du réseau lorsqu'une retransmission est nécessaire (surtout en TCP, d'autres outils pouvant employer des tailles fixes ou variables).

Annexe B

Algorithme de recherche supplémentaire pour les paramètres et les méthodes de mesure de la capacité IP

(Cette Annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation.)

B.1 Algorithme de recherche

Le présent système de mesure répond aux exigences énoncées au paragraphe A.2.2 et offre de plus les fonctionnalités suivantes, qui permettent de prendre en charge un algorithme de recherche différent et dont la mise en œuvre est obligatoire; cet algorithme, qui est appelé algorithme de recherche de l'Annexe B, est indépendant du protocole d'essai:

- 1) Le responsable des essais doit recommander une taille de paquet maximale pour l'essai et autoriser un certain volume imprévu de données de service pour éviter la fragmentation.
- 2) Il existe un tableau des débits de transmission indiquant le nombre de paquets émis pendant chaque intervalle de temps (correspondant à des bits par seconde et à une couche définie du protocole) et les tailles de paquets. Ce tableau est classé par ordre croissant des taux de charge offerte, les taux minimum et maximum pris en charge étant inclus.
- 3) Le récepteur de charge offerte doit mesurer les éléments suivants: débit de réception, perte, reclassement, variation du temps de transmission (conformément à la présente Recommandation) et temps de transmission aller-retour [UIT-T Y.1565].
- 4) Le récepteur de charge offerte doit envoyer régulièrement un message d'état à l'expéditeur pour communiquer les résultats des mesures.
- 5) Compte tenu des résultats indiqués dans le message d'état, l'expéditeur doit adapter sa charge offerte conformément au diagramme présenté dans la Figure B.1. Dans ce diagramme, l'expression "un pas" indique un changement de débit effectué en appliquant une nouvelle valeur (dans le rang supérieur ou inférieur au rang en cours d'utilisation pour le débit d'envoi et les tailles de paquet) choisie dans le tableau des taux de charge offerte.

Le diagramme de la Figure B.1 utilise de nombreux noms de variables, et dans certains cas des seuils configurables qui déterminent les décisions prises selon ce diagramme. Il comporte trois trajets principaux: le cas d'un message envoyé en retour indiquant qu'aucune dégradation n'a été mesurée, le cas de dégradations mesurées dans un premier temps, éventuellement en présence d'un certain encombrement, mais avec un report de la modification du débit d'envoi, et le cas où les dégradations mesurées sont confirmées par de nombreux messages de mesure envoyés en retour.

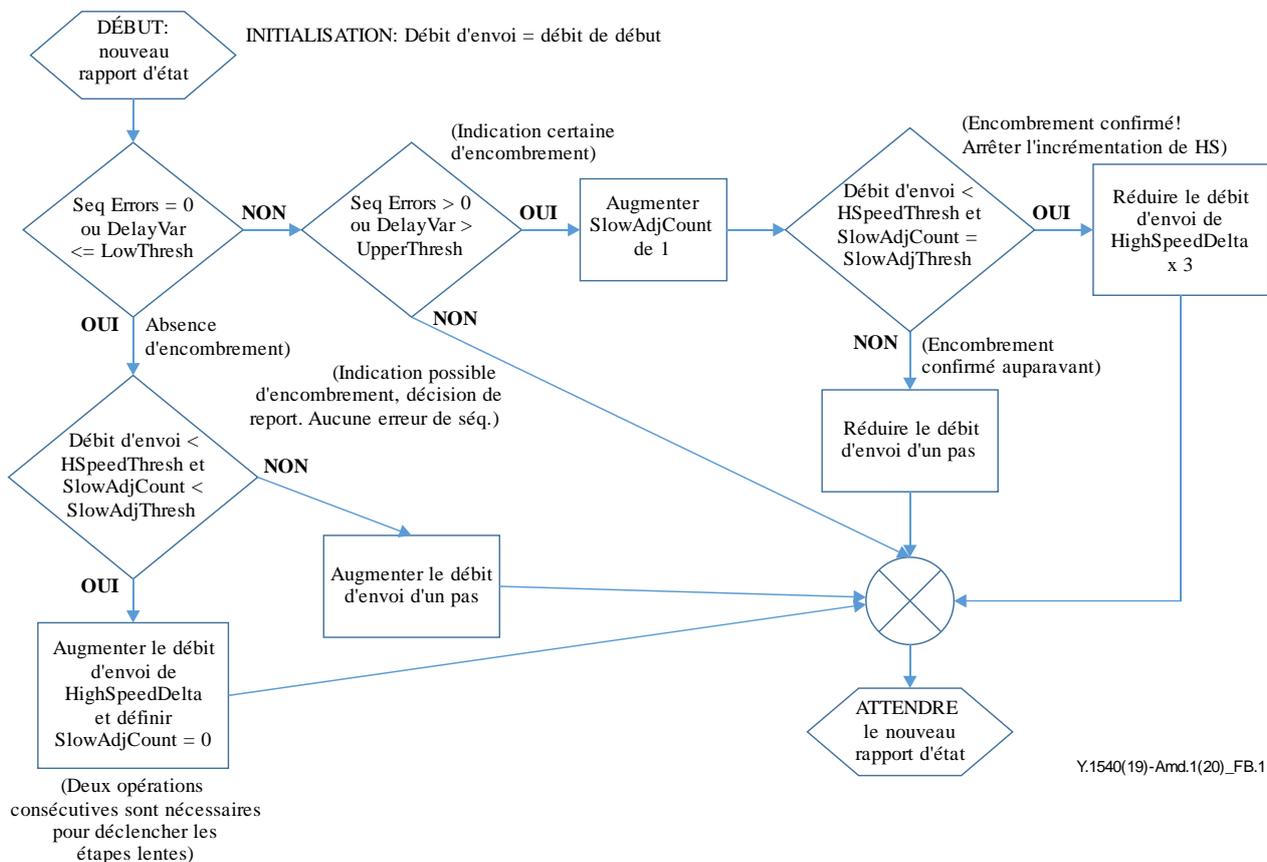


Figure B.1 – Diagramme d'adaptation de la charge offerte dans le processus d'un algorithme de recherche de type B

NOTE – Les décisions algorithmiques peuvent être prises par l'un des deux serveurs participants situés à une extrémité du système de mesure, ce qui rend la mise en œuvre dans l'autre serveur bien moins complexe et plus indépendante de la version de l'algorithme. Cette méthode permet aussi de mettre à jour l'algorithme dans un serveur plus facile d'accès.

Les variables et les seuils indiqués dans la Figure B.1 sont expliqués dans le Tableau B.1.

Tableau B.1 – Variables, descriptions, fourchettes et valeurs par défaut du diagramme

Catégorie/ Nom de la variable	Description	Unité	Fourchette	Valeur par défaut
Débit d'envoi	Le débit d'envoi actuel (équivalent à un rang du tableau), initialisé au débit d'envoi minimum indiqué dans le tableau des débits d'envoi	Kbit/s	$500 \leq \# \leq 10\,000\,000$ (10 Gbit/s)	Voir le débit de début
Débit d'envoi de début	Valeur initiale du débit d'envoi	Kbit/s	N.D.	500 kbit/s
Seq Errors	Décompte de toute mesure de dégradation concernant une perte ou un reclassement (événements dans lesquels le numéro de séquence des paquets reçus n'a pas été incrémenté de 1)	nombre	N.D.	0 (pas d'erreur de séquence)

Tableau B.1 – Variables, descriptions, fourchettes et valeurs par défaut du diagramme

Catégorie/ Nom de la variable	Description	Unité	Fourchette	Valeur par défaut
DelayVar	Fourchette de temps de transmission aller-retour (RTT) (ou variation du délai de transmission de paquets en sens unique au-dessus du temps minimum au-delà duquel les mesures de DelayVar en sens unique sont fiables)	ms	N.D.	N.D.
LowThresh	Seuil de la fourchette de variation du temps de transmission aller-retour (RTT) (la fourchette se compose des valeurs supérieures au RTT minimum)	ms	$5 \leq ms \leq 250$	30 ms par défaut
UpperThresh	Plafond de la fourchette de variation du temps de transmission aller-retour (RTT) (la fourchette se compose des valeurs supérieures au RTT minimum)	ms	$5 \leq ms \leq 250$	90 ms par défaut
HighSpeedDelta	Nombre de rangs à déplacer à chaque ajustement lorsque la charge offerte est augmentée pour la première fois (pour monter rapidement en charge)	Nombre de rangs	≥ 2	10 rangs du tableau (actuellement 10 Mbit/s)
SlowAdjCount	Nombre de rapports d'état consécutifs indiquant une perte et/ou des variations de délai supérieures au plafond (UpperThresh)	Nombre d'occurrences	N.D.	Voir SlowAdjThresh
SlowAdjThresh	Seuil de la variable SlowAdjCount permettant de déduire qu'il y a encombrement. Utiliser des valeurs > 1 pour éviter de mal interpréter un affaiblissement transitoire	Nombre d'occurrences	> 1	2
HSpeedThresh	Seuil de transition entre des tailles de pas des débits d'envoi bas et haut (par exemple 1 Mbit/s et 100 Mbit/s). Ce seuil peut déclencher l'emploi de trames étendues, s'il est autorisé.	Gbit/s		1 Gbit/s

Le Tableau B.2 indique les facteurs d'intrants par défaut destinés à la méthode décrite dans l'Annexe A; ces facteurs peuvent être employés dans la méthode de l'Annexe B.

Tableau B.2 – Variables, fourchettes et valeurs par défaut des mesures

Catégorie/ Nom de la variable	Paramètre	Unité	Fourchette	Valeur par défaut
Capacité max. de la couche IP				
	Nombre de connexions parallèles	#	$1 \leq \# \leq 10$	1 connexion
	Durée du préambule de l'essai	s	$0 \leq s \leq 5$	~2 s
Δt	Durée de l'essai (en liaison descendante ou montante) avec l'algorithme de recherche en cours d'utilisation. Cette valeur indique la durée maximale du processus de recherche.	s	$5 \leq s \leq 60$	10 s
Δt	Durée de l'essai en débit fixe (en liaison descendante ou montante)	s	$5 \leq s \leq 60$	10 s
dt	Durée des intervalles de rapports intermédiaires	s	$0,1 \leq s \leq 10$	1 s
	Valeur de dépassement du délai imparti	s	$5 \leq s \leq 30$	5 s
	Type de paquet d'essai indiquant les longueurs des en-têtes et de la charge utile, les en-têtes et les options présents et toute indication de traitement particulier dans le réseau	N.D.	IPv4 ou IPv6 UDP DSCP	Pas de valeur par défaut UDP 00 = Le mieux possible
	Taille de référence de la charge utile en UDP	Ko	Minimum 1 Ko, Maximum 1472 octets (max. 9000 en cas de trames étendues)	Pas de valeur par défaut, recommander la valeur la plus élevée pour éviter la fragmentation.
	Périodicité des messages d'état envoyés en retour (le récepteur de la charge offerte renvoie des messages à l'expéditeur avec les résultats des éléments mesurés)	s	$0,005 \leq s \leq 0,250$	0,050 s
Mesures d'appui	Il s'agit des éléments mesurés dans le même flux que la capacité IP			
IPLR	Y.1540, RFC 7680			
Tmax	Temps maximum d'attente de l'arrivée des paquets	s	$0,05 \leq s \leq 3$	1 s
RTT échantillonné	Y.1545, RFC 2681: le RTT intègre les messages d'état envoyés en retour par le récepteur			

Tableau B.2 – Variables, fourchettes et valeurs par défaut des mesures

Catégorie/ Nom de la variable	Paramètre	Unité	Fourchette	Valeur par défaut
Tmax	Temps maximum d'attente de l'arrivée des paquets	s	$0,05 \leq s \leq 3$	3 s
	Résolution de l'horodatage	ms	$0,001 \leq ms \leq 1$	Proposition pour l'accès par ligne fixe: 0,001 (compte tenu de la mise en œuvre actuelle)
Mesures d'appui: IPDV	Y.1540, RFC 3393, RFC 5481(PDV)			
Tmax	Temps maximum d'attente de l'arrivée des paquets	s	$0,05 \leq s \leq 3$	1 s
	Résolution de l'horodatage	ms	$0,001 \leq ms \leq 1$	Proposition pour l'accès par ligne fixe: 0,001 (compte tenu de la mise en œuvre actuelle)

Les connexions parallèles ajoutent de la complexité mais permettent d'atteindre des débits plus élevés.

Les avantages possibles sont notamment les suivants:

- On peut employer des systèmes parallèles pour obtenir le débit agrégé nécessaire aux connexions parallèles.
- On peut employer des connexions parallèles pour inonder le trajet testé en utilisant une seule paire de serveurs.
- On peut en déduire des informations supplémentaires à des fins de diagnostic ou pour valider le processus d'essai. Ainsi, la comparaison des débits de données sur chaque connexion peut être utile car des débits très différents peuvent signaler un fonctionnement anormal.

On estime actuellement que chaque connexion devrait disposer de sa propre voie pour le retour d'information, de son propre calcul des mesures et de son diagramme, et qu'il convient d'établir un rapport agrégeant les résultats de l'ensemble des connexions.

Appendice I

Considérations relatives au routage des paquets IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

Le présent Appendice contient des considérations relatives au routage des paquets IP qui sont utiles pour décrire la qualité du service IP.

Le routage des paquets IP est déterminé par les politiques et les configurations de l'opérateur d'un réseau donné, et par les choix des protocoles eux-mêmes. Ainsi, des opérateurs configurent un paramètre définissant le "coût" d'utilisation de chaque liaison de leur réseau, et l'algorithme de routage calcule le trajet le moins coûteux vers une destination donnée en se fondant sur sa connaissance de l'état actuel de la topologie du réseau. Bien entendu, le trajet qu'un paquet emprunte de la source à la destination influence considérablement le délai de transfert de ce paquet (qui se compose du temps de transport et du temps passé en file d'attente), ainsi que l'exposition du paquet à d'autres dégradations comme la perte, des erreurs, la création d'un doublon ou un reclassement.

Les protocoles de routage influencent aussi la qualité de transfert des paquets d'une autre manière, qui tient à leur réponse automatique aux changements de topologie du réseau, par exemple en cas de panne d'une liaison ou d'un routeur, ou lorsque des mesures de maintenance nécessitent l'arrêt d'un élément du réseau. Lorsque la topologie du réseau change en raison d'une panne, un processus de rétablissement répare la connectivité concernée en utilisant le reste de la topologie, dans la mesure du possible. Ce processus, qui est appelé "réacheminement" ou "reconvergence", se compose généralement des étapes suivantes (chaque étape nécessitant du temps pour s'exécuter):

- 1) détection de la panne ou de l'événement;
- 2) calcul du trajet;
- 3) notification;
- 4) transmission de l'actualisation du tableau.

Rappelons que ce sont les choix de configuration des temporisateurs effectués par l'opérateur qui déterminent, dans une large mesure, la durée du processus de réacheminement. Les opérateurs peuvent aussi prévoir des temps d'attente entre les exécutions de l'algorithme de routage; cette méthode permet d'économiser des ressources de traitement, mais dans certains cas elle peut allonger le temps de réaction à une panne.

Les technologies de mise en réseau dans les couches inférieures à la couche IP, comme les anneaux SONET et le réacheminement rapide en MPLS-TE, permettent de rétablir en moins d'une seconde la connexion après une panne de liaison ou de routeur.

Appendice II

Terminologie secondaire concernant la variation du délai de transfert de paquets IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

II.1 Introduction

La présente Recommandation contient une seule définition primaire/normative qui évalue la variation dans un ensemble de délais par rapport à un délai de référence. Le présent appendice fournit deux définitions informatives/secondaires dans les paragraphes qui suivent (l'une est fondée sur la variation du délai de transfert entre les paquets définie par l'IETF, et l'autre est une modification de la variation du délai de transfert de cellules en un point). On trouvera aussi dans le présent appendice des indications sur l'application la plus appropriée de chaque paramètre ainsi que les résultats des observations effectuées avec les différents paramètres. D'autres comparaisons entre différentes formes de variation de délai sont proposées dans le document [IETF RFC 5481].

Il existe deux paramètres supplémentaires pour quantifier la variation du délai de transfert.

- 1) Un paramètre fondé sur le document [b-IETF RFC 3393], qui établit la variation du délai de transfert entre les paquets.
- 2) Un paramètre analogue à la variation du délai de transfert de cellules en un point, décrit dans le document [b-UIT-T I.356], qui permet d'évaluer l'espacement d'arrivée des paquets à une seule interface par rapport à un intervalle d'arrivée idéal.

Il convient de noter que le document [b-UIT-T I.356] comportait deux définitions différentes de la variation du délai de transfert, à savoir la variation entre deux points et la variation en un point.

Les objectifs de performance pour les services en mode IP définis dans le document [UIT-T Y.1541] et applicables à la variation PDV correspondent aux paramètres normatifs de la variation du délai de transfert de paquets entre deux points qui sont présentés dans cette Recommandation.

II.2 Définition de la variation du délai de transfert entre les paquets

Le document [b-IETF RFC 3393] contient la définition suivante de la variation du délai de transfert:

- Il est possible de définir l'IPDV pour des paquets situés à l'intérieur d'un flux de paquets.
- L'IPDV d'une paire de paquets à l'intérieur d'un flux de paquets est définie pour une paire de paquets choisie dans le flux qui va du point de mesure MP1 au point de mesure MP2.
- L'IPDV est la différence entre le délai de transfert dans un sens des paquets sélectionnés.

Une fonction de sélection détermine sans ambiguïté la paire de paquets utilisée dans chaque calcul de la variation du délai de transfert. Seuls les paquets parvenus à destination sont pris en compte dans les calculs de l'IPDV.

La première fonction de sélection définie s'applique aux paquets adjacents présents dans le flux. Pour déterminer l'IPDV du paquet considéré, on soustrait le délai de transfert dans un sens du paquet précédent du délai de transfert dans un sens du paquet considéré. En cas de perte de l'un ou de l'autre des paquets de la paire (ou des deux), l'IPDV n'est pas définie.

Autre exemple important: la fonction de sélection qui produit une évaluation de la variation du délai de transfert correspondant au paramètre de variation entre deux points défini au paragraphe 6.2.4. La paire de paquets comporte toujours le paquet en cours et le paquet ayant le plus petit délai de transfert dans le flux. La variation entre deux points concernant tous les paquets arrivants est calculée en soustrayant le délai de transfert minimal de leurs valeurs de délai de transfert dans un sens (le délai de référence étant le délai de transfert minimal).

II.3 Définition de la variation du délai de transfert de paquets en un point

La comparaison entre la configuration d'arrivée réelle et la configuration d'arrivée prévue (généralement périodique) est un aspect fondamental du paramètre de variation du délai de transfert en un point. Pour certaines variantes de cette définition, il faut tenir compte d'un ajustement par "saut d'horloge" (qui intervient lorsque les cellules ou les paquets arrivent en retard ou après leur instant d'arrivée idéal), comme indiqué dans le document [b-UIT-T I.356]. La définition ci-après ne tient pas compte de ce saut d'horloge car il n'y a pas de biais évident lorsque la configuration de référence est établie de manière arbitraire.

La variation de délai de transfert de paquets en un point (y_k) pour le paquet k à un point de mesure est la différence entre l'instant d'arrivée de référence du paquet (c_k) et l'instant d'arrivée réel (a_k) au point de mesure: $y_k = c_k - a_k$. La configuration de l'instant d'arrivée de référence (c_k) est définie de la manière suivante:

$$c_0 = a_0 = 0,$$

$$c_{k+1} = c_k + T$$

où T est l'espacement idéal entre les paquets.

Des valeurs positives de la variation de délai de transfert de paquets en un point (arrivée "précoce" des paquets) correspondent à un gerbage de paquets; des valeurs négatives (arrivée "tardive" des paquets) correspondent à des zones vides dans le flux de paquets.

II.4 Indications sur l'application des différents paramètres

Ces indications concernent l'aspect pratique des mesures, à savoir:

- Lorsqu'il n'est pas possible d'avoir des horloges synchronisées (ou qu'elles sont temporairement indisponibles) dans les dispositifs de mesure:
 - 1) la variation du délai de transfert de paquets en un point (PDV en un point) peut remplacer éventuellement la fourchette/histogramme de délai de transfert dans un sens, applicable aux mesures effectuées sur des flux de paquets avec des instants d'émission périodiques (une fois que l'instant d'arrivée de référence est fixé);
 - 2) la variation du délai de transfert entre les paquets liée aux mesures de performance en mode IP (IPPM) s'applique à tous les types de flux de trafic;
 - 3) lorsque l'erreur d'horloge est stable, la variation du délai de transfert entre deux points au sens de la Recommandation UIT-T Y.1540 peut être calculée et utilisée.
- Lorsque des horloges synchronisées sont disponibles dans les dispositifs de mesure:
 - 1) la fourchette/l'histogramme du délai de transfert dans un sens selon la Recommandation UIT-T Y.1540 est utile pour effectuer différentes tâches d'évaluation, et en particulier pour évaluer la taille du tampon de suppression de gigue;
 - 2) la variation du délai de transfert entre les paquets IPPM ajoute un paramètre qui se caractérise par sa sensibilité aux variations séquentielles/à court terme et par une certaine immunité aux changements d'itinéraire.

La mesure de la variation entre paquets IPDV, telle que définie par le groupe de travail IPPM de l'IETF, est analogue au calcul de la mesure de la gigue d'arrivée entre les paquets dans les rapports du protocole de commande en temps réel (RTCP). Le protocole RTP décrit le calcul de la gigue d'arrivée entre les paquets (paragraphe 6.4 du document [b-IETF RFC 3550]), accompagné d'un exemple de mise en œuvre qui fait l'objet d'un appendice. Bien qu'il existe des différences quant à la méthode (utilisation de l'ordre d'arrivée dans la gigue d'arrivée entre les paquets du protocole RTCP par opposition à la séquence d'émission avec le paramètre de variation IPDV), la "gigue lissée" calculée à l'aide de singletons de l'IPDV se compare favorablement aux rapports RTCP de la gigue

dans bon nombre de cas (si l'ordre des nombreux paquets était remanié, les résultats ne concorderaient probablement pas). Il serait utile d'avoir un paramètre qui puisse se rapporter aux mesures effectuées aux points d'extrémité de l'utilisateur. Par ailleurs, le critère de variation IPDV avec des paires de paquets adjacents est moins sujet aux changements d'itinéraire pendant un intervalle de mesure lorsque l'effet est observé uniquement dans les paires de mesure qui se trouvent sur le changement d'itinéraire.

L'un des avantages de la variation PDV en un point tient à sa simplicité. La capacité d'évaluer des flux périodiques à l'intérieur d'un seul élément de réseau est en effet extrêmement avantageuse.

Dans toutes les spécifications du paramètre de variation, l'effet de la longueur du paquet est un point qui doit absolument être précisé. Étant donné qu'un temps d'insertion est inclus dans le délai de transfert (du premier au dernier bit), des paquets de taille différente ont une variation de délai de transfert qui leur est propre. Dans les spécifications ainsi que dans les essais du réseau, il convient d'utiliser des paquets de taille unique pour simplifier l'interprétation des résultats (et il faut obligatoirement enregistrer la taille choisie).

Appendice III

Paramètres liés à la capacité de débit et de débit utile

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

Cet Appendice est obsolète dans la version de 2019.

Appendice IV

Essais de l'état de disponibilité du service IP et d'estimation par échantillonnage des paramètres de disponibilité du service IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

Le présent appendice, qui doit faire l'objet d'un complément d'étude, décrit des essais permettant de déterminer si un service IP, une section de base ou un ensemble NSE est dans l'état disponible ou dans l'état indisponible. Dans une future version, le présent appendice indiquera des méthodes permettant d'estimer par échantillonnage les paramètres de disponibilité du service IP.

IV.1 Essai minimal de l'état de disponibilité du service IP (pour les méthodes d'essai et les ensembles d'essais)

Le paragraphe 7.1 prescrit qu'au moins M_{av} paquets doivent être utilisés pour évaluer l'état de disponibilité. Les méthodes d'essai et les ensembles d'essais devront porter sur au moins M_{av} paquets répartis sur un intervalle T_{av} . Pour le trafic produit par l'utilisateur terminal, des intervalles T_{av} successifs peuvent être concaténés jusqu'à ce que l'exigence d'au moins M_{av} événements d'entrée soit satisfaite. Ce point fera l'objet d'un complément d'étude.

Ce qui suit décrit les opérations minimales qui sont nécessaires afin de déterminer l'état de disponibilité au cours d'un seul intervalle T_{av} . Des applications répétées de cet essai sont nécessaires pour déterminer les pourcentages PIA et PIU. Cet essai minimal de disponibilité du service IP est applicable aux méthodes d'essai et aux ensembles d'essais. Certaines exigences pour le trafic produit par les utilisateurs terminaux sont présentées au paragraphe 7.1. Tout autre test de disponibilité du service IP qui (statistiquement) donne des résultats au moins aussi précis que le présent essai est un test acceptable de disponibilité IP. Le présent essai de disponibilité IP est applicable de bout en bout ou dans le cas d'une entrée spécifique pour une section de base ou un ensemble NSE.

- Étape 1: déterminer les serveurs SRC et DST.
- Étape 2: positionner des ensembles d'essais ou activer des logiques d'essai aux points de mesure appropriés.
- Étape 3: à un instant prédéterminé, commencer à envoyer M_{av} paquets IP répartis dans l'intervalle T_{av} .
- Étape 4: si le nombre de résultats de paquet perdu est supérieur à $c_1 \times M_{av}$, le service IP est indisponible dans l'intervalle T_{av} .
- Étape 5: si le service IP (section de base ou ensemble NSE) n'est pas déclaré indisponible selon les résultats de l'étape 4, ce service est disponible dans cet intervalle T_{av} .

Dans cet essai minimal, le niveau de confiance est inconnu et dépend de la taille de l'échantillon, M_{av} ; on emploiera donc de préférence l'essai suivant.

IV.2 Essai de l'état de disponibilité du service IP (au moyen du test progressif du rapport des probabilités)

Le présent paragraphe décrit un essai non paramétrique qui ne repose sur aucune hypothèse concernant la répartition sous-jacente des pertes, mais qui se fonde sur le test progressif du rapport des probabilités (SPRT) pour déterminer si le seuil de perte c_1 a été dépassé d'un niveau d'erreur prédéfini. Le test SPRT permet aussi au responsable des essais de mettre un terme aux essais lorsqu'un taux de perte beaucoup plus faible a été observé sur un nombre de paquets et dans un temps définis. Le résultat peut aussi être indéterminé, ce qui justifie alors de poursuivre les essais. Le test SPRT a été décrit pour la première fois dans [b-Morton]; il s'agissait d'évaluer les taux de perte de paquets afin de définir des taux cibles dans le contexte des essais sur l'Internet.

Pour l'hypothèse nulle H0, nous fixons la probabilité de perte (ou de défauts) égale à $c_1 = p_0 = 0,20$. Nous fixons aussi le taux de perte de l'hypothèse alternative H1 à $p_1 = 0,05$. Enfin, les erreurs de type I et II sont $\alpha = \beta = 0,001$.

Les équations du test SPRT selon [b-Montgomery] et [b-Wald] sont les suivantes:

$$X_A = -h_1 + sn \text{ (ligne d'acceptation)} \quad (1)$$

$$X_R = h_2 + sn \text{ (ligne de rejet)} \quad (2)$$

où n augmente de manière linéaire sur l'ensemble des paquets envoyés, et

$$h_1 = \left(\log \frac{1-\alpha}{\beta} \right) k^{-1} \quad (3)$$

$$h_2 = \left(\log \frac{1-\beta}{\alpha} \right) k^{-1} \quad (4)$$

$$k = \log \frac{p_1(1-p_0)}{p_0(1-p_1)} \quad (5)$$

$$s = \left(\log \frac{(1-p_0)}{(1-p_1)} \right) k^{-1} \quad (6)$$

p_0 et p_1 étant définis dans les hypothèses nulle et alternative ci-dessus.

En utilisant les équations qui précèdent, on calcule le nombre minimum de paquets nécessaires pour accepter H0 lorsque x défauts sont observés, par exemple pour $x=0$ (aucune perte).

$$X_A = 0 = -h_1 + sn \quad (7)$$

$$n = \frac{h_1}{s} \quad (8)$$

Si l'on fixe le niveau de H0 à $c_1 = p_0 = 0,20$, le niveau de H1 à $p_1 = 0,05$ et le taux d'erreur à 0,001, on trouve qu'il faut au moins 41 paquets pour préférer H1 (avec aucune perte), tandis que l'observation de 9 pertes sur ces 41 paquets nous conduirait à préférer H0.

La Figure IV.1 illustre les résultats de l'outil R décrit dans [b-Rdev], qui fait partie du progiciel décrit dans [b-CVST] et a été installé en utilisant les valeurs indiquées ci-dessus.

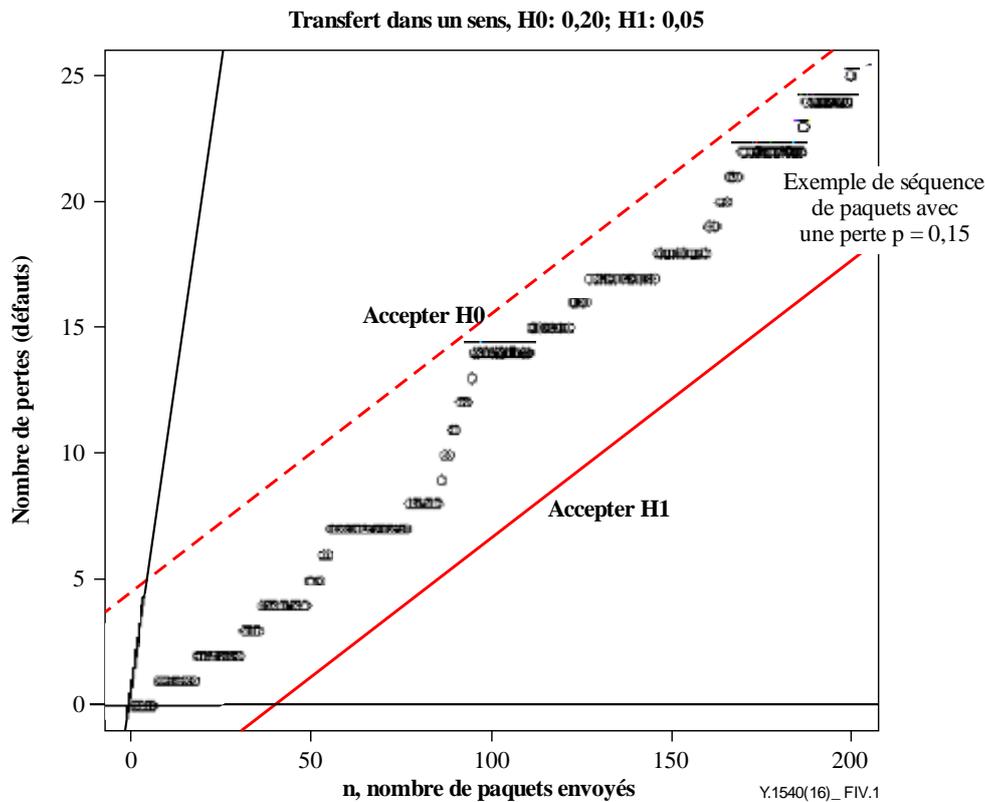


Figure IV.1 – Exemple d'essai progressif du rapport des probabilités

La Figure IV.1 montre qu'il faut au moins 41 paquets pour préférer H1 (avec aucune perte), tandis que l'observation de 9 pertes sur ces 41 paquets nous conduirait à préférer H0.

IV.3 Autre essai de signification statistique pour déterminer la disponibilité du service IP

La Recommandation [UIT-T Y.1540] définit le service IP disponible pendant un intervalle de mesure lorsque le taux de perte de paquets IP (IPLR) de cet intervalle est inférieur à un seuil c_1 . Comme un paquet ne peut être que transmis avec succès ou perdu, la perte de paquet peut se modéliser par une distribution binomiale.

Selon l'hypothèse nulle H_0 , le service IP est disponible pendant l'intervalle de mesure. On présume que H_0 est vraie si la perte moyenne de paquets pendant l'intervalle de mesure est inférieure ou égale à c_1 (selon le test z, le service IP est disponible si le taux de perte de paquets est égal à c_1). Dans l'autre hypothèse H_1 , le service IP est indisponible pendant l'intervalle de mesure (perte de paquets $> c_1$ pendant l'intervalle de mesure). On propose d'appliquer un test z pour déterminer laquelle des deux hypothèses est vraie pendant la mesure. D'après [b-C-298], le taux de confiance est de 95% (c'est-à-dire que le niveau de signification $\alpha=0,05$).

Le test consiste à comparer un échantillon au seuil c_1 . La moyenne du seuil $\mu_0 = c_1$ et sa variance applicable au test est $\sigma = c_1 * (1 - c_1)$.

Le nombre de paquets $n = \text{packets}_{\text{transmitted}} + \text{packets}_{\text{dropped}}$ (paquets transmis + paquets perdus). Le taux moyen de perte de paquets est $x_{\text{mean}} = \text{packets}_{\text{dropped}} / n$.

Le résultat statistique du test pour un texte seuil est $Z_{\text{available}} = \text{sqrt}(n) * (x_{\text{mean}} - \mu_0) / \sigma$.

Si la valeur du test z pour un seuil de confiance de 95% est de $\alpha=0,05$ pour un test dans un seul sens, on accepte H_1 (c'est-à-dire un service IP indisponible pendant les mesures) si $Z_{\text{available}} > 1,645$.

Si la valeur du test z pour un seuil de confiance de 99,9% est de $\alpha=0,05$ pour un test dans un seul sens, on accepte H_1 (c'est-à-dire un service IP indisponible pendant les mesures) si $Z_{\text{available}} > 3,09$.

IV.4 Estimation par échantillonnage de la disponibilité du service IP

Des échantillons aléatoires de l'état de disponibilité, à l'aide de l'essai minimal ci-dessus, peuvent être suffisants pour estimer les pourcentages PIA et PIU. Afin d'estimer la durée d'un intervalle continu dans l'état disponible ou indisponible, l'échantillonnage doit être beaucoup plus fréquent. La Recommandation [b-UIT-T X.137] indique des procédures pour les réseaux UIT-T X.25/UIT-T X.75 qui pourraient également convenir pour les services IP.

Appendice V

Données relatives aux méthodes de mesure de la performance du service IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

Le présent appendice, qui fera l'objet d'un complément d'étude, décrira des questions importantes qu'il faudra examiner au fur et à mesure du développement des méthodes de mesure de la performance du service IP. Il décrira les effets de conditions externes aux sections en essai, y compris les questions relatives au trafic, sur la performance de service mesurée.

Il convient de spécifier et de contrôler les conditions suivantes au cours des mesurages de performance de service IP:

- 1) Sections exactes à mesurer:
 - serveurs SRC et DST pour mesurages de bout en bout;
 - points de mesure délimitant un ensemble NSE à mesurer.

NOTE – Il n'est pas nécessaire d'effectuer une mesure entre toutes les paires de points MP ou toutes les paires de serveurs SRC et DST afin de décrire la qualité de service.

- 2) Durée du mesurage:
 - durée de collecte d'échantillons;
 - instant de mesurage.
- 3) Caractéristiques exactes du trafic:
 - débit auquel le serveur SRC offre le trafic;
 - schéma d'écoulement du trafic source;
 - trafic concurrent aux serveurs SRC et DST;
 - longueur de paquet IP.
- 4) Type de mesure:
 - en service ou hors service;
 - active ou passive.
- 5) Résumés des données mesurées:
 - moyennes, cas le moins favorable, quantiles empiriques;
 - période de contrôle:
 - brève période (par exemple une heure);
 - longue période (par exemple un jour, une semaine, un mois).

Appendice VI

Fondements de la disponibilité du service IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

VI.1 Introduction

Dans le présent appendice sont données les motivations qui ont conduit à la définition actuelle de la fonction de disponibilité du service IP dans le paragraphe 7. L'objectif est de fournir des informations complémentaires sur les fondements et d'aider à apprécier ce sujet complexe et important.

VI.2 Fondements

La disponibilité peut se définir de plusieurs façons, et nombreuses sont les manières de la traduire en une évaluation au moyen d'une gamme de sensibilités et d'échelles de temps. Dans la présente Recommandation, on emploie une définition simple et adaptée (du point de vue de l'opérateur de réseau), qui mentionne les conditions d'évaluation minimales. Afin de comprendre pourquoi la fonction de disponibilité du service IP est suffisante, il convient de comprendre les causes de non-disponibilité.

Dans la Figure VI.1, on a représenté un diagramme de Venn où l'univers est celui de l'ensemble des temps de service. Dans le texte principal de la Recommandation, il est indiqué que les fournisseurs de services IP peuvent définir les intervalles de maintenance pendant lesquels la disponibilité des services n'est pas assurée. Donc, l'univers des temps de service est habituellement différent de l'univers de *l'ensemble* des temps.

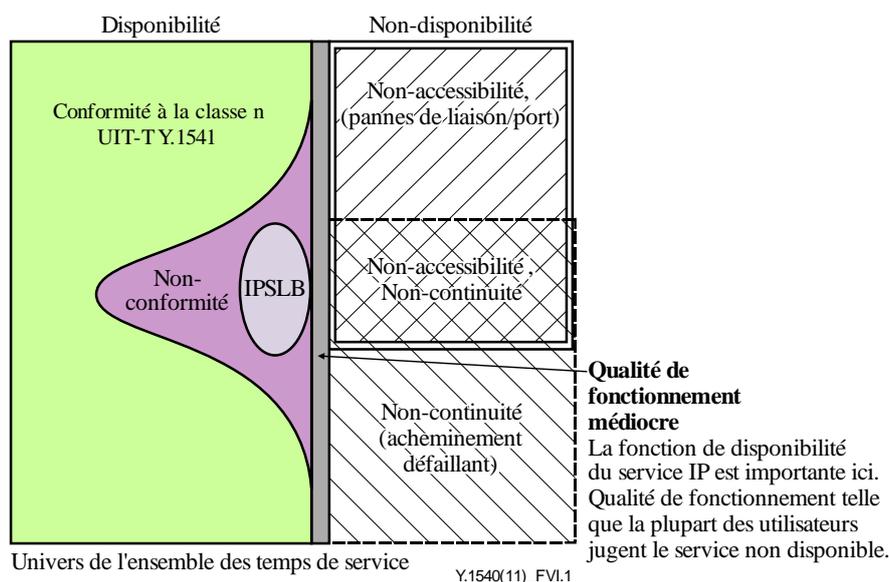


Figure VI.1 – Représentation du temps de service sous la forme d'un diagramme de Venn

On a représenté un temps de service divisé en deux catégories importantes: le temps de disponibilité (à gauche) et celui de la non-disponibilité (à droite). À noter que les tailles relatives ne sont pas à l'échelle car le temps de disponibilité est généralement très supérieur au temps de non-disponibilité.

VI.3 Définitions des plages dans la Figure VI.1

Le temps de **non-disponibilité** comporte les plages suivantes:

- **non-accessibilité**: l'utilisateur du service est incapable de communiquer avec le réseau IP en raison d'un accès défaillant au transport dans le réseau ou aux éléments de réseau. La défaillance de la liaison d'accès elle-même ou de l'interface du routeur sont des motifs courants. Le taux de perte de paquets est généralement de 100%, et il faudra souvent bien plus d'une minute pour remédier à cette défaillance. Les équipes de maintenance devraient presque immédiatement en être alertées par les systèmes de gestion des pannes.
- **non-continuité**: l'utilisateur du service est incapable de communiquer avec la destination de son choix, en raison d'une défaillance dans les informations générales de routage dans le réseau IP. Il peut être en mesure de communiquer avec certaines destinations, mais pas avec celle de son choix. Le taux de perte de paquets est généralement de 100%, et il faudra souvent bien plus d'une minute pour remédier à cette défaillance.
- **non-accessibilité, non-continuité**: l'utilisateur du service est incapable de communiquer, les deux situations susmentionnées existant simultanément.
- **qualité de fonctionnement médiocre**: l'utilisateur du service est incapable de communiquer de manière fiable avec la destination de son choix. Le taux de perte de paquets est de 20% ou plus, et l'utilisateur jugera que le service est indisponible à la communication avec presque toutes les formes d'application de réseau IP. Lorsque l'encombrement est le premier motif d'un tel taux de perte de paquets, des commandes du flux de bout en bout (telles qu'elles sont fournies dans le protocole TCP) devraient être actionnées en vue d'y remédier.

Le temps de **disponibilité** comporte les plages suivantes:

- **conformité à la classe n [UIT-T Y.1541]**: l'utilisateur du service est capable de communiquer avec la destination de son choix et la qualité de transfert des paquets est conforme aux objectifs de la classe convenue. L'évaluation de cet état se fait généralement à intervalles d'une minute. Il convient de noter que toute application utilisateur aura des besoins en capacité propres; il doit aussi être tenu compte du fait d'être en mesure de prendre en charge un contrat de trafic (tel qu'il est défini dans [b-UIT-T Y.1221]).
- **non-conformité**: l'utilisateur du service est capable de communiquer avec la destination de son choix, mais la qualité de transfert des paquets ne répond pas à l'un ou à plusieurs objectifs de la classe convenue. L'évaluation de cet état se fait généralement à des intervalles d'une minute.
- **bloc à perte grave de paquets IP (IPSLB)**: l'utilisateur du service est capable de communiquer avec la destination de son choix, mais la qualité de transfert des paquets ne répond pas à l'un ou à plusieurs objectifs de la classe convenue. En particulier, le taux de perte est suffisant pour déterminer qu'une perte IPSLB s'est produite (provisoirement définie comme étant supérieure à une perte de 20% pendant un intervalle de 10 secondes).

VI.4 Résumé

Les observations montrent que les critères pour la fonction de disponibilité du service IP ne sont importants que dans la plage où la qualité de fonctionnement est médiocre, et que le temps de non-disponibilité dans cette plage est court par rapport à ceux des autres motifs de non-disponibilité. L'évaluation de l'état sur la base de la perte uniquement et les critères provisoirement adoptés pour cette évaluation (une minute, 20% de perte) sont donc jugés suffisants.

Appendice VII

Paramètres de qualité de fonctionnement en mode paquet pour l'évaluation et l'optimisation des techniques de réparation de flux

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

VII.1 Introduction

Les paramètres de qualité de fonctionnement de la couche IP ont de nombreuses applications, notamment la surveillance de réseaux et la détection de problèmes. Ils servent aussi de fondement aux accords de niveau de service. Les deux applications précitées utilisent le transfert de paquets pour décrire le réseau ayant pris en charge le transport UNI-UNI.

Les paramètres de qualité de fonctionnement de la couche IP peuvent être aussi vus sous une autre perspective: ils permettent de décrire des réseaux selon des critères qui peuvent être utiles aux concepteurs d'applications. Si beaucoup de paramètres employés pour surveiller les réseaux sont utiles à ces concepteurs, il existe probablement des paramètres uniques pour chaque cas d'utilisation. La Figure VII.1 illustre ces deux perspectives différentes ou les cas d'utilisation des paramètres en question.

La Recommandation UIT-T Y.1540 définit des paramètres de qualité de fonctionnement et de disponibilité pour les réseaux fondés sur le protocole IP. Elle spécifie des résultats de transfert de paquets primaires et secondaires ainsi qu'un éventail de paramètres de qualité de fonctionnement en mode paquet fondés sur ces résultats, notamment pour la fonction de disponibilité du service IP.

La présente version de la Recommandation UIT-T Y.1540 repose sur les définitions et les concepts fondamentaux permettant de normaliser un nouveau jeu de paramètres normatifs dans le domaine de la réparation de flux. Ces nouveaux paramètres visent à fournir des informations pertinentes pour la conception et la configuration de techniques propres à la couche supérieure (couche application) pour compenser une perte de paquets due à différents facteurs (notamment des erreurs et la variation du temps de transfert). Il convient donc de simplifier la conception et/ou l'optimisation ainsi que l'évaluation de la qualité de fonctionnement des techniques de réparation des flux d'applications pour que ces nouveaux éléments de mesure aident réellement à évaluer la qualité de fonctionnement en mode paquet.

Le présent Appendice commence par un bref tour d'horizon des techniques de réparation des flux de la couche application. Il présente ensuite un modèle très simple qui devrait être applicable à de très nombreuses techniques de réparation différentes.

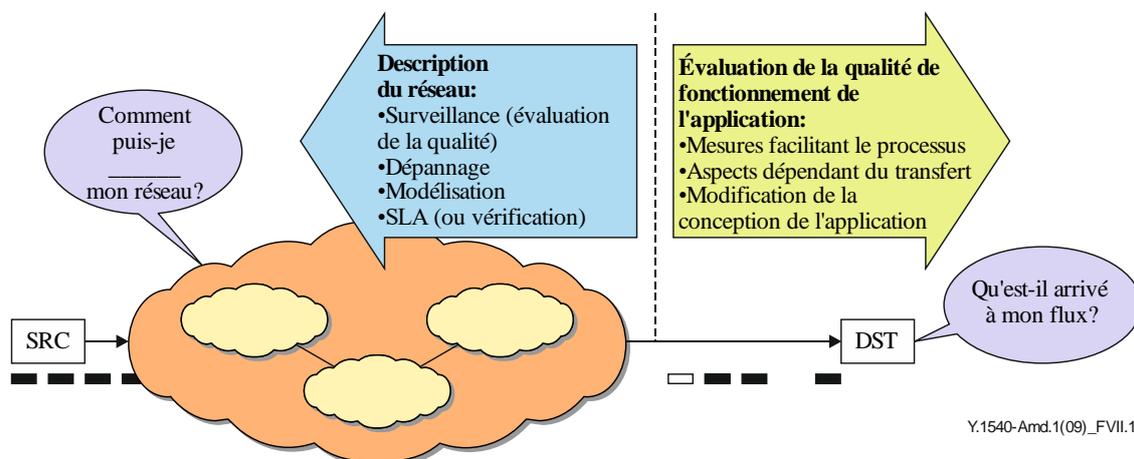


Figure VII.1 – Deux cas d'utilisation différents des paramètres de qualité de fonctionnement des réseaux IP

La procédure habituelle consiste à présenter de nouveaux éléments de mesure dans des appendices fournis à titre d'information afin que les utilisateurs potentiels puissent les évaluer avant de les intégrer en tant que paramètres normatifs dans le texte principal de la Recommandation. Les nouveaux éléments de mesure présentés ici ont suivi la méthode prévoyant une étape d'information avant l'intégration dans la Recommandation UIT-T Y.1540. Dans ses études, l'UIT-T a pris en compte de nombreuses contributions décrivant en détail des travaux sur les paramètres de qualité de fonctionnement en matière de réparation de flux, et elle s'est appuyée sur ces travaux pour recommander que ces paramètres deviennent normatifs.

VII.2 Brève description des techniques de réparation des flux de la couche application

Il existe trois grandes catégories de techniques permettant de compenser les dégradations du transport de paquets dans la couche application. Nous nous concentrerons ici sur les applications continues fonctionnant en temps réel ou quasi-réel (audio, vidéo) qui ne sont pas élastiques, c'est-à-dire que les informations doivent être fournies selon une programmation temporelle prédéterminée. Nous ne prenons pas en compte les applications de transfert de données élastiques généralement prises en charge par le TCP et ses services fiables de transfert de flux d'octets.

Correction d'erreurs directe (FEC): Technique selon laquelle des flux de paquets sont organisés en blocs avant le transfert. Des calculs sont effectués pour chaque bloc et des paquets de données de service sont ajoutés au flux pour permettre au récepteur de reproduire une partie des paquets du bloc en cas de perte, de réception retardée ou d'altération pendant le transport. En général, les données de service représentent 5% à 20% du bloc d'informations. Dans un système *idéal* de FEC, le nombre de paquets perdus pouvant être corrigés est *égal* au nombre de paquets de données de service. Les principaux aspects de ce système sont les suivants:

- la taille du bloc d'informations en termes de paquets et de temps;
- la proportion de paquets de données de service par rapport au bloc d'informations, qui représente approximativement la capacité de correction du système.

Demande de répétition automatique (ARQ): Technique selon laquelle une voie de communication inverse est disponible lorsque le récepteur ayant détecté la perte, le retard ou l'altération de paquets particuliers peut demander une retransmission (cette technique est appelée ARQ sélective). Les paquets perdus sont renvoyés à temps pour qu'ils puissent reprendre leur place au moment où l'information est transmise aux couches supérieures pour être décodée et lue. Le protocole TCP a parfois été modifié pour acheminer des flux non élastiques au moyen de l'ARQ. Un temps d'attente permet de déterminer si les paquets sont simplement retardés ou perdus; cette méthode est analogue à celle du bloc d'informations employée dans le système FEC. Une limite peut aussi être fixée au nombre de paquets retransmis pouvant accompagner le flux primaire dans tout intervalle de temps, ce qui est analogue à la méthode des données de service du système FEC. La technique ARQ permet de retransmettre un certain nombre de paquets perdus dans un bloc, ce nombre étant égal à la limite fixée par les données de service de la retransmission. Il convient de noter que les paquets retransmis vont représenter les données de service d'un bloc suivant de paquets d'information; toutefois, le concept reste applicable.

Les techniques ARQ et FEC peuvent donc toutes deux être décrites au moyen des mêmes variables de base, à savoir la taille du bloc d'informations et la taille réparable maximale.

Masquage des erreurs dans la couche application: Technique selon laquelle des décodeurs tentent de compenser des informations perdues ou altérées au moyen de différentes techniques propres aux applications, certaines de ces techniques ayant été normalisées. La possibilité d'appliquer le modèle simple (présenté ci-après) à cette catégorie de techniques doit faire l'objet d'un complément d'étude.

VII.3 Modèle simple de techniques permettant de réparer des flux de la couche application

Chaque flux de paquets de la couche application est modélisé selon deux catégories de paquets contenus:

- 1) des intervalles de temps T_I ou des blocs b de paquets d'informations;
- 2) des paquets de données de service ou des paquets ayant la taille réparable maximale x , associés au bloc d'informations.

La difficulté, pour le concepteur de la technique de réparation, consiste à choisir la taille du bloc d'informations en combinaison avec le volume (maximum) de paquets de données de service qui suffiront pour compenser une forte proportion de dégradations dans un réseau par paquets (perte, retard excessif et altération), tout en restant dans les limites générales de la capacité de transfert de paquets du système et en assurant une qualité suffisante du flux d'application.

Les nouveaux paramètres de qualité de fonctionnement (décrits au paragraphe 6.10) devraient faciliter cette prise de décision.

VII.4 Exemple de paramètres de qualité de fonctionnement permettant de décrire des variables de réparation de flux

La Figure VII.2 ci-après présente un exemple de calcul de paramètres intervenant dans la réparation de flux, dans lequel $b = 9$ paquets et $x = 3$ paquets.

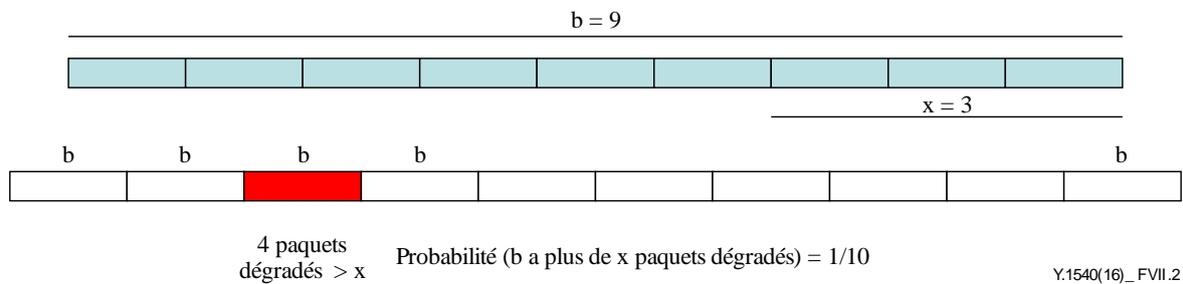


Figure VII.2 – Illustration d'un paramètre de qualité de fonctionnement intervenant dans la réparation de flux

VII.5 Analyse des mesures et des emplois des paramètres

Lorsqu'on tente d'évaluer la qualité de fonctionnement d'un système de réparation alors que l'alignement de blocs est inconnu, les intervalles de temps T_i ou les blocs b peuvent se chevaucher pour permettre d'évaluer différents intervalles par rapport à des alignements de dégradations (analyse d'intervalles glissants). En effet, le fait d'employer un seul intervalle fixe et sans chevauchement pour évaluer et analyser la qualité de fonctionnement pose un problème, car la qualité de l'ensemble du bloc d'informations réel et des données de service peut être pire en raison de la différence d'alignement.

Il existe deux manières de décrire un flux de paquets pour déterminer la combinaison optimale des variables de réparation du flux:

- 1) employer plusieurs intervalles de paquets définis arbitrairement (en termes de temps ou de nombre de paquets), comme nous l'avons montré ci-dessus;
- 2) compter les intervalles consécutifs entre les transferts de paquets dégradés et de paquets non dégradés.

La méthode du comptage des intervalles consécutifs semble présenter une souplesse dont ne dispose pas l'évaluation fondée sur des intervalles fixes; elle permet de déterminer la taille réelle des intervalles dégradés et non dégradés dans un flux et n'est pas concernée par le problème de l'alignement d'intervalles. Cependant, les paramètres de synthèse décrivant les longueurs des intervalles dégradés et non dégradés sont indépendants de la séquence réelle dans laquelle ils sont apparus. Cette séquence de changements entre des intervalles dégradés et non dégradés peut être importante. En outre, pour pouvoir employer la méthode du comptage des intervalles consécutifs, il faut pouvoir déterminer d'une manière ou d'une autre si le seuil x a été franchi, car cet élément est essentiel pour définir un résultat dégradé. S'il faut évaluer plus d'une valeur de x , il peut être nécessaire de faire plusieurs passages dans les données stockées.

Quelle que soit la méthode choisie, les résultats peuvent être exprimés en termes de probabilité ou de répartitions cumulatives au moyen des variables dépendantes et indépendantes, comme le montre l'exemple ci-dessous (Figure VII.3):

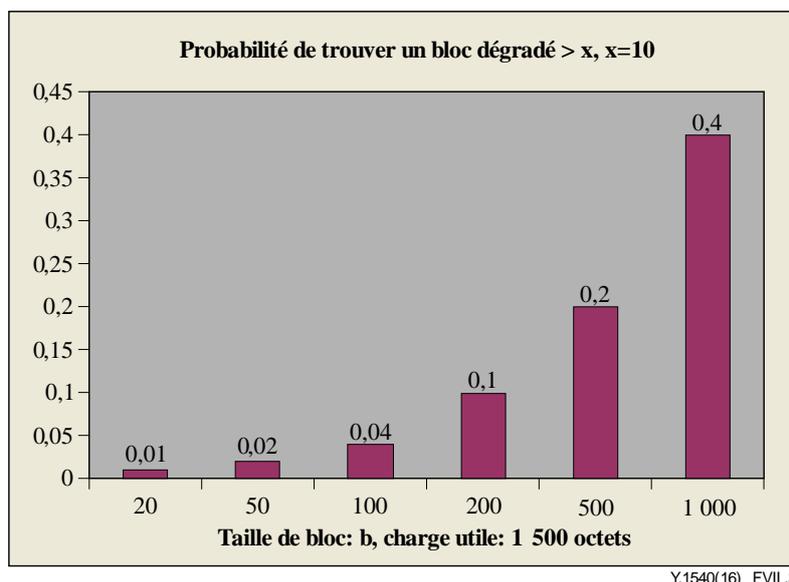


Figure VII.3 – Diagramme illustrant un exemple de résultats concernant des paramètres de réparation pour une fourchette de tailles de bloc, x et la taille des paquets étant fixes

VII.6 Éléments supplémentaires

Si la description d'un réseau au moyen des paramètres définis ci-dessus peut être utile, il faut connaître les détails du système de réparation de l'application pour commencer à prévoir la qualité offerte aux utilisateurs. Les techniques FEC et ARQ produisent des structures de perte de paquets différentes lorsqu'elles fonctionnent au-delà de leur capacité à corriger une perte complète. Les tailles de bloc généralement liées à chaque technique sont également différentes, la technique ARQ employant souvent des tailles de bloc plus grandes dans ses descriptions.

Les systèmes FEC organisent les paquets du bloc d'informations et des données de service de différentes manières (parfois appelées forme unidimensionnelle ou bidimensionnelle), les systèmes les moins sophistiqués ayant une plus grande sensibilité entre la structure exacte des pertes et leur capacité à corriger les pertes. Le concepteur doit connaître et prendre en compte la marge de qualité de fonctionnement entre des systèmes FEC simples et le système fonctionnant de manière idéale prévu par les paramètres précités.

Certaines applications peuvent associer dans une chaîne les différentes techniques présentées ci-dessus. Ainsi, un système peut utiliser la technique FEC ou ARQ en combinaison avec le masquage d'erreurs dans la couche application. Ou encore, une technique FEC peut être employée sur une partie du trajet, puis la technique ARQ ou une autre technique FEC peut être utilisée sur une autre partie du trajet, avant d'employer le masquage d'erreurs dans la couche application.

Enfin, les paramètres de qualité de fonctionnement à court terme définis ci-dessus peuvent être utiles en matière de dépannage car ils contribuent à détecter la signature des problèmes d'un réseau; toutefois, cette question doit faire l'objet d'un complément d'études.

Appendice VIII

Cadre applicable à la capacité de couche IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

VIII.1 Introduction

On trouvera dans le présent Appendice de plus amples informations sur les éléments de mesure de capacité définis au paragraphe 6.11.

Il est important, pour les opérateurs de réseau et les utilisateurs d'application, de savoir en temps réel quelle capacité de la couche IP est disponible dans l'ensemble d'un réseau IP (encombré ou non). Ce paramètre peut en effet servir à optimiser, surveiller et dépanner le réseau, à choisir un serveur ou une passerelle, à équilibrer les charges, à contrôler les admissions et l'encombrement ou à vérifier l'accord de niveau de service concernant un service garanti ou de niveau professionnel proposé par un fournisseur de réseau.

Les paramètres et les méthodes de mesure définis dans l'Annexe A, qui a un caractère normatif, remplacent la liste des projets universitaires et les outils indiqués à titre d'exemple dans le présent Appendice et répondent à plusieurs questions exposées plus loin, qui doivent faire l'objet d'un complément d'études.

VIII.2 Terminologie et rapport avec le document IETF RFC 5136

Les termes "capacité disponible" et "largeur de bande disponible" sont employés indifféremment dans les publications. Le document [IETF RFC 5136] contient une analyse de la terminologie qui permet surtout de déterminer s'il convient d'utiliser les termes capacité ou largeur de bande pour décrire les caractéristiques d'un système IP. Ses auteurs proposent d'employer le terme capacité, et dans un souci d'harmonisation avec l'IETF, ce terme est également employé dans la Recommandation UIT-T Y.1540.

Le document [IETF RFC 5136] définit des paramètres de capacité analogues à ceux qui sont définis au paragraphe 6.11. Il existe cependant une différence majeure entre la définition de l'UIT-T et celle de l'IETF: en effet, la Recommandation UIT-T Y.1540 tient compte du fait que les serveurs de réseau peuvent avoir une incidence sur les valeurs des paramètres concernant la capacité de la couche IP. Cet aspect n'est pas pris en compte dans le document [IETF RFC 5136], mais l'IETF l'a déjà examiné. Les paramètres de la Recommandation UIT-T Y.1540 sont définis au regard de sections de base qui prennent en compte de manière inhérente la capacité des liaisons et celle des serveurs dans chaque section.

Le Tableau VIII.1 met en correspondance des paramètres composant les définitions du paragraphe 6.11 et les définitions du document [IETF RFC 5136].

Tableau VIII.1 – Mise en correspondance des paramètres entre la Recommandation UIT-T Y.1540 et le document IETF RFC 5136

UIT-T Y.1540, § 6.11	IETF RFC 5136
Bits transférés dans la couche IP	Bits de la couche IP
Capacité des sections de la couche IP	Capacité des liaisons de type P de la couche IP
Capacité utilisée des sections de la couche IP	Usage des liaisons de type P de la couche IP
Utilisation des sections de la couche IP	Utilisation des liaisons de type P de la couche IP
Capacité disponible des sections de la couche IP	Capacité disponible des liaisons de type P de la couche IP

**Tableau VIII.1 – Mise en correspondance des paramètres entre
la Recommandation UIT-T Y.1540 et le document IETF RFC 5136**

UIT-T Y.1540, § 6.11	IETF RFC 5136
Capacité des ensembles NSE de la couche IP	Capacité des trajets de type P de la couche IP
Capacité disponible des ensembles NSE de la couche IP	Capacité disponible des trajets de type P de la couche IP
Capacité de la section restreinte de la couche IP	Non défini

VIII.3 Éléments devant faire l'objet d'un complément d'étude

Les définitions de paramètres de capacité figurant dans la présente Recommandation ne traitent pas de manière explicite des trajets multipoint; toutefois, cette question a été intégrée aux éléments devant faire l'objet d'un complément d'étude.

Il conviendra par ailleurs de recenser et d'examiner les méthodes de mesure répondant aux exigences des opérateurs en termes de précision des mesures, de rapidité et de données de service.

Il faudra aussi déterminer s'il existe un moyen de mettre en place un système permettant de détecter la section restreinte de la couche IP.

Pour les futures méthodes de mesure, étant donné que les fonctions de régulation provoquent des pertes de paquets, cette forme de limitation peut nécessiter une méthode d'évaluation différente des méthodes fondées sur la dispersion des paquets.

Appendice IX

Explication de l'inadéquation des mesures utilisant le protocole TCP pour respecter les exigences normatives

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

IX.1 Introduction

Les lecteurs de la présente Recommandation souhaiteront peut-être comprendre les conséquences des exigences normatives du paragraphe 6.12 lorsqu'ils examineront des méthodes de mesures, et en particulier celles qui reposent sur des mises en œuvre existantes du protocole TCP. Si les mesures utilisant le TCP sont jugées utiles pour des études informatives sur l'expérience des utilisateurs, elles n'offrent pas la base nécessaire pour normaliser des éléments de mesure, des méthodes de mesure ou des objectifs quantifiés. Le présent Appendice contient une comparaison du protocole TCP et des exigences du paragraphe 6.12 qui permet d'éclaircir la situation à l'égard de cette méthode de mesure.

IX.2 Comparaison avec des exigences normatives

Les exigences énoncées au paragraphe 6.12 sont classées en deux listes numérotées. La première concerne l'ensemble des paramètres, et la seconde concerne les paramètres permettant d'évaluer la capacité de maintenir un débit de transfert de paquets IP donné.

Pour la première liste d'exigences (ensemble des paramètres):

- 1) S'agissant de l'exigence de comptabilité des paquets acheminés dans le réseau et du succès de leur transfert: certaines versions du TCP permettent de décompter le nombre de segments retransmis pendant une connexion (au moyen d'une interface de gestion), mais les retransmissions reposent sur la temporisation avant retransmission (RTO) adaptative, et non sur le fait que les paquets ont réellement été perdus ou ont obtenu un accusé de réception après l'expiration de la temporisation, ou sur le fait qu'un accusé de réception (ACK) a été perdu après la réussite d'un acheminement. Les récepteurs TCP ne permettent pas de déterminer si des paquets originaux ou retransmis (ou les deux) sont correctement arrivés. En outre, les différents algorithmes TCP de contrôle des encombrements emploient des méthodes différentes pour équilibrer les autres flux et le débit utile, ce qui provoque la perte d'un grand nombre de paquets lorsqu'on emploie des algorithmes agressifs, ou une baisse inutile des débits d'envoi lorsque les pertes de paquets sont interprétées par erreur comme un signal d'encombrement (à noter que la cartographie fixe des pertes de paquets est interprétée comme un encombrement dans un contrôle de flux TCP).
- 2) S'agissant de l'exigence de possibilité de mesurer des trajets partiels: les systèmes TCP de contrôle des encombrements sont très sensibles au temps de transmission aller-retour (RTT) sur des trajets non linéaires et parfois inattendus. Dès lors, l'application à un trajet partiel (EL ou NS) d'un système de mesure utilisant le TCP ne permet généralement pas de prévoir la qualité de fonctionnement sur un trajet entier, ce qui s'explique essentiellement par le fait que le TCP dépend du temps RTT.

Pour la liste d'exigences concernant l'évaluation du débit soutenu de transfert de paquets:

- 1) S'agissant de l'exigence de description de la structure de trafic offerte au réseau: les phases visant à éviter le démarrage lent et l'encombrement du TCP déterminent la structure d'envoi, et ces structures varient considérablement selon les conditions sur le trajet, notamment la présence de trafic transversal et les caractéristiques des encombrements éventuellement rencontrés. Il est donc difficile, voire impossible de fixer des contraintes à la structure ou de prévoir celle-ci pendant le fonctionnement du contrôle de flux du TCP.

- 2) S'agissant de l'exigence de limitation du débit de trafic à un niveau inférieur à la capacité des liaisons de connexion: le contrôle de flux du TCP continue à tester la capacité disponible, étant entendu que les conditions peuvent changer. Il n'est pas pratique de limiter l'émetteur TCP à une capacité précise au moyen des paramètres disponibles, notamment en raison de la variation du temps RTT pendant la durée de vie d'une connexion TCP. En d'autres termes, un système TCP peut toujours envoyer du trafic à un débit supérieur à la capacité des liaisons de connexion.

Toutes les difficultés provoquées par le contrôle de flux TCP sont encore aggravées lorsqu'on utilise plusieurs connexions TCP simultanément et que chaque connexion est évaluée de manière indépendante sur le même trajet.

En conclusion, le protocole de transport est déterminé et mis en œuvre dans des serveurs utilisateurs en-dehors du domaine contrôlé par les fournisseurs de service de transfert de paquets IP. Les méthodes classiques d'évaluation de la qualité de fonctionnement des fournisseurs de services doivent éviter de s'appuyer sur des couches choisies par d'autres acteurs et doivent répondre aux exigences normatives énoncées au paragraphe 6.12.

Appendice X

Résumé des résultats obtenus en laboratoire (phase 1) et sur le terrain (phase 2): plan d'évaluation de l'Annexe A

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

X.1 Introduction

Lors de leur réunion intérimaire d'avril 2018 et des réunions ad hoc tenues pendant la séance plénière de la CE 12 qui a suivi en mai 2018, les personnes chargées de la Question 17/12 sont convenues d'établir un plan visant à définir des éléments de mesure (c'est-à-dire des paramètres) et des méthodes de mesure en vue d'évaluer la capacité d'un système IP (ainsi que le temps de latence et la perte de paquets et d'autres éléments déterminants de la qualité de fonctionnement). Les travaux ont commencé par l'élaboration d'un plan d'évaluation en laboratoire de certains éléments et méthodes de mesure. Une nouvelle Annexe A documente ce plan pour décrire et comparer les différents éléments, méthodes, modèles et outils de mesure des accès dans un environnement de laboratoire stable et reproductible. Ces travaux étaient orientés par les paramètres actuels décrits au paragraphe 6.11 et par les exigences définies au paragraphe 6.12.

Au fil de la progression des travaux, il est devenu évident qu'il serait nécessaire de déployer en parallèle des efforts pour harmoniser les normes régissant la qualité de fonctionnement des systèmes IP entre les différents organismes de normalisation si l'on voulait que le secteur privé les adopte rapidement à grande échelle. Ces efforts devaient notamment consister à proposer de nouveaux travaux au sein du comité technique de l'ETSI chargé de la qualité de transmission de la voix et du multimédia (TC ETSI STQ), et à appeler à établir une collaboration avec le groupe de travail de l'IETF sur les mesures de la qualité de fonctionnement des systèmes IP (avec deux volontaires). D'autres organismes de normalisation (CE 11 de l'UIT-T, comité technique INT de l'ETSI et Forum BBF) ont reçu plusieurs notes de liaison décrivant l'état d'avancement de ces travaux.

Les réunions tenues à l'automne 2018 ont permis de décider de diviser le plan d'évaluation en deux phases et de recueillir les premiers résultats des essais de la phase 1. Le plan d'essai de la phase 1 reposait sur l'évaluation effectuée par le BEREC des systèmes de mesure des accès à l'Internet, qui est reprise dans le document [b-BEREC]. L'exigence 127 énoncée dans ce document prévoit un contrôle obligatoire de la précision du débit au moyen d'un "logiciel ou matériel de conformation du trafic" à différents débits jusqu'à 500 Mbit/s. Ce document ne fournit pas d'autres détails et omet de préciser un facteur essentiel, à savoir le temps de latence. La nouvelle Annexe A règle ce problème et comble d'autres omissions du plan du BEREC. Les résultats de la phase 2 seront évalués après un examen des conclusions de la phase 1 relatives aux réseaux d'accès.

Les contributions aux travaux sur la Question 17/12 comportaient en outre deux enquêtes menées dans le cadre d'une recherche universitaire sur les mesures de la qualité de fonctionnement des accès à l'Internet. L'étude la plus récente est disponible, ainsi que cinq conclusions de l'atelier organisé par la CE 12 en novembre 2018; par ailleurs, plusieurs informations essentielles sont résumées à la fin du présent Appendice, la plus pertinente étant que les essais fondés sur le protocole UDP servent de référentiel en matière de capacité.

Le présent Appendice résume les essais effectués et les résultats obtenus jusqu'en janvier 2019 au titre de la contribution C275 de la CE 12 et des documents temporaires TD627 et TD701 R2. Une contribution connexe reprend le suivi des débats menés et des questions étudiées lors de la réunion intérimaire (réunion en ligne de janvier 2019) des personnes chargées de la Question 17; elle présente de nouveaux résultats d'essais en laboratoire concernant plusieurs éléments, outils et méthodes de mesure.

X.2 Montage des essais en laboratoire de la phase 1

Le présent paragraphe décrit les deux méthodes principales permettant de créer un environnement d'essai contrôlé et isolé, celui-ci constituant une condition fondamentale pour pouvoir effectuer des comparaisons reproductibles entre des méthodes d'essai.

La figure ci-dessous illustre deux dispositifs différents qui permettent d'assurer un contrôle souple du trafic et du débit sur une plate-forme informatique à usage général. Ces dispositifs peuvent être mis en œuvre de trois manières différentes.

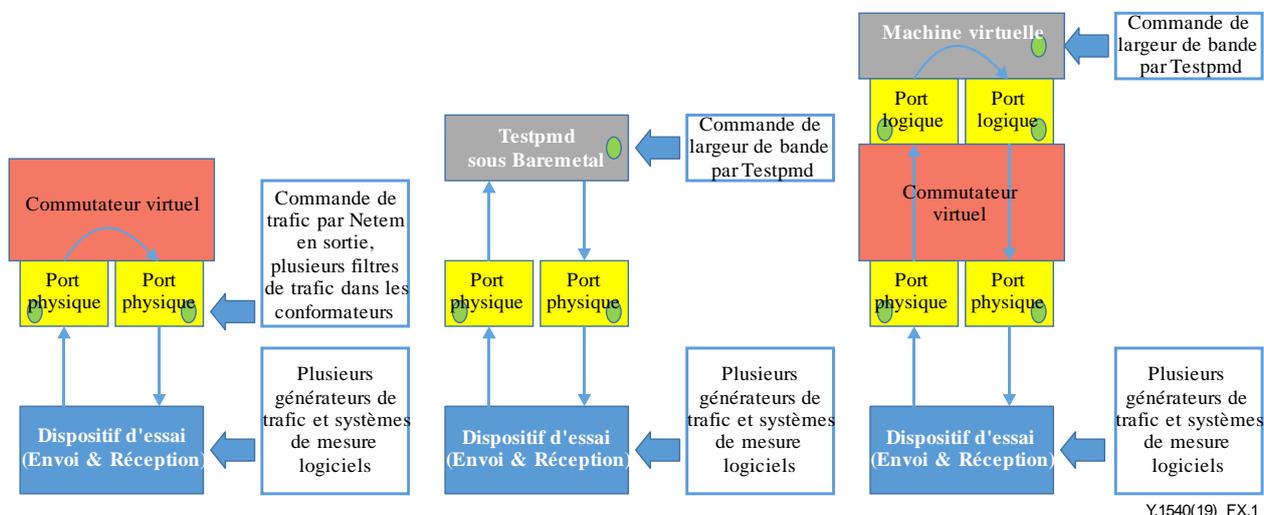


Figure X.1 – Trois méthodes d'essai possibles sur une plate-forme informatique à usage général

Dans la Figure X.1, le dispositif d'essai est connecté à un serveur à usage général par des liaisons physiques à 10 Gbit/s. Ce dispositif est lui-même un serveur à usage général, mais il est entièrement isolé du serveur assurant la commande de trafic, ce qui permet d'attribuer à chaque nœud des ressources dédiées à leur rôle unique dans l'environnement d'essai. On peut installer et tester différentes mises en œuvre des méthodes de mesure possibles grâce au nœud de commande du trafic.

Il existe trois méthodes différentes pour mettre en œuvre la fonction de conformateur du trafic. La première, illustrée à gauche, repose sur un émulateur de réseau doté d'un noyau Linux, appelé "Netem", qui peut simuler un délai et favoriser la commande de trafic une fois que les interfaces NIC et physique pertinentes ont été configurées. Le commutateur virtuel se contente de commuter les trames entre ses deux ports. Cette configuration est généralement appelée "phy2phy" (physique à physique).

Cette configuration phy2phy a été employée pour effectuer les essais et obtenir les résultats présentés ci-après. On trouvera dans l'Annexe A une description des autres configurations (nécessitant l'application "Testpmd", qui fait partie du kit de développement DPDK de la société Intel).

X.3 Montage détaillé des essais

La figure ci-dessous présente les détails du montage de l'essai "phy2phy", qui reposait sur deux nœuds de serveurs, des systèmes de mesure, des interfaces réseau dotées de liaisons à 10 Gbit/s et des configurations comportant un espace de noms de réseau et un commutateur virtuel ouvert (OVS). Les serveurs étaient situés dans un laboratoire de la plate-forme ouverte de virtualisation des fonctions de réseau (OPNFV) hébergée par la société Intel [b-Pod12].

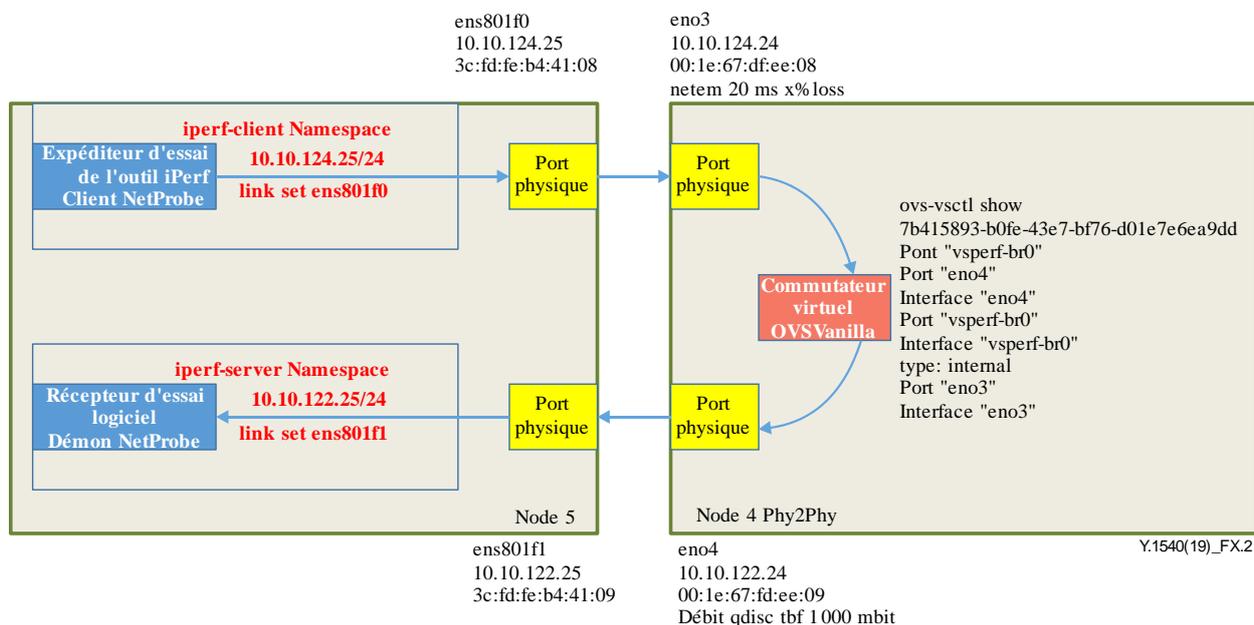


Figure X.2 – Montage de l'essai avec l'outil iPerf, un réseau étalonné et un trafic (mesuré) concurrent

L'espace de noms de réseau est essentiel pour forcer le trafic à sortir par les interfaces de réseau associées au lieu d'être acheminé par le noyau. L'outil NetProbe peut fournir à la fois un trafic UDP concurrent et un sous-flux du trafic général, et il effectue des mesures de perte par paquet et des mesures de latence (avec une résolution de l'ordre de la milliseconde sur un trajet unique ou en aller-retour).

X.4 Outils d'essai

Plusieurs outils de mesure disponibles en code source ouvert ont été employés pour effectuer les évaluations ayant conduit au présent résumé et aux décisions prises pendant les essais. Ces outils étaient T-rex (de la société Cisco), iPerf 2, iPerf 3 et NetProbe, ainsi qu'un nouvel outil qui n'a pas encore de nom. Les fonctions de conformateur et de régulateur du trafic font partie de la distribution courante du système d'exploitation Linux, de même que l'émulateur Netem de dégradation de réseau.

Les premiers essais en UDP effectués avec T-rex ont permis de procéder à l'évaluation de la phase 1 et de déployer l'algorithme de recherche évolué pour faire des recherches binaires en vérifiant les pertes (BSwLV) (voir [b-TST 009]). Cependant, les choix méthodologiques (la perte a été déterminée au moyen de compteurs Tx et Rx non synchronisés) et la difficulté de mener des essais en TCP ont incité les responsables des essais à tester d'autres outils.

Bien que l'outil iPerf 2 ait été remplacé par iPerf 3, les essais ont montré que les résultats de sa configuration étaient plus prévisibles, une fois qu'on en avait pris la maîtrise. L'ensemble du présent résumé repose sur l'emploi d'iPerf 2 (sauf indication contraire) et sur l'emploi de paquets dimensionnés selon l'unité MTU. Sous Linux, iPerf 3 dispose de quelques fonctionnalités qui semblent nécessiter un tri (certaines configurations rencontrant des limites de débit d'envoi). Il existe actuellement plusieurs versions parallèles d'iPerf 3; il est donc nécessaire de leur attribuer un numéro de sous-version pour les distinguer.

NetProbe a été employé uniquement à titre de système de mesure complémentaire (il fournit des mesures de latence dont iPerf 2 et 3 ne disposent pas) et à titre de générateur de trafic concurrent (offrant une fonctionnalité de mesure).

X.5 Étalonage des résultats communiqués pour les essais sous iPerf 2

L'outil iPerf 2 fournit des mesures de débit effectuées en fonction des octets de charge utile de transport acheminés (au-dessus de la couche UDP ou TCP). Le débit du filtre de conteneur à jetons (TBF) est défini en termes de "bits de trames de la couche 2 sans le contrôle de redondance cyclique (CRC) du réseau ETH". Les en-têtes ajoutés à la charge utile de transport sont donc compris dans les calculs du débit TBF (ce débit tenant compte des bits du réseau ETH, de la couche IP et des en-têtes de transport).

Les calculs de débit reçu "avec les données de service" tiennent compte des octets des données de service par paquet pour les en-têtes suivants: ETH (14), IP(20) et UDP(8) ou TCP(20). Un débit de charge utile classique de 972 Mbit/s en UDP, corrigé pour tenir compte des données de service (1,0286), se situe à 999,799 Mbit/s.

La taille des trames TCP est variable car l'outil iPerf 2 envoie un bloc de 8 Ko à l'expéditeur, ce qui se traduit par cinq trames de taille MTU, 892 octets étant laissés libres pour que la trame restante puisse achever le bloc. Cependant, la taille des paquets diffère de ce modèle lorsqu'elle est observée au moyen d'une courbe de paquets. Le facteur de correction le plus simple pour les données de service dans un flux TCP ne prend en compte que la taille de segment maximale (MSS) dans les calculs:

$54+1446 = 1500$; $1500/1446 = 1,0373$ * le débit de charge utile TCP mesuré.

Un débit élevé de charge utile TCP avec 3 connexions (et sans facteur compliquant les calculs, comme du retard) de 956 Mbit/s atteint 991 Mbit/s après correction pour tenir compte des données de service. La plupart des débits de ce type mesurés avec un conformateur dont le débit étaloné est de 1 Gbit/s sont notablement inférieurs à 956 Mbit/s (voir les Figures X.4 et X.5).

On remarque aussi une certaine incohérence entre le calcul de la taille de fenêtre de réception (RWIN) maximale en TCP tel qu'effectué par iPerf 2 et la valeur mesurée pour un RTT de 20 ms. L'un des essais effectués avec 3 connexions TCP a produit les résultats suivants:

$956 \text{ Mbit/s} / 3 \text{ connexions} = 318\ 666\ 666 \text{ bit/s}$ par connexion;

$318\ 666\ 666 / 50 \text{ fenêtres par s} = 6\ 373\ 333,32 \text{ bits}$ dans la fenêtre RWIN

ou $796\ 666 \text{ octets} \sim 0,8 \text{ Mo}$ (et non $0,08 \text{ Mo}$ comme iPerf 2 l'avait indiqué).

X.6 Résumé de la méthode d'essai et des résultats

La figure ci-après résume une partie de l'essai initial (effectué jusqu'en novembre 2018).

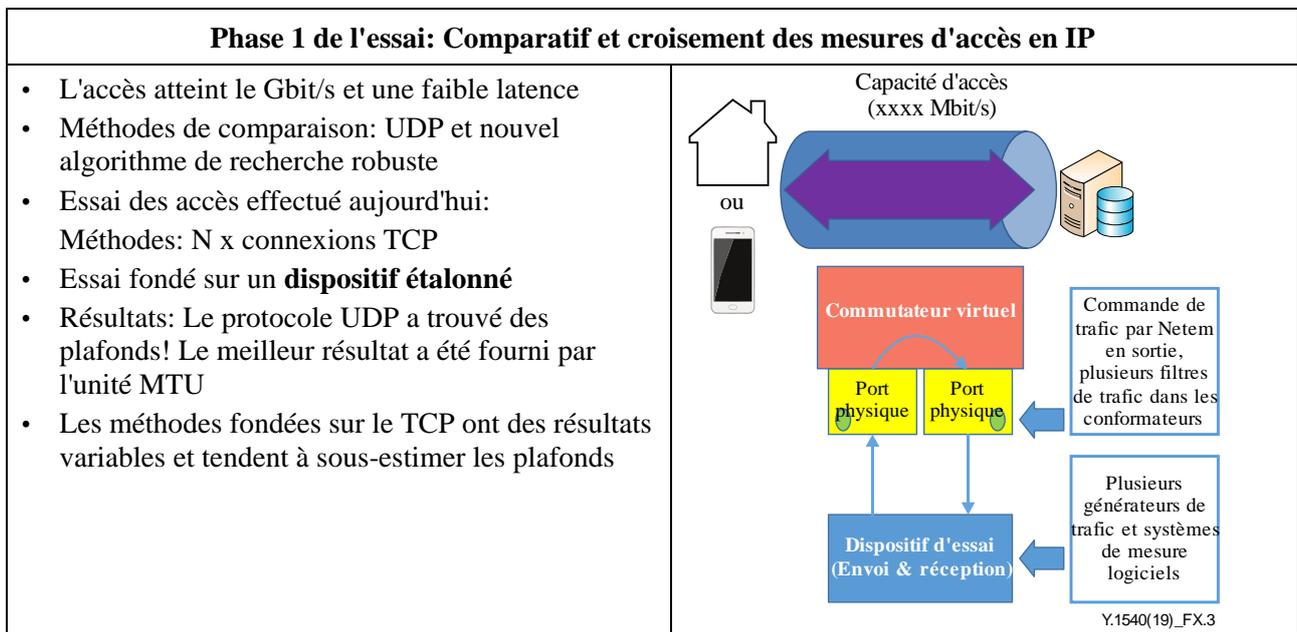


Figure X.3 – Résumé de l'essai initial

X.7 Résumé des essais visant à comparer la capacité mesurée aux débits étalonnés de la couche physique

Le montage et la configuration de l'essai (décrits dans la Figure X.2 ci-dessus) exploitent un filtre de conteneur à jetons (TBF) situé dans le nœud 4 eno4, et dont le débit cible est configurable. Il tolère une certaine sporadicité tout en fixant un temps maximum de traitement d'un paquet (généralement 4 ms). Le débit de 100 Mbit/s est l'un des plus élevés prévus à des fins de vérification dans l'exigence 127 du document [b-BEREC]. La plupart des résultats présentés ici ont été influencés par des simulations de délai (dans l'émulateur Netem).

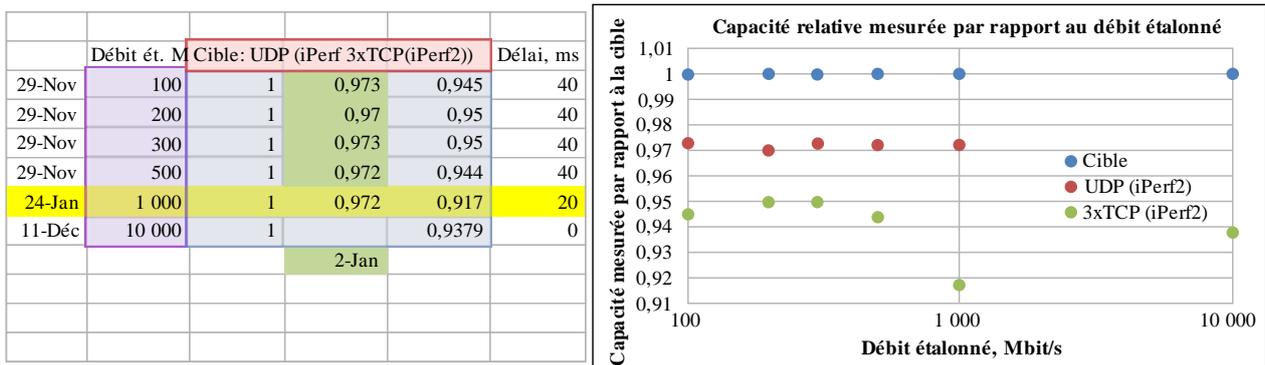


Figure X.4 – Résumé de la capacité mesurée par rapport aux débits étalonnés

Comme le montre la Figure X.4, les méthodes de l'outil iPerf 2 fondées sur le protocole UDP fonctionnent à peu près sans perte au débit configuré dans le filtre TBF, par exemple 972 Mbit/s pour des charges utiles UDP (ce qui donne 1001 Mbit/s après correction pour tenir compte des en-têtes). Les mesures effectuées avec 3 connexions TCP sont sensibles au retard sur le trajet aller-retour, notamment à mesure que le débit du filtre TBF augmente jusqu'à 1000 Mbit/s, la correction d'erreur ne suffisant plus à compenser (bien que le temps d'établissement d'une liaison TCP soit notable, on atteint un débit de 956 Mbit/s après 2 secondes).

Les mesures des liaisons à 10 000 Mbit/s (10 Gbit/s) (sans filtre TBF ou émulateur Netem) représentent à elles seules une source très concrète de limite de débit. Les essais effectués avec 3

puis 5 connexions TCP dans ces conditions réalistes continuent à sous-estimer le débit de la couche physique après application des facteurs de correction prenant en compte les en-têtes. Les outils iPerf 2 et T-rex ne sont pas parvenus à générer un seul flux UDP au-dessus de ~5 Gbit/s dans ce montage d'essai (cette conclusion a d'ailleurs fait l'objet d'une étude supplémentaire: deux clients iPerf 2 ont généré simultanément 3,94 + 4,18 = 8,12 Gbit/s, et un troisième flux semble nécessaire).

X.8 Résumé des essais visant à comparer la capacité mesurée au délai sur le trajet aller-retour

En utilisant un seul débit de filtre TBF de 1 Gbit/s, on a simulé un délai constant sur le trajet aller-retour (dans le nœud 4 eno3) au moyen de l'émulateur Netem.

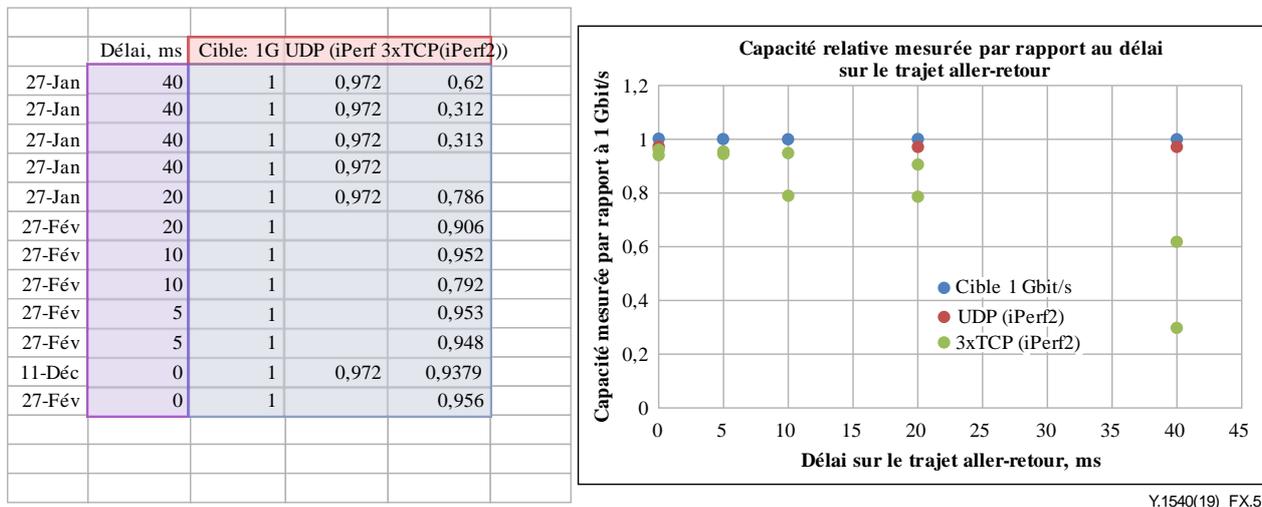


Figure X.5 – Résumé de la capacité mesurée par rapport au délai sur le trajet aller-retour @1 Gbit/s

Les mesures de latence effectuées au moyen de NetProbe (voir la section suivante) confirment que lorsque le filtre TBF limite le débit (et que certains paquets sont abandonnés), la latence configurée dans le TBF ajoute jusqu'à 4 ms à la latence de l'émulateur Netem (qui est de 20 à 40 ms, voir ci-dessus) pour certains paquets. Les résultats des essais de capacité en UDP sont indifférents à la latence mais ils sont pratiques pour ajouter les mesures de latence en UDP. En revanche, la boucle de contrôle de flux en TCP est sensible à la latence (plus précisément pour le délai aller-retour) et ses mesures de capacité se dégradent à mesure que le délai augmente (surtout quand le produit $BW \cdot \text{délai}$ est supérieur à la taille de fenêtre de réception maximale configurée, voir les mesures effectuées à 40 ms dans la Figure X.5).

À la demande des membres du comité STQ de l'ETSI, des essais ont été effectués à 5 ms et 10 ms, et tous les essais menés de 0 ms à 20 ms ont été renouvelés. Les résultats ont montré que les mesures fondées sur le protocole TCP avaient des résultats variables et que le délai tendait à faire croître la variabilité potentielle. Cette question est évoquée au chapitre 4 du document [IETF RFC 8337] à propos des mesures effectuées par un contrôle de flux TCP.

X.9 Résumé des essais sur un trafic concurrent

On trouvera dans la présente partie un résumé de trois essais dans lesquels on s'est efforcé de mesurer la capacité IP sur des flux UDP et TCP en présence d'un flux de trafic concurrent (l'outil NetProbe a généré un flux à débit binaire constant pour permettre de mesurer le délai de transfert de paquets et la variation de ce délai (PDV)).

Tableau X.1 – Concurrence de flux de 1 Mbit/s pour un filtre de compteur à jetons ayant un débit de 1000 Mbit/s + le délai d'une configuration "phy2phy"

Notes	Débit du TBF	Salve et latence du TBF	Latence aller-retour du Netem	Outil	Taille de trame, en octets	Débit du compteur Rx, en Mbit/s	Latence des mesures	Décompte des pertes	Précision du débit
27 janvier, avec un débit d'envoi de NetProbe de 1 156 800 bit/s	1000 Mbit/s	5kb 4,0 ms	40 ms (eno3)	iPerf2; UDP unidir. –b 972000000	1 470 données	971 Mbit/s	Fig. X.6	798 dans la majeure partie du test	0,971
27 janvier, avec un débit d'envoi de NetProbe de 1 156 800 bit/s			40 ms (eno3)	iPerf2; UDP unidir. –b 971000000	1 470 données	971 Mbit/s	Fig. X.7	245 (à la première seconde seulement)	0,971
27 janvier, avec un débit d'envoi de NetProbe de 1 156 800 bit/s			20 ms (eno3)	iPerf2; TCP 3 connexion unidir. 12 sec	5@MTU + reste 892	786 Mbit/s en moyenne Atteint 955 M après 10 secondes	Fig. X.8	X	0,786 en moyenne 0,955 en crête

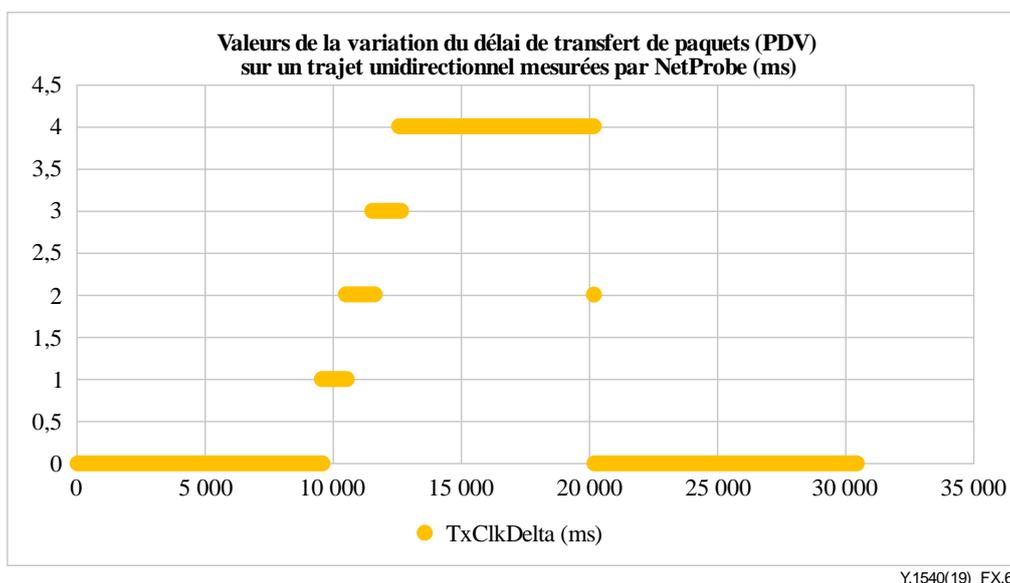


Figure X.6 – Mesure par NetProbe de la variation du délai de transfert de paquets pour un essai de 11 secondes en UDP @ 972 Mbit/s

Les mesures de NetProbe illustrent le délai observé lorsque le débit du filtre de compteur à jetons est dépassé (d'environ 1 Mbit/s) pendant les 11 secondes de l'essai en UDP effectué avec iPerf (sur les 30 secondes de l'essai mesuré par NetProbe). Trois pertes de paquets ont été observées sur le flux NetProbe pour un débit d'envoi de 1 156 800 bit/s. Le débit UDP évalué a été réduit en proportion du volume de trafic concurrent pendant cet essai. Les mesures de latence indiquées dans la Figure X.6 (variation du délai de transfert de paquets sur un trajet unidirectionnel) indiquent que le temps de latence maximum du filtre de compteur à jetons a été observé quelques secondes après le début du flux iPerf 2.

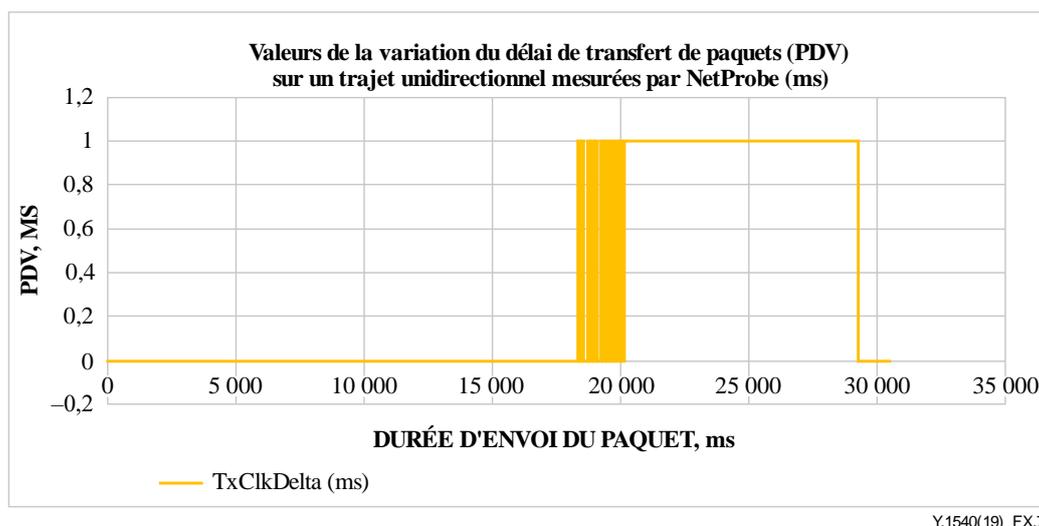


Figure X.7 – Mesure par NetProbe de la variation du délai de transfert de paquets pour un essai de 11 secondes en UDP @ 971 Mbit/s

Les mesures de NetProbe illustrent le délai observé lorsque le débit du filtre de compteur à jetons est atteint pendant les 11 secondes de l'essai en UDP effectué avec iPerf (sur les 30 secondes de l'essai mesuré par NetProbe). Aucune perte de paquets n'a été observée sur le flux NetProbe pour un débit d'envoi de 1 156 800 bit/s.

Le débit UDP évalué a été réduit pour tenir compte du trafic concurrent, ce qui indique que l'essai précédent (Figure X.6) a correctement évalué la capacité restante en présence de trafic concurrent. Les flux combinés correspondent plus étroitement au débit du filtre de compteur à jetons. Les mesures de latence indiquées dans la Figure X.7 (variation du délai de transfert de paquets sur un trajet unidirectionnel) indiquent que le temps de latence maximum du filtre de compteur à jetons n'a pas été observé (et cette latence peut être une donnée d'entrée utile pour un algorithme de recherche de débit (voir [b-TST 009]) en plus de la perte de paquets).

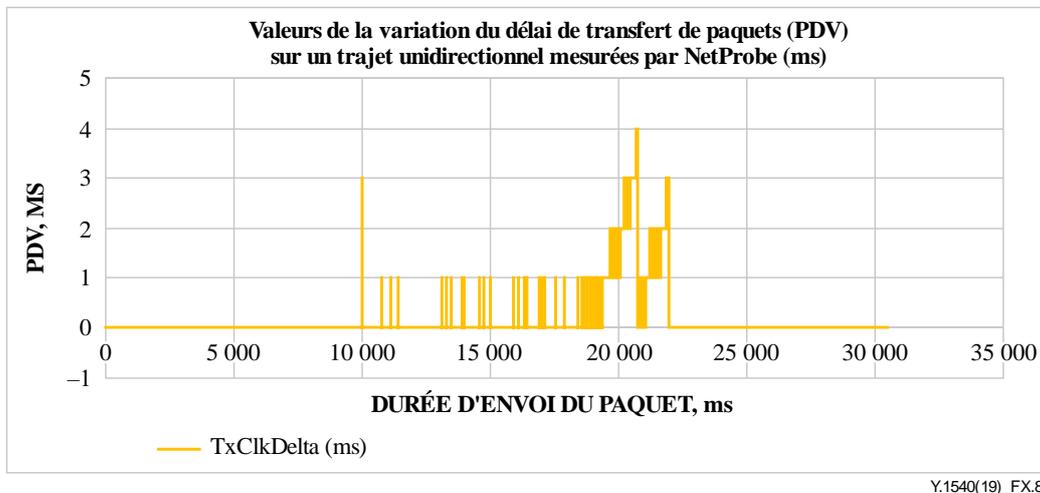


Figure X.8 – Mesure par NetProbe de la variation du délai de transfert de paquets pour un essai de trois connexions TCP pendant 12 secondes

Les mesures de NetProbe illustrent le délai observé lorsque le débit du filtre de compteur à jetons (TBF) est atteint pendant les 12 secondes de l'essai en TCP effectué avec iPerf sur trois connexions (sur les 30 secondes de l'essai mesuré par NetProbe). Aucune perte de paquets n'a été observée sur le flux NetProbe pour un débit d'envoi de 1 156 800 bit/s. Vers la fin de l'essai TCP de 12 secondes, les trois connexions semblent s'être synchronisées et la variation du délai de transfert de paquets mesurée par NetProbe indiquait un délai en dent de scie au filtre TBF (la courbe suivante peut-être la structure d'un AIMD), jusqu'à ce que la latence maximale du TBF, qui est de 4 ms, soit atteinte.

X.10 Essai avec une mise en œuvre pilote d'un nouvel outil de test en UDP

Il manque aux outils iPerf 2 et 3 d'essai en UDP un algorithme de recherche capable de déterminer la capacité IP de manière automatique. Lors de précédents essais, un test exploratoire avec iPerf 2 a déterminé le débit maximum de paquets reçus sur le trajet d'essai (généralement avec une forte perte de paquets), et un second essai effectué à ce débit maximum a déterminé s'il était possible d'envoyer des données à ce débit sans aucune perte de paquets. L'outil T-rex, quant à lui, exploitait le moteur de recherche binaire décrit dans [b-TST 009], qui disposait d'un algorithme de vérification des pertes; il a réussi à trouver le débit de "référence de base" du conformateur, mais il lui a fallu plusieurs essais. Il pouvait être utile de disposer d'un algorithme de recherche plus rapide qui tienne compte de la perte et d'autres dégradations.

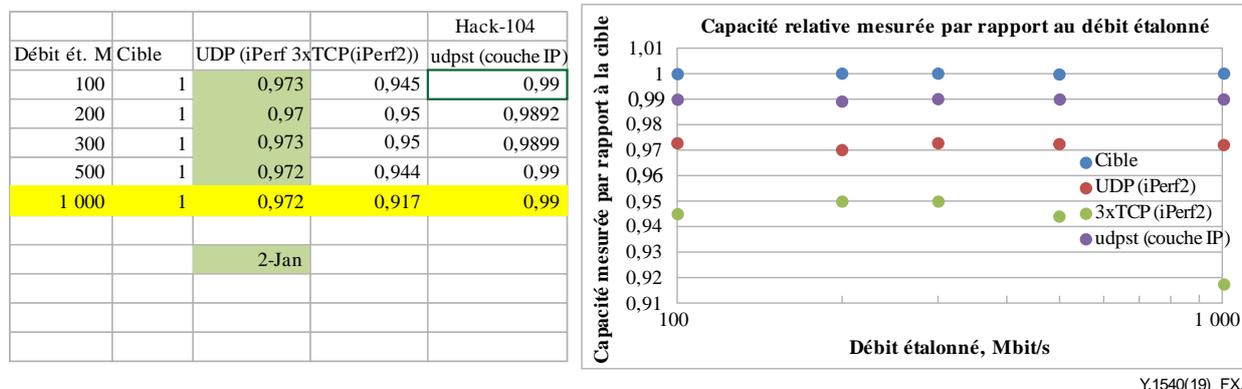


Figure X.9 – Comparaison de la capacité mesurée et des débits étalonné entre les outils "udpst ver1.4" et iPerf

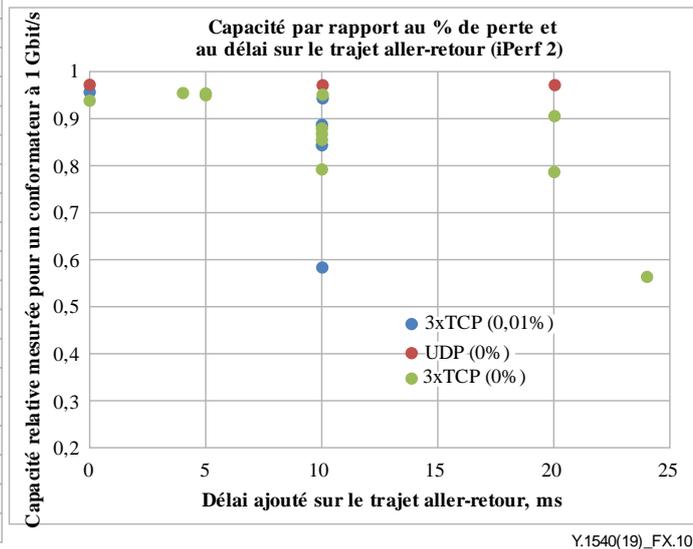
L'udpst est un prototype d'outils de mesure développé par Len Ciavattone. Son algorithme recherche la capacité IP maximale en adaptant son débit d'envoi en fonction des messages d'état envoyés en retour, qui contiennent des mesures de pertes et de reclassement ainsi que des informations sur la variation de délai. Le récepteur de l'udpst envoie des messages d'état à intervalles réguliers (par défaut 50 ms). Tout reclassement, perte de paquets ou variation de délai excessive déclenche des réductions de débit d'envoi jusqu'à ce que la dégradation ne soit plus observée. Les résultats sont indiqués pour la couche IP, y compris les bits d'en-tête. Cela signifie que le facteur de correction pour tenir compte des données de service ne comprend que l'en-tête initial ETH (14 octets). Un facteur de correction des données de service de 1,0112 (1264/1250) appliqué à une mesure courante de 990 Mbit/s donne 1,001 Gbit/s pour le débit étalonné de conformateur de 1 Gbit/s.

X.11 Essais sur les effets de la perte de paquets de bas niveau

L'une des variables, dans les évaluations des essais menés en laboratoire pendant la phase 1, était la perte de paquets. Les taux de perte initialement choisis étaient 10^{-4} et 10^{-5} , soit 0,01% et 0,001% du nombre total de paquets (tel que défini dans l'émulateur Netem). La répartition de ces pertes n'étant pas définie, nous avons choisi une répartition aléatoire.

La Figure X.10 illustre les résultats des essais, étant entendu que les nouveaux résultats indiquant une perte de 0,01% ou aucune perte ont été effectués avec différents délais (le 22 avril) et que leurs courbes ont été ajoutées à celles de précédents résultats d'essais sans perte.

	Délai, ms	3xTCP (0,01%)	UDP (0%)	3xTCP (0%)
22-Avr	0	0,956		
22-Avr	0	0,957		
22-Avr	4			0,954
22-Avr	10	0,888		0,855
22-Avr	10	0,584	0,972	0,87
22-Avr	10	0,844		0,879
22-Avr	10	0,85		
22-Avr	10	0,942		
22-Avr	24			0,564
27-Jan	20		0,972	0,786
27-Fév	20			0,906
27-Fév	10			0,952
27-Fév	10			0,792
27-Fév	5			0,953
27-Fév	5			0,948
11-Déc	0			0,9379
27-Fév	0			0,956



Y.1540(19)_FX.10

Figure X.10 – Résumé de la capacité mesurée par rapport à la perte et au délai sur le trajet aller-retour @ 1 Gbit/s

Il convient tout d'abord de noter que 0,01% de perte seule, sans ajout de délai, a peu d'effet sur la capacité mesurée en TCP dans la couche transport. Bien entendu, un taux de perte supérieur (1%) entraînerait une réduction assez importante du débit mesuré (réduction d'un facteur 10 environ). Lorsqu'on ajoute un délai de 10 ms sur le trajet aller-retour, la variation des débits TCP est importante, avec ou sans perte. Un essai avec perte et délai de 10 ms a produit un résultat <600 Mbit/s, et cette qualité de fonctionnement médiocre était analogue à une mesure récente de délai de 24 ms (la présence d'une petite perte étant possible). Dans un cas où le délai était de 10 ms, l'insertion d'une perte de 0,01% a semblé faire augmenter le débit TCP, ce qui ressemble au type de qualité de fonctionnement non linéaire décrit au chapitre 4 du document [IETF RFC 8337].

Lorsqu'on effectue un essai en UDP au moyen d'iPerf 2, les taux de perte simulés se retrouvent dans les résultats (avec la variabilité attendue entre les rapports pour 1 seconde) et dans la somme finale.

En conclusion, la variabilité des mesures en TCP est essentiellement dominée par le délai sur le trajet aller-retour lorsque le taux de pertes est faible (0,01%).

X.12 Examen des limites de transmission maximales des outils et de la plate-forme d'essai

Bien que le plan d'essai en laboratoire de la phase 1 ait principalement visé les débits étalonnés et la référence de base jusqu'à 1 Gbit/s, il était également utile de connaître les limites supérieures du logiciel d'essai en combinaison avec le matériel hébergeant ces outils. Les essais visant à déterminer ces limites ont été menés avec iPerf 2 pour le transport en UDP et en TPC sur plusieurs durées. Le montage des essais était simplement le trajet jusqu'au commutateur virtuel OVS par des liaisons de 10 Gbit/s sans conformateur de trafic TBF et sans dégradation de l'émulateur Netem.

Les essais les plus concluants de ces limites ont été menés pendant le Hackathon dans le cadre de l'IETF-104. Deux essais fondés sur trois connexions TCP ont produit des débits de 9 385 Mbit/s et 9380 Mbit/s; ces résultats étaient meilleurs que ceux des essais menés le 11 décembre 2018. Les essais sur des flux de trois connexions UDP ont produit un débit de 9 308 Mbit/s, avec une perte de 1,8% et environ 1 500 paquets réordonnés pour un test de 10 secondes (chaque flux avait tenté de produire un débit de 3 330 Mbit/s sans y parvenir).

En conclusion, la capacité de production et de réception de paquets en UDP et TCP était suffisante pour mener des essais à 1 Gbit/s, et probablement aussi à des débits un peu supérieurs, compte tenu des mesures de près de 10 Gbit/s évoquées plus haut.

X.13 Examen des essais avec dégradation précoce sur des flux UDP

Dans plusieurs essais en UDP effectués avec iPerf 2, on a observé que la première seconde du flux de paquets avait subi un reclassement de paquets (en général pour moins de 40 paquets) et qu'un petit nombre de paquets avaient été perdus. Ces observations concernaient un montage avec un conformateur TBF à 1 Gbit/s. Pour trouver la cause de ces dégradations précoces, on a capté le flux UDP (au moyen de l'outil tshark) à l'interface eno4 (juste avant l'activation du conformateur).

Le captage des paquets a ensuite été examiné au moyen de l'outil Wireshark, en particulier pour déterminer le moment où passaient les premiers paquets du flux UDP. On a constaté que les heures d'arrivée des premiers inter-paquets étaient irrégulières jusqu'à ce qu'au moins 20 paquets soient passés dans le flux; à ce moment-là, on atteignait enfin la valeur théorique d'espacement de 12 microsecondes. Les séquences n'étant pas numérotées, l'expéditeur d'iPerf ou le trajet d'essai peuvent avoir causé un certain reclassement dans la partie du flux qui connaissait des salves, et le conformateur peut avoir rejeté des paquets qui dépassaient ses spécifications.

X.14 Examen des paramètres du conformateur TBF employés dans les essais et comparaison avec un filtre de régulateur

Un ensemble d'essais ont été menés pour déterminer si les paramètres du conformateur employés dans la plupart des essais avaient désavantagé les flux TCP. Les essais menés à des débits de conformateur de 1 Gbit/s ont montré que lorsque le paramètre de latence maximale du filtre TBF était ramené de 4 ms à 0,1 ms, la capacité mesurée du flux TCP se réduisait considérablement (les essais en TCP avec une latence de 4 ms ont révélé un débit maximum de 956 Mbit/s, tandis que les résultats à 0,1 ms étaient très variables et se situaient dans la fourchette de 763 à 862 Mbit/s). D'un autre côté, le fait d'augmenter le paramètre de latence maximale du filtre TBF de 4 à 20 ms ne présentait aucun avantage en termes de capacité mesurée du flux TCP. Les essais effectués avec iPerf 2 en UDP ont montré que le système n'était pas sensible à ces variations de paramètres.

Lorsque le conformateur a été remplacé par un filtre de régulateur, la capacité mesurée du flux TCP a de nouveau chuté considérablement, malgré les tentatives d'améliorer la qualité de fonctionnement en adaptant des paramètres (les essais en TCP avec un conformateur ont montré un débit maximum de 956 Mbit/s, tandis que les meilleures performances avec le régulateur étaient de 2,02 Mbit/s). Cela s'explique par le fait que le filtre de régulateur dispose d'un tampon très limité. Les essais sous iPerf 2 en UDP n'étaient pas sensibles au filtre de régulateur du fait que celui-ci a un flux à débit constant.

X.15 Résumé des essais en laboratoire de la phase 1

Les évaluations effectuées sous iPerf 2 en TCP tendent à sous-estimer la capacité étalonnée, et elles sont:

- moins précises qu'en UDP pour les débits élevés, par exemple 1 Gbit/s (qui correspond à l'état de l'art actuel en matière de service d'accès à l'Internet);
- plus sensibles au délai sur le trajet aller-retour qu'en UDP, notamment du fait de la variabilité des mesures en TCP, qui est due au contrôle de flux du TCP;
- plus sensible au trafic concurrent, ce qui fait baisser la moyenne des mesures du fait qu'il faut plus de temps pour atteindre l'équilibre.

Les mesures effectuées sous iPerf 2 en UDP confirment que ce montage peut servir de "référence" pour l'évaluation de capacité, car il est cohérent avec les débits étalonnés (la "référence de base" expérimentale) et il dispose d'une recherche abondante sur les technologies et les débits d'accès plus faibles.

Le temps de latence peut être un paramètre utile à un algorithme de recherche de débit fondé sur l'UDP, en plus de la perte de paquets, comme l'ont supposé les auteurs du document [b-TST 009].

Un prototype d'outil d'essai en UDP (udpst ver1.4) s'est révélé prometteur pour répondre au besoin de rechercher automatiquement un débit maximum en UDP.

X.16 Spécifications de la plate-forme

Voir <https://wiki.opnfv.org/display/pharos/Intel+POD12>

X.17 Résumé des essais sur le terrain de la phase 2

Les résultats résumés ci-après (recueillis dans le cadre de deux campagnes d'essais) étaient fondés sur les types d'accès suivants:

- 1) Fixe: câblo-modem DOCSIS 3.0 doté de la fonctionnalité "trois-en-un" et d'un commutateur hertzien et GigE filaire intégré.
- 2) Mobile: téléphone cellulaire LTE doté d'un modem de cat. 12 (600 Mbit/s en liaison descendante, 50 Mbit/s en liaison montante).
- 3) Fixe: réseau optique passif (PON) "F", service à 1 Gbit/s.
- 4) Fixe: PON "T", service à 1000 Mbit/s.
- 5) Fixe: VDSL, service à différents débits <100 Mbit/s.
- 6) Fixe: ADSL, 1,5 Mbit/s.
- 7) Mobile: routeur compatible LTE raccordé au serveur par un réseau local Ethernet (statique).

De l'avis général, les résultats des mesures ont montré qu'il était préférable d'utiliser le protocole de transport UDP pour évaluer la capacité:

- L'UDP a produit des résultats plus cohérents.
- Les outils fonctionnant en UDP ont pu mesurer la perte, le délai, la variation de délai et le reclassement.
- Les essais en TCP ont enregistré des débits plus faibles que les essais en UDP et ont montré une plus grande variabilité de débit en diverses circonstances.
- Les mesures en TCP avec un réseau PON à 1 Gbit/s montrent que la capacité est considérablement sous-estimée.
- Les conclusions des essais en laboratoire, selon lesquelles le protocole UDP est la référence et le protocole TCP sous-estime la capacité, ont été confirmées par les mesures effectuées sur le terrain.
- Les essais d'accès en LTE ont révélé une forte variabilité, comme on peut l'attendre de n'importe quel réseau hertzien.

Appendice XI

Brève étude de l'accès à l'Internet fondée sur la recherche en matière de qualité de service et de qualité d'expérience

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

XI.1 Introduction

Les fournisseurs de services, les autorités de régulation (et de protection du consommateur) et les fournisseurs et exploitants de systèmes de mesure s'intéressent aux mesures du débit de l'accès à l'Internet pour différentes raisons. De nombreux pays disposent de solides études décrivant les produits d'accès à l'Internet proposés par les fournisseurs de services. Dans ce domaine, la normalisation peut simplement consister à constater les services déployés. Les études sur les estimations de débit d'accès à l'Internet n'ont pas besoin d'être très précises et sont souvent acceptées par les fournisseurs de services en concurrence sur le marché, dès lors que l'auteur de l'étude montre de manière transparente aux fournisseurs de services étudiés qu'il a employé un jeu de paramètres équitables pour effectuer ses mesures.

Il reste toutefois utile de choisir des mesures exactes et normalisées du débit d'accès à l'Internet. Comme pour d'autres mesures exactes de débit ou de volume dont dépendent les obligations ou les sanctions sur les marchés commerciaux, les mesures exactes et normalisées de débit d'accès à l'Internet doivent être définies de manière précise. Or pour déterminer la précision de mesures, il faut d'abord établir un référentiel.

Les travaux de recherche publiés doivent permettre aux autres chercheurs de reproduire les résultats obtenus. Dans le présent document, nous avons examiné un ensemble de publications en nous efforçant de trouver des résultats pertinents dans le domaine des paramètres, des mesures et de l'évaluation de la qualité de service liés à l'accès à l'Internet. Nos travaux portaient essentiellement sur les mesures du débit d'accès à l'Internet, mais ils ne se limitaient pas à ce domaine. Les chercheurs s'intéressent surtout aux mesures de la qualité d'expérience et aux paramètres de la qualité d'expérience liés à l'accès à l'Internet. Certaines démarches adoptées par les chercheurs en la matière semblent indiquer que les paramètres de qualité d'expérience permettent de décrire l'accès à l'Internet et les composantes de la communication de bout en bout de manière plus exhaustive que les estimations de débit d'accès. Ces paramètres de qualité d'expérience font d'ailleurs l'objet de recherches actuellement. Le texte et les références du présent document contribuent à établir un point de départ pour les débats sur l'évolution des normes, en se fondant sur des arguments plutôt que sur des avis.

Il convient de noter que nous avons choisi, chaque fois que possible, des études reposant sur des démarches validées par des mesures à plus ou moins grande échelle, et portant sur des accès commerciaux. Les documents de référence [2], [4], [6], [7], [8] et [10] répondent à ce critère.

XI.2 Principales conclusions

Le présent paragraphe résume les critères de qualité de service, les indicateurs clés de performance et les méthodes de mesure publiés par les chercheurs en matière d'accès à l'Internet et d'utilisation de ces accès.

Le référentiel en matière de débit d'accès maximum possible a été constitué en inondant la liaison d'accès par du trafic UDP [1]. Une étude a d'ailleurs été menée à grande échelle pour mesure de manière précise le débit d'accès en UDP [2]. Un grand fournisseur OTT a intégré des fonctionnalités de mesure en UDP dans un outil interne de mesure du débit [3].

L'une des conclusions sur les mesures parallèles en TCP indique que ces mesures peuvent servir à évaluer la largeur de bande des accès à l'Internet [1]. Certaines publications traitent de facteurs particuliers ayant une incidence sur la précision des mesures parallèles en TCP et examinent plus en détail certaines de ces dégradations [1], [2], [4]. Les mesures parallèles en TCP rendent compte de la largeur de bande réellement disponible en présence de trafic d'arrière-plan [1]. À noter que la largeur de bande disponible n'est identique au débit d'accès à l'Internet qu'en l'absence de trafic d'arrière-plan. Les outils et les méthodes employés pour diagnostiquer la présence de trafic d'arrière-plan sont disponibles [1], [2].

Les auteurs du document [14] ont constaté que l'UDP offrait un protocole de transport commun viable. Cette conclusion s'appuie sur des essais effectués en Amérique du Nord et du Sud, en Europe, en Asie et en Océanie (l'Afrique étant une omission notable). Les auteurs ont observé que le trafic UDP était bloqué sur certains ports, ou dans de rares cas sur la totalité des ports. Les dégradations en UDP se produisaient dans des réseaux d'entreprise et des "réseaux de régions géographiques souffrant d'autres problèmes de connectivité". Il est recommandé de se rabattre sur le transport en TCP lorsque le transport en UDP ne fonctionne plus. L'incidence du WiFi sur la qualité d'expérience des applications peut être décrite par des statistiques recueillies de manière passive sur l'accès à des produits commerciaux, comme le proposent les auteurs du document [10]. Ceux-ci signalent une réduction générale de la qualité d'expérience pour les mesures du compteur TxPhyMean en WiFi en-dessous de 15 Mbit/s.

Beaucoup d'applications reposent sur le transport chiffré. Il convient alors d'évaluer la qualité d'expérience des réseaux en termes de paquets et de flux IP. Les documents [11], [12] et [13] semblent indiquer une corrélation entre les paramètres de qualité de service des réseaux et la qualité d'expérience de la diffusion en continu. Il ressort de ces paramètres qu'il peut être utile de comparer et de décrire aussi l'accès en IP.

À mesure que les téléphones intelligents se répandent, les fournisseurs OTT, les fournisseurs de services et les chercheurs s'intéressent davantage à la qualité d'expérience découlant de la qualité de service des réseaux mobiles. Les recherches publiées suggèrent ou indiquent expressément que les mesures parallèles en TCP ne peuvent pas fournir d'informations utiles à cet égard.

Il existe une corrélation entre la fluctuation de la largeur de bande du réseau mobile et la qualité d'expérience de l'abonné dans des conditions équivalentes de réseau hertzien (par exemple pour une même mobilité de l'abonné). La diffusion en continu de vidéos à succès adapte la qualité de la vidéo pour tenir compte de ces conditions. Dans un environnement souffrant de fluctuations de la largeur de bande, la corrélation entre la qualité d'expérience de l'abonné et les indicateurs clés de performance en matière de qualité de service nécessite de prendre en compte un autre paramètre en plus de la bande passante moyenne disponible, par exemple le débit utile maximum moyen (voir [6], [7], [8]). En général, les mesures de latence des applications destinées aux utilisateurs ou les mesures du temps de transmission aller-retour (RTT) sont considérées comme des indicateurs clés de performance obligatoires. D'après les publications, pour pouvoir déduire le niveau de satisfaction des abonnés en matière d'accès Internet en LTE en s'appuyant sur des mesures de qualité de service, il faut recueillir des indicateurs clés de performance respectivement liés au produit délai-bande passante (ou aux bits transmis) ou à la fluctuation de la bande passante [6], [7], [8].

La bande passante reste peu coûteuse sur les marchés qui intéressent un grand fournisseur OTT. La qualité de fonctionnement du Web perçue par les utilisateurs est le principal élément de mesure employé par ce fournisseur dans le domaine des services de réseau modernes. Le temps de latence du Web est le principal obstacle à l'amélioration de la qualité d'expérience de l'utilisateur sur les marchés en question [5]. Du point de vue du fournisseur OTT, la conception du TCP ne permet pas de continuer à améliorer les services. Quelques temps après la publication du document [5], l'IETF a commencé à travailler sur QUIC, un nouveau protocole de transport fondé sur l'UDP.

Les auteurs de l'une des publications concluent que pour ce qui concerne les environnements de LTE mobile proposés sur les cœurs de marché de nombreux fournisseurs d'OTT, leurs travaux de recherche ont des conséquences très claires pour les utilisateurs finaux: les abonnés n'ont pas besoin d'un contrat offrant un accès cellulaire à très haut débit s'ils utilisent principalement leur accès mobile pour regarder des vidéos diffusées en continu ou pour naviguer sur le Web (document [7]; à noter toutefois que cette affirmation n'est fiable que pour le lieu et le moment auxquels l'évaluation a été effectuée). Des affirmations analogues ont été formulées à l'égard de l'accès fixe à l'Internet dans le document [5], et le document [9] semble aller aussi dans ce sens. Ces appréciations ne sont cependant pas vraies à l'échelle mondiale. Elles attestent que la satisfaction de l'abonné à l'égard d'un accès Internet ne peut plus être liée au débit de l'accès si cet accès offre un débit utile moyen stable bien plus élevé que ce qui est nécessaire pour offrir à l'abonné une excellente qualité d'expérience.

XI.3 Analyse des recherches en matière de mesure de la qualité de service et de la qualité d'expérience

Au cours des années 2010 à 2012, certains travaux de recherche se sont concentrés sur la mesure du débit de l'accès à l'Internet. Par la suite, l'intérêt des chercheurs s'est davantage orienté vers la qualité d'expérience du consommateur d'accès à l'Internet. Néanmoins, cela ne signifie pas que dans les années suivantes, les chercheurs ont cessé de travailler sur la bande passante de l'accès à l'Internet, sur ses propriétés et sur les mesures de la qualité de service. Les paramètres de la qualité de service de l'accès à l'Internet et leurs mesures continuent d'être étudiés lorsqu'il y a une corrélation entre ces mesures et la qualité d'expérience du consommateur.

XI.3.1 Mesure du débit d'un accès fixe à l'Internet

Goga et Texeira [1] ont étudié différents outils permettant d'évaluer le débit d'un accès à l'Internet. Pour éliminer les brouillages indésirables, les mesures ont été effectuées en-dehors des heures de pointe et sur un réseau fixe. Ces travaux visaient à comparer divers outils de mesure de la bande passante. À cette fin, la précision de ces outils et la charge créée par leur mesure ont été déterminées en mesurant l'accès à l'Internet commercial en ADSL et par le câble en présence de trafic transversal contrôlé.

Les auteurs ont établi un référentiel du débit d'accès à l'Internet en mesurant la capacité d'accès en UDP obtenue lorsqu'ils inondaient la liaison avec du trafic UDP. Ils ont ensuite renouvelé le test avec des outils mesurant le débit en TCP.

En l'absence de trafic transversal, les erreurs relatives d'estimation suivantes peuvent être calculées par rapport au référentiel à partir des résultats des mesures obtenus hors heure de pointe:

Inondation en TCP (essai de débit): meilleur des cas 4,06%, erreur moyenne 5,28%, pire des cas 6,8%

En moyenne, la bande passante de l'accès est sous-estimée.

L'inondation en TCP n'a pas permis de détecter du trafic transversal, comme l'a montré un essai effectué avec un seul flux TCP actif pendant le test de débit en TCP. Ce test permet d'évaluer la bande passante disponible, mais pas le débit d'accès à l'Internet. Il existe cependant des outils permettant de détecter la présence de trafic transversal.

Les auteurs ont observé que les débits de traitement des paquets à la passerelle du domicile étaient limités si ces passerelles fonctionnaient comme des traducteurs d'adresses réseau. C'est pourquoi le choix de la taille des paquets mesurés a une incidence sur la précision des mesures du débit d'accès à l'Internet.

Enfin, les auteurs ont indiqué la charge nécessaire pour évaluer le débit d'accès à l'Internet. Les essais de débit en TCP ont créé la charge la plus élevée, tandis que d'autres outils ont évalué ce débit en utilisant moins de 10% de la charge créée par le système d'essai en TCP.

Par ailleurs, Kanuparth [2] a employé des outils en UDP pour mesurer le débit d'accès à l'Internet. Il a observé que la présence de conformateurs dans la liaison encombrée faisait baisser la précision des évaluations de ce débit fondées sur des essais de débit en TCP. Dans le meilleur des cas, le débit indiqué dans ce type d'essais se situait entre le débit de la liaison et le débit du conformateur.

Flach et al. [4] ont créé un algorithme qui détermine le débit (et d'autres propriétés) des régulateurs employés pour limiter la bande passante de l'accès à l'Internet. Ils n'ont pas directement analysé des estimations de débit d'accès à l'Internet. En moyenne, les flux en TCP régulés ont enregistré une perte de paquets six fois supérieure à celle des flux non régulés. Des estimations de débit d'accès à l'Internet fondées sur des essais en TCP qui ne seraient pas effectués avec l'algorithme proposé présenteraient probablement une faible précision.

Les auteurs ont ajouté que des régulateurs étaient encore déployés, dans une certaine mesure, dans des produits commerciaux d'accès à l'Internet en Asie et en Afrique au moment de la publication.

Un essai reposant sur un outil et des mesures a été effectué pour déterminer si l'UDP constituait un protocole viable de transport général sur l'Internet; il a montré que tel était effectivement le cas [14]. Cette conclusion s'appuie sur des essais effectués en Amérique du Nord et du Sud, en Europe, en Asie et en Océanie (l'Afrique étant une omission notable). Les auteurs ont observé que le trafic UDP était bloqué sur certains ports, ou dans de rares cas sur la totalité des ports. Il est recommandé de se rabattre sur le transport en TCP lorsque le transport en UDP ne fonctionne plus.

Un blocage de l'UDP a été observé dans 2% à 4% des réseaux d'accès de Terre. Il était essentiellement lié à un réseau d'accès. Les auteurs du document [14] ont constaté que les dégradations en UDP sont particulièrement concentrées dans des réseaux d'entreprise et des réseaux de régions géographiques souffrant d'autres problèmes de connectivité. Lorsque le protocole UDP fonctionnait sur ces réseaux d'accès de Terre, aucune indication de dégradation systématique du trafic portant des en-têtes UDP n'a été observée.

Pour déclencher une décision de se rabattre sur le TCP, il n'est pas nécessaire qu'un nœud fasse des mesures ou conserve des informations sur ses homologues; il lui suffit d'avoir des informations sur sa connectivité à l'Internet (à cet égard, les auteurs du document [14] indiquent que les dégradations en UDP interviennent sur des liaisons d'accès particulières et non sur des réseaux).

XI.3.2 Mesure du débit d'accès par un réseau local hertzien

Kanuparth [2] avait auparavant étudié la qualité de fonctionnement des accès par un réseau local hertzien (WLAN) conforme à la norme IEEE 802.11. Da Hora, Van Doorselaer, Van Oost et Teixeira ont publié un modèle permettant d'évaluer l'incidence d'un réseau hertzien sur la qualité d'expérience du consommateur [10]. Les auteurs de ce dernier modèle avaient fondé leurs travaux sur des mesures de paramètres recueillies de manière passive à des points d'accès hertziens de produits commerciaux. Une campagne de mesures menée sur des réseaux de fournisseurs d'accès a permis de conclure que la majeure partie des réseaux hertziens présentaient une bonne qualité de fonctionnement. Cependant, plus de 10% des points d'accès affichaient encore une note moyenne d'opinion évaluée inférieure à 3 pour au moins 5% de tous les échantillons recueillis.

Les paramètres suivants des réseaux hertziens ont été recueillis (document [10], Tableau II):

**Tableau XI.3.2-1 – Éléments de mesure de réseaux hertziens mesurés au point d'accès
(Tableau II du document [10])**

Élément de mesure	Description	Période
BUSY	% de temps pendant lequel le média est occupé	2s
WiFi	% de temps occupé en raison du trafic hertzien	2s
nonWiFi	% de temps occupé en raison du trafic non hertzien	2s
TxPhy	Débit PHY de la dernière trame envoyée	1s
FDR	Trames envoyées / retransmises à la station	1s
RSSI	Indicateur de puissance du signal reçu	1s

Les échantillons prélevés par les auteurs indiquent la moyenne, l'écart-type, le minimum, le maximum, le 25%-ile et le 75%-ile pour chaque élément de mesure figurant dans le Tableau XI.3.2-1.

Les statistiques de l'échantillon sont évaluées pendant une période T qui dépend de l'application:

- T = 10s pour les expériences sur l'audio et la vidéo.
- T = 10s pour la navigation sur le Web.
- T = 120s pour la diffusion en continu sur YouTube (chaque vidéo étant lue pendant deux minutes au cours de l'essai).

Les chercheurs ont conclu que le sous-ensemble de vecteurs des fonctions hertziennes d'une application qui présentait la meilleure corrélation avec la qualité d'expérience du consommateur de cette application était le suivant (document [10], Tableau III):

- Vidéo: TxPhy25%-ile, BUSY25%-ile, BUSYmax, RSSImean, RSSI75%-ile, WiFi25%-ile.
- Audio: TxPhymin, RSSIstd, WiFi25%-ile, WiFimax, nonWiFimax, FDRmean.
- YouTube: TxPhymean, BUSY75%-ile, RSSImean, RSSI25%-ile, WiFi25%-ile, nonWiFimin.
- Web: TxPhymax, BUSYstd, RSSImin, WiFimax, nonWiFimax, FDRmean.

La méthode employée par les auteurs du document [10] reposait sur l'apprentissage automatique. Nous ne tenterons pas de déterminer dans le présent document si les résultats du document [10] sont applicables de manière générale. Par hypothèse, les paramètres de la qualité d'expérience sont corrélés à la qualité de service d'une application. Le modèle complet et la méthode d'adaptation des paramètres selon l'application sont présentés dans le document cité en référence. En conclusion et selon la règle empirique évoquée ici, les auteurs du document [10] s'attendent à une baisse de la qualité d'expérience lorsque le paramètre TxPhymean est inférieur à 15 Mbit/s.

XI.3.3 Qualité d'expérience et mesure du débit d'un accès mobile au réseau

Les publications de Dimopoulos et al. [6] et de Casas et al. ([7] et [8]) concernent les mesures de la qualité d'expérience pour la vidéo diffusée en continu sur des terminaux mobiles, le document [7] portant sur des applications supplémentaires. Les auteurs du document [7] concluent que la qualité d'expérience de l'abonné "est très sensible, pour certaines applications, aux fluctuations de la bande passante. Les fluctuations de débit utile dues à la variation de la largeur de bande passante sont très courantes sur les réseaux cellulaires, mais malheureusement, leur incidence sur la qualité d'expérience n'est pas prise en compte dans les mesures actuellement effectuées sur les réseaux, car ces mesures ne portent généralement que sur des valeurs moyennes de débit utile". Il convient de noter que l'expression "mesures actuellement effectuées sur les réseaux" désigne les mesures fondées sur l'inondation des liaisons en TCP.

En outre, le document [6] montre qu'il n'y a pas de corrélation claire entre le débit utile moyen en TCP et la qualité d'expérience de l'abonné lorsqu'il y a variabilité de ce débit.

Les publications indiquent une corrélation entre la qualité d'expérience de l'abonné et les mesures de qualité de service du réseau en s'appuyant sur les paramètres suivants:

- Selon les conclusions du document [6], il faut prendre en compte le délai sur une bande passante moyenne, le nombre maximum de retransmissions de paquets, le nombre maximum moyen de bits transmis et la somme cumulée des débits utiles minimums.
- Les auteurs du document [6] suggèrent en outre de "réduire le bruit introduit par la phase de démarrage dans la détection des variations de résolution" en "retirant de leur jeu de données les 10 premières secondes de toutes les sessions vidéo". Le débit utile pendant cette phase de démarrage semble différer du débit utile et de ses fluctuations pendant la diffusion du reste de la vidéo (la durée moyenne d'une session était de 180 secondes).
- Le document [7] fournit les résultats des mesures en laboratoire avec les fluctuations du débit utile, et le document [8] présente deux éléments de mesure de la qualité de service permettant de les détecter, à savoir le débit utile maximum du flux de la session en liaison descendante et le débit utile moyen du flux de la session en liaison descendante. Ces éléments sont classés dans les "paramètres les plus pertinents".
- Le document [8] présente des évaluations d'autres indicateurs clés de performance ainsi que leur corrélation à la prévision et à la précision des notes moyennes d'opinion. Outre le débit utile moyen et maximum, les indicateurs suivants semblent avoir une incidence sur la précision des prévisions des notes moyennes d'opinion: puissance moyenne du signal, volume de la session et durée de la session.
- Les indicateurs clés de performance étudiés dans le document [8] reposent sur des mesures effectuées dans une région offrant un très bon accès au réseau mobile. Le document [7] présente des résultats obtenus en laboratoire indiquant que des indicateurs supplémentaires comme le temps de transmission aller-retour (RTT) et les interruptions de bande passante de courte durée (provoquées par des transferts cellulaires) peuvent avoir une incidence plus ou moins marquée sur la qualité d'expérience.
- Le document [7] indique par ailleurs que la neutralité des réseaux est un point important. L'une des applications étudiées a souffert d'une limite de bande passante due à l'un des fournisseurs de services Internet participant.

XI.3.4 Mesure de la qualité d'expérience sur des applications chiffrées

Pour évaluer la qualité d'expérience des réseaux en cas d'utilisation d'une application chiffrée, il faut étudier les paramètres de qualité de service pertinents d'une manière plus exhaustive que pour les applications non chiffrées. Les paramètres proposés permettent aussi de décrire les propriétés de l'accès. Les auteurs des documents [11], [12] et [13] proposent un certain nombre de paramètres à cette fin. Leur but commun est de recenser ou d'optimiser les paramètres suivants en matière de qualité d'expérience de la vidéo diffusée en continu, en observant des paramètres de la qualité de service des réseaux:

- le délai de démarrage initial (temps de démarrage);
- le débit binaire moyen sur plusieurs fragments (segments);
- les changements de débits binaires moyens du flux (causés par la variation du niveau de qualité de la vidéo);
- le taux de remise en mémoire tampon.

La démarche commune adoptée consiste à mesurer le débit utile d'un flux vidéo (et audio pour le document [12]). La durée d'échantillon recommandée est la durée classique d'un fragment ou d'un

segment de la vidéo (ou de l'audio). Ces durées se situent entre 2 et 15 secondes, la moyenne enregistrée pour des flux vidéo sur YouTube étant de 4 secondes [13].

Il est recommandé de mesurer le débit des données du flux vidéo en Mbit/s dirigé vers le terminal de répétition sur des échantillons d'une seconde, qui sont ensuite évalués de manière statistique par rapport à la durée du fragment [11], [13]. Dans le document [11], le débit binaire moyen est calculé sur des échantillons moyens simples de 5 secondes en fenêtre glissante. Dans le document [13], cette mesure est élargie pour prendre en compte des fenêtres de 10 secondes consécutives (ce qui produit 5 valeurs moyennes par fenêtre, chacune étant calculée à partir de cinq échantillons d'une seconde).

Les auteurs du document [13] proposent d'employer les paramètres et statistiques de qualité de service suivants pour établir la corrélation entre les propriétés de la couche transport (qui ne sont pas forcément détectables par le réseau) et les paramètres de la couche réseau pendant une phase d'apprentissage:

Tableau XI.3.4-1 – Liste des éléments généraux repris du document [13], Tableau I

	Couche réseau	Couche transport
Fenêtre d'évaluation de 10 s	Nombre d'octets Nombre de paquets Débit utile Durée de repos	Nombre de fanions TCP (SYN, ACK, FIN, URG, PSH et RST) Octets/paquets en désordre Données utiles en TCP ‡Taux de retransmission (taux de 0, 1, 2 et >2) En cas d'évaluation de la qualité d'expérience en temps réel: Octets de début transmis Octets de fin transmis
Statistiques sur les paquets: moyenne, minimum, maximum, médiane, écart-type, asymétrie, aplatissement	Temps entre les arrivées de paquets Octets par paquet	Retransmissions par paquet Fenêtre de réception du transport RTT (uniquement pour le trafic en liaison montante) Octets transmis

On trouvera dans le document [13] des définitions et des instructions plus détaillées sur les mesures.

Pour établir la corrélation entre les mesures du réseau et du transport, il est conseillé d'employer un système d'apprentissage automatique en laboratoire dans des conditions de réseau contrôlés.

Le document [13] ne décrit la phase de démarrage que par des statistiques recueillies pendant les 10 premières secondes de la fenêtre d'évaluation.

Pour décrire des événements de retransmission et de remise en mémoire tampon, les auteurs du document [13] évaluent et comparent les propriétés des cinq premières secondes de chaque fenêtre d'évaluation avec celles de la deuxième série de cinq secondes de chaque fenêtre.

Ils ont conclu que les paramètres de réseau suivants offrent une corrélation avec la qualité d'expérience sur YouTube:

- Délai de démarrage initial (nombre médian d'octets téléchargés, temps moyens entre les arrivées de paquets, débit utile médian en liaison descendante; les statistiques sur les paquets ont été comparées après 3,3, 6,6 et 10 secondes);
- Événements de remise en mémoire tampon (nombre minimum d'octets téléchargés pendant la première moitié de la fenêtre d'évaluation, débit utile en liaison descendante pendant la première moitié de la fenêtre d'évaluation);

- qualité de la vidéo (débit utile en liaison descendante, débit utile en liaison montante).

Les travaux décrits dans le document [13] se poursuivent par l'ajout d'une méthode d'apprentissage automatique permettant de mettre au point et de paramétrer un modèle de qualité d'expérience. Dans le présent document, nous n'avons extrait que les mesures de qualité de service ayant une corrélation avec la qualité d'expérience de l'application. Le lecteur intéressé peut consulter le modèle complet dans le document [13].

XI.4 Tendances générales en matière de qualité de fonctionnement des accès à l'Internet

Deux rapports fournissent aussi des informations générales sur les exigences du marché.

Flach et al. [5] indiquent que dans un environnement dans lequel "la largeur de bande reste relativement peu coûteuse, le temps de latence sur le Web est désormais le principal obstacle à l'amélioration de la qualité de fonctionnement perçue par l'utilisateur".

Cette observation concerne les accès par réseau fixe, mais cette tendance s'explique aussi par l'emploi de téléphones intelligents en tant que terminaux. À noter que certains des auteurs sont employés par un grand fournisseur OTT.

Les auteurs du document [9] ont mesuré la qualité d'expérience en se conformant à la Recommandation UIT-T P.1203; ils disposaient d'un écran de 1920×1080 pixels sur lequel ils affichaient le contenu d'un grand fournisseur OTT reçu par un réseau DSL fixe commercial. Un conformateur a été inséré entre le dispositif de mesure et le routeur DSL et la largeur de bande de la liaison descendante a été modulée en 11 étapes entre 0,256 et 37,5 Mbit/s. Des notes moyennes d'opinion supérieures ou égales à 4 ont été observées pour la largeur de bande en liaison descendante de 3,073 Mbit/s.

Les auteurs du document [7], qui portait sur un réseau mobile, ont conclu que "une largeur de bande de 4 Mbit/s sur la liaison descendante est suffisante pour atteindre des résultats presque optimaux en termes de qualité générale et d'acceptabilité de [la vidéo diffusée en continu], le dispositif d'accès étant un téléphone intelligent. Les conséquences de cette observation pour l'utilisateur final sont simples: (...) il n'est pas nécessaire à l'heure actuelle de disposer d'un contrat LTE coûteux pour vivre une expérience optimale". À noter que ce document a été publié en 2016 et que les auteurs avaient employé des vidéos en haute définition de 720p pour obtenir leurs résultats.

Ces trois déclarations indiquent que si la bande passante de l'accès à l'Internet est suffisamment large, la satisfaction des abonnés et des fournisseurs de contenus au regard de la qualité de fonctionnement de l'accès à l'Internet peut être indépendante du débit maximum de cet accès.

Références pour l'Appendice XI

- [1] "*Speed Measurements of Residential Internet Access*", Oana Goga et Renata Teixeira, PAM 2012, 2012.
- [2] "*End-to-end Inference of Internet Performance Problems*", Partha Kanuparth, thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology, 2012.
- [3] "*Diagnosing Path Inflation of Mobile Client Traffic*", Kyriakos Zarifis, Tobias Flach, Srikanth Nori, David Choffnes, Ramesh Govindan, Ethan Katz-Bassett, Z. Morley Mao et Matt Welsh, 2014.
- [4] "*An Internet-Wide Analysis of Traffic Policing*", Tobias Flach, Pavlos Papageorgey, Andreas Terzis, Luis D. Pedrosa, Yuchung Chengy, Tayeb Karimy, Ethan Katz-Bassett et Ramesh Govindan, IEEE SIGCOMM, 2016.
- [5] "*Reducing Web Latency: The Virtue of Gentle Aggression*" Tobias Flach, Nandita Dukkkipati, Andreas Terzis, Barath Raghavan, Neal Cardwell, Yuchung Cheng, Ankur Jain, Shuai Hao, Ethan Katz-Bassett et Ramesh Govindan, IEEE SIGCOMM 2013.

- [6] "*Measuring Video QoE from Encrypted Traffic*", Giorgos Dimopoulos, Ilias Leontiadis, Pere Barlet-Ros et Konstantina Papagiannaki, IMC '16, 2016.
- [7] "*Next to You: Monitoring Quality of Experience in Cellular Networks from the End-devices*", Pedro Casas, Michael Seufert, Florian Wamser, Bruno Gardlo, Andreas Sackl et Raimund Schatz, IEEE Transactions on Network and Service Management Vol 13 issue 2, 2016.
- [8] "*Predicting QoE in Cellular Networks using Machine Learning and in-Smartphone Measurements*", Pedro Casas, Alessandro D'Alconzo, Florian Wamser, Michael Seufert, Bruno Gardlo, Anika Schwind, Phuoc Tran-Gia, Raimund Schatz, QoMEX 2017.
- [9] "*Measuring YouTube QoE with ITU-T P.1203 under Constrained Bandwidth Conditions*", Werner Robitza, Dhananjaya G. Kittur, Alexander M. Dethof, Steve Göring, Bernhard Feiten, Alexander Raake, QoMEX 2018.
- [10] "*Predicting the effect of home WiFi quality on QoE: Extended Technical Report*" Diego Da Hora, Karel Van Doorselaer, Koen Van Oost, Renata Teixeira. [Rapport de recherche] INRIA; Technicolor; TelecomParisTech. 2018. <hal-01676921>
- [11] "*QoE-based low-delay live streaming using throughput predictions*" Konstantin Miller, Abdel-Karim Al-Tamimi et Adam Wolisz. 2016. ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl. 13, 1, Article 4 (octobre 2016), 24 pages. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2990505>.
- [12] "*eMIMIC: Estimating HTTP-based Video QoE Metrics from Encrypted Network Traffic*", Tarun Mangla, Emir Halepovicy, Mostafa Ammar, Ellen Zegura. Georgia Institute of Technology yAT&T Labs – Recherche.
- [13] "*Real-time Video Quality of Experience Monitoring for HTTPS and QUIC*", M. Hammad Mazhar, Zubair Shafiq, The University of Iowa.
- [14] "*Copycat: Testing Differential Treatment of New Transport Protocols in the Wild*", Korian Edeline, Mirja Kühlewind, Brian Trammell, Benoit Donnet, ANRW '17, Prague.

Appendice XII

Mesures précises de débit binaire

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

XII.1 Introduction

Tout compteur de trafic disposé le long d'un trajet de communication est configuré de manière à lire ou à imposer un débit binaire dans une seule couche de communication (ou c'est ce qu'il fait par défaut). Si l'on connaît la couche de communication dans laquelle un débit binaire imposé provoque un encombrement, on peut réduire l'erreur de mesure.

On peut configurer des dispositifs intermédiaires disposés sur un trajet de mesure en laboratoire ou dans un réseau de manière à imposer des conditions particulières au trafic; en l'absence de ces dispositifs, le débit binaire peut être imposé par une interface physique. Un système de mesure du débit binaire peut indiquer un débit supérieur ou inférieur à ce débit binaire, qui est dû à l'encombrement, lorsque les deux systèmes ne mesurent pas le débit dans la même couche de communication.

Pour effectuer des comparatifs et des étalonnages, il faut notamment connaître de façon précise les couches dans lesquelles ces conditionneurs de trafic ou ces interfaces physiques mesurent le trafic. Pour communiquer avec précision les résultats des mesures de largeur de bande d'une couche à une autre, il faut connaître la taille de l'en-tête des paquets de mesures dans les différentes couches. Et pour présenter ces résultats de mesures de façon précise et compréhensible, il faut indiquer la couche dans laquelle le débit binaire a été imposé et ajouter certaines informations comme la taille des unités PDU des paquets dans la couche considérée.

Il convient de noter que le fait d'ignorer des en-têtes de paquets et la couche dans laquelle le débit binaire a été imposé est une source d'erreurs, mais ce n'est pas la seule. Des systèmes de mesure fondés sur des messages d'encombrement en boucle fermée signalant un abandon de paquets, comme dans les protocoles TCP ou QUIC, créent des sources d'erreurs supplémentaires qui dépendent du délai sur le trajet aller-retour et de la perte de paquets.

Le présent appendice contient aussi des informations sur les filtres de compteur à jetons, qui constituent un élément essentiel des conformateurs et des régulateurs de trafic.

XII.2 Principales conclusions

Pour décrire la qualité de fonctionnement des interfaces et des protocoles de manière compréhensible, on emploie des critères comme le débit ou la largeur de bande, qui sont parfois exprimés en Mbit/s. Pour un usage général, par exemple dans le cadre d'une étude, une connaissance approximative de la largeur de bande suffit pour décrire le résultat des mesures. Il en va différemment si les mesures de largeur de bande sont destinées à étalonner ou à comparer la qualité de fonctionnement d'un dispositif ou d'un trajet de communication visé par l'essai. Pour pouvoir comparer des mesures de largeur de bande recueillies par différentes méthodes ou sur des trajets de mesure ayant plusieurs points de conditionnement de trafic, il faut disposer d'informations supplémentaires afin que les mesures soient précises. Il faut par exemple connaître les erreurs introduites par un système de mesure et par l'imposition d'un débit binaire dans différentes couches (mais ce ne sont pas nécessairement les seules informations requises).

Considérons un dispositif simple de mesure de la largeur de bande comme celui qui est illustré dans la Figure XII.2-1.

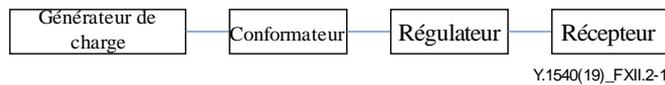


Figure XII.2-1 – Dispositif simple de mesure de la largeur de bande

Cette configuration ne prétend nullement être courante, mais certains de ses éléments peuvent se retrouver dans de nombreux réseaux.

L'essai peut viser à déterminer la perte maximale de largeur de bande libre dans le montage. Le seuil de référence pour comparer les résultats des mesures est la largeur de bande dont dépend la configuration du conformateur et du régulateur (par hypothèse, les deux sont configurés à un même débit C_{Access}).

Une mesure peut indiquer une perte maximale de largeur de bande libre de $0,95 * C_{Access}$. Si le but de l'essai est d'étalonner ou de comparer la qualité de fonctionnement du conformateur et du régulateur, cette indication isolée n'est cependant pas significative (même si elle est recueillie en laboratoire dans des conditions contrôlées).

Prenons pour hypothèse que le générateur de charge et le récepteur sont le même dispositif. Par défaut, ce dispositif produit et compte des tailles de paquets et les débits binaires qui en résultent, par exemple C_{Access} dans la couche 2. Si le conformateur et le régulateur sont configurés pour compter et programmer ou imposer la largeur de bande dans la couche 1, ils peuvent acheminer le trafic avec précision dans une largeur de bande C_{Access} , dès lors que celle-ci est mesurée dans la couche 1. Tous les dispositifs fonctionnent correctement selon leur conception et leur configuration. L'imprécision apparente découlant d'un écart de 5% par rapport aux résultats attendus est provoquée par la couche dans laquelle les dispositifs sont employés dans le montage d'essai visant à mesurer le trafic.

Imaginons à présent que les responsables de l'essai apportent une petite modification, par exemple en diminuant la taille des paquets de mesure de 50%. La mesure de largeur de bande qui en résulte est désormais par exemple de $0,93 * C_{Access}$. Prenons pour hypothèse que l'encombrement n'est pas provoqué par une qualité de fonctionnement limitée en termes de paquets par seconde au niveau d'un processeur quelconque du montage. Ce résultat indique alors une incompatibilité respectivement dans les couches ou les systèmes de mesure le long du trajet testé. La réduction de la taille des paquets entraîne une baisse du débit binaire dans la couche 2, tandis que le débit de la couche 1 reste constant. La chaîne de production fonctionne correctement selon sa configuration.

Si la largeur de bande du flux testé au dispositif de conditionnement est inconnue ou ne peut être contrôlée par la configuration de l'expéditeur, ou si la couche dans laquelle le dispositif de conditionnement limite le trafic est inconnue, on ne peut étalonner ou comparer ce dispositif qu'avec une précision limitée.

XII.3 Estimation de l'erreur de mesure de largeur de bande due à la taille de l'en-tête

Le trafic n'est limité à un débit binaire constant que dans la couche communication dans laquelle fonctionne le conformateur, le régulateur ou l'interface physique de conditionnement. Il ne faut pas s'attendre à ce que les conformateurs et les régulateurs fonctionnent dans une couche particulière bien définie. Dans certains cas, les dispositifs du fournisseur de réseau permettent de configurer la couche dans laquelle les appareils de mesure de débit des conformateurs et des régulateurs vont fonctionner.

Pour comparer des mesures de largeur de bande de manière précise à des fins d'étalonnage et de référence, il faut disposer des informations suivantes:

- la couche communication et la taille des unités PDU de l'expéditeur et du récepteur;

- toutes les tailles des en-têtes ajoutés ou retirés si l'expéditeur et le récepteur ne mesurent pas le trafic dans la même couche;
- la couche des paramètres de configuration pour laquelle les dispositifs de conditionnement du trafic à étalonner ou à comparer sont configurés. Si l'encombrement se produit dans une interface physique, la plupart du temps la largeur de bande de l'interface de la couche 1 est connue;
- les tailles exactes des en-têtes ajoutés ou retirés si l'expéditeur, le récepteur et les dispositifs de conditionnement du trafic ne mesurent pas la largeur de bande exactement dans la même couche et avec des tailles d'unités PDU identiques;
- la couche du seuil par rapport auquel une mesure est comparée, et toutes les tailles des en-têtes qui sont ajoutés ou retirés si la couche du seuil n'est pas identique aux couches de l'expéditeur et du récepteur.

Il y a dégradation des mesures si le seuil de débit binaire auquel les mesures de largeur de bande d'un expéditeur et un récepteur sont comparées ne concerne pas la même couche communication. En outre, plus le nombre de nœuds actifs, de politiques et de points d'interfonctionnement est élevé sur un trajet de production, plus il est probable qu'il y ait des en-têtes supplémentaires, ceux-ci pouvant être absents aux dispositifs d'envoi et de réception, par exemple des en-têtes de tunnel entre les couches 2 et 3 ou entre les couches 3 et 4.

Si des en-têtes Ethernet doivent être employés dans les calculs, il faut connaître la présence et le nombre d'étiquettes de réseau local virtuel (VLAN).

Dans certains cas, la couche 1 doit disposer de séquences d'échappement pour produire des trames correctes. La présence d'une séquence de codes d'échappement peut dépendre de la structure des bits de charge utile. Dans ce cas, la précision des mesures est limitée.

En général, un débit binaire C_x est limité à une largeur de bande configurée (ou physique) dans une couche x . Dans cette couche et seulement dans celle-ci, l'équation suivante est valable pour mesurer le débit binaire C_x de la couche x (généralisée par rapport à la Recommandation UIT-T Y.1540):

$$C_x(t, \Delta t) = N_x(t + \Delta t) / \Delta t \quad (1)$$

où N_x est le nombre total de bits de la couche x pouvant être transmis par une section de base produisant un résultat positif de transfert de paquets dans la couche x au point de mesure de sortie pendant un intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$. Dans une couche de communication y qui transporte des paquets de la couche x , il faut ajouter un en-tête de paquets ayant une longueur constante de h_y bits à chaque paquet de la couche x . Si la largeur de bande connue ou mesurée est uniquement celle de la couche x , la largeur de bande de la couche y consommée par le flux de paquets mesuré ne peut être déterminée que si le nombre de paquets p_x de la couche x et la taille de l'en-tête de la couche y sont connus:

$$C_y(t, \Delta t) = [N_x(t + \Delta t) + p_x * h_y] / \Delta t = C_x(t, \Delta t) + p_x * h_y / \Delta t \quad (2)$$

À l'évidence, deux modifications ont une incidence sur les erreurs de mesure:

- comme prévu, la largeur de bande C_y de la couche y est plus grande que celle de la couche x ;
- C_y dépend du nombre de paquets p_x dans la couche x , tandis que C_x est indépendant de ce nombre.

Le nombre de paquets p_x et la taille moyenne de paquet s_x sont liés par l'équation (3):

$$s_x = C_x(t, \Delta t) / p_x \quad (3)$$

La taille de paquet s_x de la couche x a une incidence sur le débit binaire résultant C_y mesuré dans la couche y .

Les normes, les spécifications publiques et les informations sur les produits peuvent permettre de déterminer la taille de paquet de l'en-tête et la taille de paquet maximale dans différentes couches de communication pour certains marchés. Il faut considérer que la couche dans laquelle un fournisseur de réseau ou de service impose un débit configuré est inconnue.

Pour améliorer au maximum la précision des mesures de largeur de bande, il faut prendre en compte des informations détaillées sur la taille des paquets de mesure et le format de l'en-tête défini au lieu de l'encombrement dans le plus grand nombre de couches différentes possible.

En l'absence de ces informations détaillées, on peut former une hypothèse prudente sur la taille minimale des données de service. Cette hypothèse peut être formée soit au regard du montage employé pour effectuer les mesures, soit en fonction des informations générales concernant un accès si aucune spécification de format d'en-tête de cette couche n'est disponible pour cet accès.

Il faut connaître les tailles moyennes des paquets de mesures reçus ou le nombre de paquets de mesures reçus pour pouvoir réduire l'erreur de mesure.

Si les en-têtes de couche et la taille ou le nombre moyens des paquets de mesures reçus ne sont pas connus avec précision, mais que les valeurs maximales et minimales peuvent être déterminées, on peut alors établir un couloir de mesures corrigées.

Les formules (1), (2) et (3) permettent de calculer des largeurs de bande dans différentes couches de communication si les en-têtes de ces couches et la taille moyenne des paquets de mesures reçus ou le nombre maximum et minimum de ces paquets sont connus (en plus des mesures de la largeur de bande).

XII.4 Exemple de calcul de données de service pour une interface filaire de réseau Ethernet IEEE 802.3

Il convient de noter que tous les calculs indiqués ci-dessous ne sont valables que pour un réseau encombré transmettant des paquets par une liaison physique conforme à la norme Ethernet définie dans la série IEEE 802.3.

Ce projet de la CE 12 visait à effectuer des essais en laboratoire sur la bande passante d'un accès à l'Internet (voir l'Appendice X). L'outil de mesure iPerf 2 fournit des mesures de débit fondées sur les octets de charge utile de transport acheminés (au-dessus de la couche UDP ou TCP). Le débit du filtre de compteur à jetons [d'un conformateur configuré pour simuler un encombrement] étant défini en termes de "bits sur le réseau filaire", les en-têtes ajoutés aux charges utiles de transport sont pris en compte dans les calculs de ce filtre (le débit tient compte des bits ETH et IP et des bits d'en-tête de transport).

On sait que la charge utile UDP d'une première mesure est de 1470 octets. La connexion Ethernet est native (pas d'en-tête de réseau local virtuel).

Les calculs d'en-têtes de la couche inférieure donnent les résultats suivants:

- En-tête UDP: 8 octets;
- En-tête IPv4: 20 octets;
- En-tête Ethernet:
 - 14 octets (couche 2 sans contrôle de redondance cyclique (CRC));
 - 18 octets (couche 2 avec CRC);
 - 26 octets (couche 1).

97,2% du débit configuré a été reçu sans perte de paquets pour différentes configurations du taux d'encombrement. Au début, on a pris pour hypothèse que la taille de trame de la couche 2 du réseau Ethernet comprenait les octets du CRC. Avec un en-tête de 46 octets par paquet, on a obtenu un facteur de correction de 1,0313. On a calculé que la largeur de bande du conformateur des "bits sur

le réseau filaire" était de 1,00242 fois le débit configuré. Le taux d'erreur était de 0,24%, ce qui est faible.

Une étude plus détaillée a montré que le débit du conformateur ne comprenait pas les octets du CRC. La correction d'en-tête fondée sur une taille d'en-tête de 42 octets était alors de 1,0286. On a calculé que la largeur de bande du conformateur des "bits sur le réseau filaire" était de 0,999799 fois le débit configuré. Le taux d'erreur était de -0.02%, ce qui est encore bien plus faible. Une erreur de mesure de 2 ppm indique que la configuration du conformateur en laboratoire a fonctionné de manière relativement précise dans la couche 2 du réseau Ethernet (sans les octets du CRC).

À noter que l'équipement du fournisseur de réseau peut aussi mesurer le trafic Ethernet dans la couche 2 sans CRC. Aucune couche n'a encore été définie par défaut pour mesurer le débit binaire sur un réseau Ethernet; le matériel du fournisseur de réseau peut mesurer le débit Ethernet dans la couche 1 ou la couche 2 et tenir compte en outre des octets du CRC.

XII.5 Description de la fonction de filtre de compteur à jetons

Les conformateurs et les régulateurs imposent un débit particulier au trafic. Le contrôle de débit sous-jacent repose souvent sur un filtre de compteur à jetons. Celui-ci fonctionne généralement de la manière suivante:

- Configurer un débit (*Rate*) en [bits/s].
- Configurer un octet de tolérance de rafales (*Burst-Tolerance_Byte*) en [octet].

Dans l'idéal, les systèmes offrent souvent la possibilité de configurer la tolérance de rafales (*Burst-Tolerance_ms*) en [ms]. On peut alors s'attendre à ce que le tampon suivant soit attribué au système de manière interne:

$$Burst-Tolerance_Byte [octet] = Rate / 8 / Burst-Tolerance_ms * 1000 \quad (4)$$

Un régulateur de compteur à jetons ajoute un jeton d'un bit au compteur à chaque $1/Rate$ seconde. Si le compteur est rempli de jetons *Burst-Tolerance_Byte*, les jetons supplémentaires sont abandonnés.

Lorsqu'un paquet d'octets *Packet-Length* arrive, le filtre vérifie si les jetons correspondant à ce *Packet-Length* sont présents dans le compteur.

- Si tel est le cas, le paquet est transmis et les octets *Packet-Length* sont retirés du compteur;
- Sinon, le paquet est abandonné et le compteur ne change pas (sauf en cas de présence d'un tampon de conformateur supplémentaire; voir la note ci-dessous).

Un conformateur de compteur à jetons fonctionne comme un régulateur, mais il dispose d'un tampon supplémentaire d'octets *Buffer_bytes*. Si le paquet est abandonné par le régulateur, il est stocké dans le tampon jusqu'au débordement de celui-ci. Lorsque le filtre de compteur à jetons contient un nombre suffisant de jetons, le premier paquet stocké dans le tampon est transmis (pour autant que la méthode du premier entré - premier sorti soit programmée).

Si le tampon du conformateur est entièrement rempli par les paquets entrants, tout paquet supplémentaire est abandonné.

À noter que les conformateurs disposent d'un tampon supplémentaire qui peut être configuré en *Buffer_ms* [ms] ou en un certain nombre de paquet (*Packets*), et qu'en général on prend pour hypothèse une taille moyenne de paquet lorsque le système attribue des octets au tampon de paquets. Là encore, on emploie le débit *Rate* configuré pour calculer la profondeur du tampon interne du système *Buffer_bytes* comme indiqué dans l'équation (1).

Appendice XIII

Paramètres et méthodes de mesures liés aux flux fondés sur le protocole IP

(Cet Appendice ne fait pas partie intégrante de la présente Recommandation.)

XIII.1 Contexte

L'IETF a approuvé et publié en mars 2018 le document RFC 8337, intitulé "*Model-Based Metrics for Bulk Transport Capacity*" (Mesures fondées sur un modèle concernant la capacité de transport en masse) [IETF RFC 8337]. Les travaux sur les mesures fondées sur un modèle (MBM) étaient le fruit de nombreuses années d'efforts au cours desquelles on a étudié le problème de la mesure de la capacité de transport; ils ont surtout été menés au sein du groupe de travail sur les mesures de performance IP (IPPM) de l'IETF. Cette spécification décrit en détail les nombreux problèmes et difficultés liés à la nécessité de pouvoir reproduire des essais sur un transport TCP conforme à la norme (chapitre 4). La solution de ces problèmes repose essentiellement sur la conception d'une méthode et d'un ensemble de tests de diagnostic dans lesquels le contrôle de flux du TCP est désactivé. Cette méthode prévoit d'évaluer la qualité de fonctionnement d'un transport cible en termes de débit de transmission et de temps de transmission aller-retour (RTT).

L'évaluation du modèle MBM a commencé avant la publication du document RFC. Dans ce document, Morton a écrit un texte intitulé "*Improved Internet speed tests can enhance QoS and QoE*" (De meilleurs essais du débit sur l'Internet peuvent améliorer la qualité de service et la qualité d'expérience). Il a examiné plusieurs méthodes de mesure pour évaluer le cadre du modèle MBM afin de recenser les nombreux problèmes de précision que posent les techniques actuelles de mesure de l'Internet et de commencer à les régler [MortonPQS].

XIII.2 Raisons pour lesquelles le modèle MBM répond aux exigences de la présente Recommandation

Le paragraphe 6.12 présente un ensemble d'exigences auxquelles toute mesure portant sur des flux doit répondre pour garantir une participation raisonnable au partage des ressources sur l'Internet. Le modèle MBM répond à ces exigences, comme nous allons le montrer ci-après (les termes et définitions sont présentés au chapitre 3 du document [IETF RFC 8337]).

Tout paramètre concernant un flux ou un débit utile doit être conforme aux prescriptions suivantes:

- 1) un paramètre décrivant le débit utile offert à un service IP doit normalement mettre en relation le nombre de paquets IP correctement transportés par un réseau ou par une section IP avec le nombre de paquets IP qui sont acheminés dans ce réseau ou dans cette section.

Le nombre de paquets envoyés ("acheminés vers ce réseau ou cette section") dépend entièrement du choix du flux destiné à l'essai. De plus, la méthode MBM mesure directement le nombre de paquets IP "correctement transportés" (pour en déduire le taux de perte et mesurer la longueur de plage).

- 2) un paramètre associé au débit utile doit s'appliquer à un réseau IP de bout en bout et au transport IP par une liaison de commutateur, une section de réseau ou un ensemble de sections de réseau.

Les éléments de mesure et les mesures selon la méthode MBM sont conçus pour être indépendants du point d'observation et être applicables de ce fait aux trajets d'essai sur une liaison de commutateur, une section de réseau ou un ensemble de sections de réseau (et ils répondent en outre à plusieurs autres exigences fondamentales, voir la section 4.3 du document [IETF RFC 8337]).

D'autres exigences découlant de la présente Recommandation sont présentées ci-dessous, avec une analyse de leur conformité au modèle MBM:

Certains paramètres associés au flux ou au débit utile tentent de décrire la capacité d'écoulement d'un réseau IP, c'est-à-dire son aptitude à soutenir un débit donné de transfert de paquets IP. Il est recommandé que de tels paramètres soient conformes aux exigences supplémentaires suivantes:

- 1) Le schéma d'écoulement du trafic offert au réseau ou à la section IP doit en principe être décrit, étant donné que l'aptitude du réseau ou de la section IP à acheminer correctement ces paquets dépend de ce schéma d'écoulement du trafic.

Le schéma d'écoulement ("offert au réseau ou à la section IP") est constamment contrôlé par le choix du flux destiné à l'essai (lui-même conforme aux paramètres spécifiés pour l'essai).

- 2) Le débit auquel le trafic est offert ne devrait pas dépasser la capacité (en bits/s) de la liaison qui connecte les sections en essai aux sections de destination qui ne sont pas en essai.

Le schéma d'écoulement offert est choisi et contrôlé en fonction des contraintes du flux destiné à l'essai et du paramètre *target_rate* (débit ciblé) du modèle MBM.

- 3) Il convient de déclarer le type de paquet IP considéré dans toute déclaration relative à la qualité de transfert en termes de débit utile.

Le cadre des mesures de performance en mode IP (IPPM) défini par l'IETF dans le document [b-IETF RFC 2330] (qui fournit des orientations pour l'élaboration d'éléments de mesure et les mesures conformes à leurs spécifications) prévoit expressément que les détails d'un paquet doivent être définis (voir le chapitre 13 sur les paquets de type P). À noter que ce chapitre est en cours d'actualisation pour intégrer les exigences relatives au protocole IPv6 et d'autres évolutions récentes.

Il convient aussi de noter que l'Appendice IX indique pourquoi les mesures fondées sur un protocole TCP conforme à la norme ne répondent pas aux exigences du paragraphe 6.12.

XIII.3 Rôle et statut de la méthode de mesure MBM

Le rôle de la méthode MBM est de déterminer si un trajet ou sous-trajet présente une qualité de fonctionnement suffisante pour prendre en charge un débit ciblé afin de transférer de manière fiable un flux d'octets par une seule connexion de la couche transport. Cette méthode est utile pour évaluer si un trajet ou sous-trajet offre le débit de transport requis par une application donnée, par exemple sur le sous-trajet entre un serveur de fourniture de contenus et la tête de réseau d'une liaison d'accès. Il est entendu toutefois que les méthodes MBM n'ont pas vocation à évaluer une capacité IP à des débits atteignant le Gigabit.

Le reste du présent Appendice concerne des sujets qui, à ce stade, doivent faire l'objet d'un complément d'étude. Des évaluations supplémentaires en laboratoire et sur le terrain sont nécessaires.

XIII.4 Choix du flux d'essai

Le chapitre 6 du document [IETF RFC 8337] présente plusieurs conceptions de flux d'essai différentes qui peuvent être choisies pour constituer un ensemble de diagnostics IP ciblés (TIDS).

Le paragraphe 6.1 décrit une conception de flux permettant de **simuler un démarrage lent du TCP** (qui intervient au début de chaque connexion TCP). Les principaux paramètres du flux sont les suivants (à noter que les valeurs cibles sont déterminées par l'abonnement au service et le trajet en cours d'essai):

- la taille de rafales en paquets (4, mais on peut aussi employer de plus petites tailles);
- la taille de la fenêtre cible *target_window*;
- le temps de transmission aller-retour *target_RTT*;
- le débit cible *target_data_rate*.

Selon le document [IETF RFC 8337], "(...) à des échelles de temps plus longues que *target_RTT* et lorsque la taille de rafales est égale à *target_window_size*, le débit moyen est égal à *target_data_rate*."

Le paragraphe 6.2 décrit la conception du **flux à débit pseudo constant dans une fenêtre constante**, ainsi que le problème lié au fait que si une fenêtre de tailles de paquets entières est combinée à un RTT fixe, le débit de données acheminées peut représenter exactement le paramètre *target_data_rate* (mais en fonctionnant légèrement au-dessus ou au-dessous de *target_data_rate*), par exemple lorsque le RTT ou *target_data_rate* est faible.

Là encore, les quatre paramètres fondamentaux du flux permettant de simuler un démarrage lent du TCP sont indiqués.

Le paramètre *target_data_rate* peut aussi changer lorsque le temps RTT varie, du fait que l'on emploie l'autosynchronisation dans ce flux (ce sont les arrivées de messages ACK en TCP qui déterminent le débit d'envoi, et elles dépendent du RTT). Un trafic concurrent inattendu peut provoquer une variation de RTT (augmentation ou réduction).

Ainsi que le document [IETF RFC 8337] le suggère, "il peut être plus judicieux de mesurer le trafic à un rythme classique dans ces environnements" lorsqu'il est impossible d'atteindre le débit *target_data_rate* ou qu'on rencontre un problème de RTT ou d'autosynchronisation. Le **trafic pseudo-CBR** peut encore contenir des rafales, mais il est envoyé au débit *target_data_rate* dans l'ensemble de l'essai.

Les flux de trafic pseudo-CBR précités sont employés pour évaluer des débits de données de base, par exemple à l'appui de l'essai décrit au paragraphe 8.1.2 du document [IETF RFC 8337].

À noter que la production d'un flux pseudo-CBR dans la fenêtre étudiée, telle que décrite au paragraphe 6.3, accroît la complexité pour créer une situation plus réaliste en réponse aux conditions du réseau; à ce stade, elle doit faire l'objet d'un complément d'étude.

XIII.5 Points de mesure

Le document [b-IETF RFC 7398] définit un trajet et des points de mesure de référence pour les mesures de performance couramment employées. D'autres projets de mesure analogues peuvent aussi s'appuyer sur les extensions décrites ici pour déterminer l'emplacement des points de mesure. Le document [b-IETF RFC 7398] a pour but de proposer une méthode efficace de description de l'emplacement du ou des points de mesure employés pour effectuer une mesure particulière, notamment en précisant les situations dans lesquelles une mesure comprend des sous-trajets gérés et non gérés (réseau privé).

À noter que le trajet de mesure tel que délimité par les points de mesure définis dans le document [b-IETF RFC 7398] détermine l'applicabilité des paramètres d'abonnement, notamment les débits de données couramment offerts, et indique si les paramètres d'abonnement peuvent faciliter le choix de paramètres MBM tels que le débit *target_data_rate*.

La figure ci-dessous montre deux domaines d'application pour des mesures qui ne se chevauchent pas: le domaine de l'accès et le domaine de la distribution.

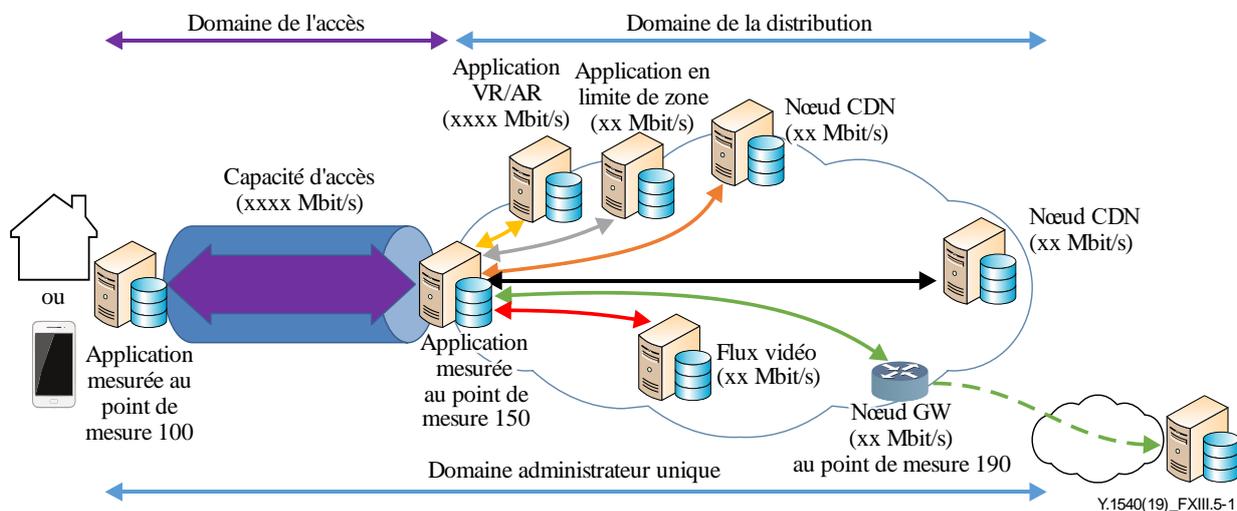


Figure XIII.5-1 – Mesures distinctes de l'accès et de la distribution

Dans le document [b-IETF RFC 7398], le domaine de l'accès se trouve entre les points de mesure 100 et 150; c'est le domaine prévu pour les éléments et les méthodes de mesure de la capacité IP en UDP décrits dans l'Annexe A.

Le domaine de la distribution, pour sa part, se trouve entre les points de mesure 150 et 190 définis dans le document [b-IETF RFC 7398]. C'est le domaine prévu pour appliquer les méthodes d'évaluation du débit *target_data_rate* selon le modèle MBM (entre les serveurs situés en limite de zone ou au sein du domaine de la distribution) lorsque ces méthodes ont été affinées.

XIII.6 Spécification des paramètres du modèle cible

Voir les sections 5.1 et 5.2 du document [IETF RFC 8337].

XIII.7 Définition des critères d'acceptation et interprétation des résultats

Voir les sections 7.1 et 7.2 du document [IETF RFC 8337].

XIII.8 Méthodes d'essai

Les documents [b-IETF RFC 6673] et [MortonPQS] indiquent que les essais doivent être répétés plusieurs fois. Un seul essai ne permet pas d'évaluer de manière précise un service d'abonnement quelconque censé être disponible à la demande, mais il peut suffire pour faire de simples vérifications si les résultats confirment les attentes.

XIII.9 Exemple(s)

Voir la section 9 du document [IETF RFC 8337].

Bibliographie

- [b-UIT-T I.353] Recommandation UIT-T I.353 (1996), *Événements de référence permettant de définir les paramètres de performance du RNIS et du RNIS LB.*
- [b-UIT-T I.356] Recommandation UIT-T I.356 (2000), *Caractéristiques du transfert de cellules de la couche ATM du RNIS-LB.*
- [b-UIT-T P.800] Recommandation UIT-T P.800 (1996), *Méthodes d'évaluation objective et subjective de la qualité de transmission.*
- [b-UIT-T X.25] Recommandation UIT-T X.25 (1996), *Interface entre équipement terminal de traitement de données et équipement de terminaison de circuit de données pour terminaux fonctionnant en mode paquet et raccordés par circuit spécialisé à des réseaux publics pour données.*
- [b-UIT-T X.75] Recommandation UIT-T X.75 (1996), *Système de signalisation à commutation par paquets entre réseaux publics assurant des services de transmission de données.*
- [b-UIT-T X.137] Recommandation UIT-T X.137 (1997), *Valeurs des performances de disponibilité applicables aux réseaux publics pour données assurant des services internationaux à commutation par paquets.*
- [b-UIT-T Y.1221] Recommandation UIT-T Y.1221 (2002), *Gestion du trafic et des encombrements dans les réseaux en mode IP.*
- [b-IETF RFC 768] IETF RFC 768 (1980), *User Datagram Protocol.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc768.txt>>
- [b-IETF RFC 792] IETF RFC 792 (1981), *Internet Control Message Protocol.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc792.txt>>
- [b-IETF RFC 793] IETF RFC 793 (1981), *Transmission Control Protocol.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>>
- [b-IETF RFC 919] IETF RFC 919 (1984), *Broadcasting Internet Datagrams.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc919.txt>>
- [b-IETF RFC 922] IETF RFC 922 (1984), *Broadcasting Internet datagrams in the presence of subnets.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc922.txt>>
- [b-IETF RFC 950] IETF RFC 950 (1985), *Internet Standard Subnetting Procedure.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc950.txt>>
- [b-IETF RFC 959] IETF RFC 959 (1985), *File Transfer Protocol.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc959.txt>>
- [b-IETF RFC 1305] IETF RFC 1305 (1992), *Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc1305.txt>>
- [b-IETF RFC 1786] IETF RFC 1786 (1995), *Representation of IP Routing Policies in a Routing Registry (ripe-81++).*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc1786.txt>>
- [b-IETF RFC 1812] IETF RFC 1812 (1995), *Requirements for IP Version 4 Routers.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc1812.txt>>
- [b-IETF RFC 2018] IETF RFC 2018 (1996), *TCP Selective Acknowledgment Options.*
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc2018.txt>>

- [b-IETF RFC 2330] IETF RFC 2330 (1998), *Framework for IP Performance Metrics*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc2330.txt>>
- [b-IETF RFC 3148] IETF RFC 3148 (2001), *A Framework for Defining Empirical Bulk Transfer Capacity Metrics*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc3148.txt>>
- [b-IETF RFC 3357] IETF RFC 3357 (2002), *One-way Loss Pattern Sample Metrics*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc3357.txt>>
- [b-IETF RFC 3393] IETF RFC 3393 (2002), *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc3393.txt>>
- [b-IETF RFC 3432] IETF RFC 3432 (2002), *Network performance measurement with periodic streams*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc3432.txt>>
- [b-IETF RFC 3550] IETF RFC 3550 (2003), *RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*.
<<http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>>
- [b-IETF RFC 6576] IETF RFC 6576 (2012), *IP Performance Metrics (IPPM) Standard Advancement Testing*.
<<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6576.txt>>
- [b-IETF RFC 6673] IETF RFC 6673 (2012), *Round-Trip Packet Loss Metrics*.
<<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6673>>
- [b-IETF RFC 7398] IETF RFC 7398 (2015), *A Reference Path and Measurement Points for Large-Scale Measurement of Broadband Performance*.
<<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7398>>
- [b-BEREC] BoR (18) 32: TENDER SPECIFICATIONS, No BEREC/2018/01/OT Net Neutrality Measurement Tool, mars 2018.
- [b-C-298] Kotanis, Irina (2015), *Proposals for E.802 Annex: minimum required of samples, statistical significance for benchmarking and quality trends evaluations and minimum required number of mobile agents, (with revisions)*, ASCOM, Suisse.
- [b-CVST] Krueger, T. and M. Braun (2012), *R package: Fast Cross – Validation via Sequential Testing, version 0.1*.
- [b-Damjanovic] Damjanovic, Welzl et al. (2008), *Extending the TCP Steady-State Throughput Equation for Parallel TCP Flows*, University of Innsbruck, Budapest University of Technology.
<<http://heim.ifi.uio.no/~michawe/research/publications/mulPadhye-TechnicalReport.pdf>>
- [b-Ekelin] Ekelin, S., Nilsson, M., Hartikainen, E., Johnsson, A., Mångs, J., Melander, B., Björkman, M. (2006), *Real-time measurement of end-to-end available bandwidth using kalman filtering*, IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Vancouver, Canada.
- [b-Google-Police] "An Internet-Wide Analysis of Traffic Policing", Flach, Papageorge et al., University of Southern California et Google, 2016.
- [b-Lautenschlaeger] Lautenschlaeger, W. (2014), *A Deterministic TCP Bandwidth Sharing Model*, Bell-Labs Alacatel-Lucent
<<https://arxiv.org/abs/1404.4173>>
- [b-Montgomery] Montgomery, D. (1990), *Introduction to Statistical Quality Control – 2nd edition, ISBN 0-471-51988-X*.

- [b-Morton] Morton, Al (2013), *Improved Internet speed tests can enhance QoS and QoE*, Proceedings of the 4th International Workshop on Perceptual Quality of Systems (PQS 2013), Vienne, Autriche.
- [b-Mou] Mou, M. (2017), *Evaluating a TCP Model-Based Network Performance Measurement Method*, Masters Thèse au MIT, juin 2017.
<<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/113177>>.
- [b-PAM-12] Oana Goga & Renata Teixeira (2012), *Speed Measurements of Residential Internet Access*, Passive and Active Measurements Conference, PAM-12.
<<https://people.mpi-sws.org/~ogoga/papers/PAM12-speed.pdf>>
- [b-Pod12] OPNFV Project, Intel POD12.
<<https://wiki.opnfv.org/display/pharos/Intel+POD12>>
- [b-Prasad] Prasad, R.S., Murray, M., Dovrolis, C., Claffy, K.C. (2003), *Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools*, *IEEE Network*.
- [b-QUIC] "draft-ietf-quic-recovery-11", Iyengar and Swett. work in progress, IETF 2018.
<<https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-quic-recovery/>>
- [b-Rdev] R Development Core Team (2016), *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche. ISBN 3-900051-07-0.
<<http://www.r-project.org/>>
- [b-TST 009] ETSI GS NFV-TST 009 V3.1.1, (2018), *Network Functions Virtualisation (NFV) Release 3; Testing; Specification of Networking Benchmarks and Measurement Methods for NFVI*.
<https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/NFV-TST/001_099/009/03.01.01_60/gs_NFV-TST009v030101p.pdf>
<https://docbox.etsi.org/ISG/NFV/Open/Drafts/TST009_NFVI_Benchmarks>
- [b-Wald] Wald, A. (1947), *Sequential Analysis*, Wiley.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série D	Principes de tarification et de comptabilité et questions de politique générale et d'économie relatives aux télécommunications internationales/TIC
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
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	Environnement et TIC, changement climatique, déchets d'équipements électriques et électroniques, efficacité énergétique; construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	Gestion des télécommunications y compris le RGT et maintenance des réseaux
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 et mesures et tests associés
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, communication entre systèmes ouverts et sécurité
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information, protocole Internet, réseaux de prochaine génération, Internet des objets et villes intelligentes
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication