

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Énergie Matériaux Télécommunications

ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ DU FEC SUR DES TRANSMISSIONS DE DONNÉES AUDIO

Par
Mohamed Sami Knani

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître es Sciences, M.Sc.
en télécommunications

Jury d'évaluation

Président du jury et
Examineur interne

Monsieur Leszek Szczecinski
INRS Énergie Matériaux Télécommunications

Examineur externe

Monsieur Stéphane Coulombe
École de technologie supérieure

Directeur de recherche

Monsieur Jean-Charles Grégoire
INRS Énergie Matériaux Télécommunications

Avant-propos

C'est en aveu de la réussite de ce mémoire que mes sincères mercis se vouent à mon directeur de recherche le professeur Jean-Charles Grégoire pour l'aide qu'il a bien voulu m'accorder tout au long de mes travaux de recherche, sa serviabilité, ses critiques constructives et par-devant tout, ses qualités humaines et morales.

Je remercie également mes collègues de l'INRS que j'ai côtoyés pendant ces deux dernières années et qui n'ont cessé de m'encourager et de m'inspirer pour les travaux de recherche que j'ai accomplis.

C'est aussi avec joie que je témoigne ma reconnaissance aux enseignants qui m'ont soutenu tout au long de mon cursus. Je remercie particulièrement messieurs les membres du jury pour l'attention qu'ils ont bien voulu accorder à ce mémoire.

Finalement, j'exprime ma profonde gratitude à ma famille qui n'a cessé de m'apporter son soutien grâce auquel j'ai réussi à bien mener mes recherches et de surpasser les difficultés que j'ai affrontées.

Résumé

La qualité audio d'un appel utilisant la technologie Voix sur IP est assujettie à plusieurs facteurs, entre autres les pertes de paquets. En effet, ce dernier est un facteur déterminant de la qualité d'un appel Voix sur IP; un taux de pertes élevé peut causer une dégradation énorme de la qualité audio qui peut même rendre la communication impossible.

Des techniques sont utilisées pour remédier à ce problème, on cite entre autres la technique Forward Error Correction (FEC) qui consiste en l'envoi de données redondantes avec le trafic utile. Ces données sont utilisées par le récepteur pour récupérer les paquets perdus. Ces redondances peuvent causer une surcharge du réseau qui peut éventuellement accentuer les pertes et rendre ainsi la communication impossible.

Dans ce travail on se propose d'évaluer l'impact de la transmission de ces données en termes de taux de pertes résiduelles ainsi que la qualité audio sur des flux Voix sur IP. On évalue différents taux de redondance FEC ($2/3$, $3/4$, $4/5$ et $5/6$) avec les codecs Opus et AMR-WB. Différents scénarios ont été testés et pour chacun d'entre eux des conclusions ont été dégagées sur l'utilité des données FEC.

Mots clés : Voix sur IP, correction d'erreur sans voie de retour, taux de pertes, qualité d'expérience, pertes résiduelles, goulot d'étranglement, bande passante.

Abstract

The audio quality of a VoIP communication is subject to several factors, among which we note packet loss. Indeed, it is a determining factor for the quality of a VoIP communication; a high loss rate can cause a huge degradation in the audio quality that can even make the communication impossible.

Many techniques can be used to solve this issue among which we specify the Forward Error Correction (FEC) technique, it consists of sending redundant data with useful traffic. These redundancies are used by the receiver to recover lost packets, however, it can cause network overload that can possibly increase losses and thus make the communication worse.

In this work, we have evaluated the impact of the transmission of this data in terms of residual loss rate and audio quality on VoIP communications. We evaluate different FEC redundancies (2/3, 3/4, 4/5 et 5/6) with Opus and AMR-WB. Different scenarios have been tested for which conclusions were reached on the usefulness of FEC data.

Key-words : VoIP, FEC, In-band FEC, Loss rate, Quality of experience, Residual losses, Bottleneck, Bandwidth.

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Avant-propos | ii |
| Résumé | iii |
| Abstract..... | iv |
| Liste des figures..... | vii |
| Liste des tableaux..... | ix |
| Liste des abréviations | xii |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Problématique | 2 |
| 1.3 Structure du document | 2 |
| COMMUNICATIONS VOIX SUR IP | 5 |
| 2.1 Introduction..... | 5 |
| 2.2 Le codec audio | 5 |
| 2.2.1 Opus | 6 |
| 2.2.2 AMR-WB (adaptive multi-rate wideband) | 8 |
| 2.2.3 EVS..... | 9 |
| 2.3 Évaluation de la qualité d'une transmission audio..... | 10 |
| 2.4 Qualité de service (QoS) | 11 |
| 2.4.1 Bande passante | 12 |
| 2.4.2 Taux de pertes | 12 |
| 2.4.3 La gigue | 13 |
| 2.5 Mécanismes de correction d'erreurs | 13 |
| 2.5.1 FEC (Forward Error Correction) | 14 |
| 2.5.2 Codes correcteurs d'erreurs..... | 14 |
| 2.5.3 Méthode FEC spécifiée dans le RFC 5109..... | 15 |
| 2.5.4 In-band FEC utilisé dans Opus..... | 16 |
| 2.5.5 FEC dans les communications interactives | 16 |
| 2.6 Conclusion..... | 16 |
| PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE..... | 19 |
| 3.1 Bibliographie..... | 19 |
| 3.2 Banc de test | 21 |
| 3.3 Scénario de test..... | 24 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1 Scénario considéré | 25 |
| 3.3.2 Différents cas traités | 29 |
| 3.4 Conclusion..... | 30 |
| EFFICACITÉ DU FEC AVEC OPUS | 31 |
| 4.1 Efficacité du FEC appliqué à des flux Opus | 32 |
| 4.1.1 Efficacité du In-band FEC | 32 |
| 4.1.2 Pertes dans le cas de flux de 20 kbps | 34 |
| 4.1.3. Pertes en rafale dans le cas de flux de 20 kbps | 41 |
| 4.1.4. Pertes dans le cas de flux de 32 kbps | 45 |
| 4.1.5 Pertes en rafale dans le cas de flux de 32 kbps | 48 |
| 4.2 Efficacité du FEC appliqué à des flux Opus en concurrence avec un flux TCP | 48 |
| 4.2.1 Pertes dans le cas de flux de 20 kbps | 49 |
| 4.2.2 Pertes en rafale dans le cas de flux de 20 kbps | 54 |
| 4.2.3 Pertes dans le cas de flux Opus de 32 kbps..... | 58 |
| 4.2.4 Pertes en rafale dans le cas de flux de 32 kbps | 60 |
| 4.3 Conclusion..... | 61 |
| EFFICACITÉ DU FEC AVEC AMR-WB..... | 63 |
| 5.1 Efficacité du FEC appliqué à des flux AMR-WB..... | 63 |
| 5.1.1 Étude des pertes | 63 |
| 5.1.2 Étude des pertes en rafale | 67 |
| 5.2 Efficacité du FEC appliqué à des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP..... | 68 |
| 5.2.1 Étude des pertes | 68 |
| 5.2.2 Étude des pertes en rafale | 71 |
| 5.3 Conclusion..... | 71 |
| CONCLUSION | 73 |
| RÉFÉRENCES | 75 |
| Annexe A | 78 |
| Annexe B | 81 |
| Annexe C | 85 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Illustration de fonctionnement du mécanisme FEC du RFC 5109..... | 15 |
| Figure 3.1 : Banc de test utilisé | 22 |
| Figure 3.2 : Taux de pertes moyen mesuré sur 500 ms en fonction du temps dans le cas de 22 transmissions et un goulot d'étranglement de 750 kbps | 25 |
| Figure 3.3 : Exemple de deux sources de trafic reliées à un goulot d'étranglement | 26 |
| Figure 3.4 : Nombre de paquets dans la file d'attente et récapitulatif des évènements entre les instants $t=50$ s et $t=50.93$ s | 27 |
| Figure 3.5 : Vue plus détaillée du nombre de paquets dans la file et du récapitulatif des évènements entre les instants $t=50.25$ s et $t=50.65$ s..... | 28 |
| Figure 3.6 : Flux utile et flux FEC en fonction du temps | 29 |
| Figure 4.1 : MOS en fonction du taux de pertes pour des taux de pertes compris entre 0 et 30 % | 32 |
| Figure 4.2 : MOS en fonction du taux de pertes pour des taux de pertes compris entre 0 et 5 % | 33 |
| Figure 4.3 : MOS en fonction du taux de pertes dans le cas d'utilisation d'un In-band FEC et dans le cas sans FEC..... | 34 |
| Figure 4.4 : Répartition des pertes sur les flux dans le cas de 235 transmissions et un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps..... | 35 |
| Figure 4.5 : Répartition des pertes sur les flux dans le cas de 22 transmissions et un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps..... | 36 |
| Figure 4.6 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux de 20 kbps envoyés sur un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 37 |
| Figure 4.7 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio envoyés sur un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps et des flux de 20 kbps..... | 39 |
| Figure 4.8 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps..... | 46 |
| Figure 4.9 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps..... | 47 |
| Figure 4.10 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux Opus de 20 kbps dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps..... | 50 |
| Figure 4.11 : Moyenne des taux de pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps..... | 50 |
| Figure 4.12 : Moyenne des taux de pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps | 52 |
| Figure 4.13 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figure 4.14 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 59 |
| Figure 4.15 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps | 60 |
| Figure 5.1 : MOS en fonction du taux de pertes pour des flux audio codés en mode 15.85 kb/s | 64 |
| Figure 5.2 : Moyenne sur tous les flux des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps..... | 65 |
| Figure 5.3 : Moyenne sur tous les flux des pertes résiduelles en fonction du nombre de transmissions avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps..... | 66 |
| Figure 5.4 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 68 |
| Figure 5.5 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 69 |
| Figure 5.6 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps | 70 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 2.1 : Différentes bandes passantes du signal audio et les fréquences d'échantillonnage correspondantes utilisées dans Opus | 7 |
| Tableau 2.2 : Différentes configurations utilisées par Opus et caractéristiques correspondantes | 8 |
| Tableau 2.3 : Différentes bandes passantes du signal audio utilisées dans EVS | 9 |
| Tableau 2.4 : Différents débits de fonctionnement du codec EVS et bande passante audio correspondante | 10 |
| Tableau 2.5 : Valeurs du MOS et perception de la dégradation correspondante | 11 |
| Tableau 3.1 : Débits observés dans pour différents taux de redondance FEC | 29 |
| Tableau 4.1 : Répartition des pertes par palier en fonction du nombre de flux dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps | 38 |
| Tableau 4.2 : Pertes résiduelles en fonction du nombre de flux dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps | 40 |
| Tableau 4.3 : Taux de pertes en rafale (deux pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps | 42 |
| Tableau 4.4 : Taux de pertes en rafale (deux pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps | 43 |
| Tableau 4.5 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps | 44 |
| Tableau 4.6 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps | 45 |
| Tableau 4.7 : Taux de pertes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio concurrents avec un flux TCP | 53 |
| Tableau 4.8 : Taux de pertes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio concurrents avec un flux TCP | 54 |
| Tableau 4.9 : Pertes en rafale (deux pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP | 55 |
| Tableau 4.10 : Pertes en rafale (2 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP | 56 |
| Tableau 4.11 : Pertes en rafale (3 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP | 57 |
| Tableau 4.12 : Pertes en rafale (3 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP | 57 |
| Tableau 5.1 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps (cas de 29 et 30 flux) | 66 |

| | |
|---|-----|
| Tableau C.1 : Pertes résiduelles en fonction du nombre de flux de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps | 85 |
| Tableau C.2 : Pertes résiduelles dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps | 86 |
| Tableau C.3 : Taux de pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps | 87 |
| Tableau C.4 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps | 88 |
| Tableau C.5 : Pertes en fonction du nombre de flux de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps | 89 |
| Tableau C.6 : Pertes en fonction du nombre de flux de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps..... | 90 |
| Tableau C.7 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps | 90 |
| Tableau C.8 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps | 91 |
| Tableau C.9 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps..... | 92 |
| Tableau C.10 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps..... | 93 |
| Tableau C.11 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 94 |
| Tableau C.12 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps | 94 |
| Tableau C.13 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 95 |
| Tableau C.14 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps | 95 |
| Tableau C.15 : Pertes dans le cas de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP et un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps | 96 |
| Tableau C.16 : Pertes dans le cas de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP et d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps | 97 |
| Tableau C.17 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps, des flux audio AMR-WB en concurrence avec un flux TCP | 98 |
| Tableau C.18 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps, des flux audio AMR-WB en concurrence avec un flux TCP | 99 |
| Tableau C.19 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps; des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP ... | 100 |

Tableau C.20 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps; des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP...101

Liste des abréviations

| | |
|------|---------------------------------------|
| ARQ | Automatic Repeat Request |
| CBR | Constant Bitrate |
| CELT | Constrained Energy Lapped Transform |
| ECC | Error Correcting Codes |
| ECU | Error Concealment Unit |
| EVS | Enhanced voice services |
| FEC | Forward Error Correction |
| FIFO | First In, First Out |
| FTP | File Transfer Protocol |
| IP | Internet Protocol |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| ISP | Internet Service Provider |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LBRR | Low Bitrate Redundancy |
| MOS | Mean Opinion Score |
| NACK | Negative Acknowledgment |
| OTT | Over The Top |
| PESQ | Perceptual Evaluation Speech Quality |
| PSTN | Public Switched Telephone Network |
| QoE | Quality of Experience |
| QoS | Quality of Service |
| RTP | Real-Time Transport Protocol |
| RTCP | Real-Time Transport Control Protocol |

| | |
|------|-----------------------------------|
| SSRC | Synchronization Source Identifier |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| UDP | User Datagram Protocol |
| VAD | Voice Activity Detection |
| VBR | Variable Bitrate |
| VoIP | Voice Over IP |

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Motivation

L'apparition de la première application Voix sur IP *speak freely* date de 1991 [1], et depuis lors, ce type de service a connu un grand essor. Grâce à son efficacité et son coût relativement moins élevé par rapport aux réseaux de téléphonie commutés, les entreprises tendent de plus en plus à utiliser le service Voix sur IP ou en anglais « Voice Over IP » (VoIP) au lieu du service de téléphonie ordinaire. La contribution à la croissance économique ou sa valeur ajoutée est prévue à 15.3 % annuelle jusqu'à 2017, et ceci malgré les difficultés que connaît l'économie mondiale [2], de plus on prévoit que le nombre d'utilisateurs de cette technologie atteindra 1 milliard en 2017 [3].

Contrairement au service de téléphonie commuté, le service Voix sur IP peut être moins fiable dans les déploiements sur Internet étant donné que ce dernier est un réseau meilleur effort ou « best-effort » en anglais, ce qui n'est pas le cas du réseau téléphonique commuté orienté connexion de circuits réels. Cela fait que les services de communications Voix sur IP sont confrontés aux contraintes de qualité de services, qui sont entre autres pertes, délais et gigue. Cependant les services Voix sur IP continuent à rapporter un revenu énorme pour les fournisseurs de services « Over The Top » (OTT); le meilleur exemple est celui de Skype qui a rapporté un revenu égal à 406.2 millions de dollars en 2010 et avait un nombre d'utilisateurs actifs de 300 millions en janvier 2016 [4].

1.2 Problématique

Les services Voix sur IP, même s'ils ne sont pas très exigeants en termes de bande passante par rapport aux applications de communications vidéo, ont cependant certaines exigences en termes de qualité d'expérience, car une qualité audio très basse peut rendre la conversation entre deux interlocuteurs difficile, voire même impossible. De nombreux facteurs influent sur la qualité d'expérience dans une conversation Voix sur IP, dont la qualité de service et bien entendu les techniques de codage utilisées, on cite entre autres les codecs et les techniques de correction d'erreurs.

Parmi les codecs les plus utilisés en Voix sur IP on note le codec Opus et le codec AMR-WB, ce dernier étant la norme pour les réseaux cellulaires. Dans le cadre de ce travail, des analyses ont été effectuées sur des flux de données codées avec ces deux codecs à 20 kbps et 32 kbps pour Opus et 15.85 kbps pour AMR-WB auxquels on a rajouté des flux « Forward Error Correction » (FEC) de différents taux.

Le but de l'étude est la détermination des situations où FEC est efficace ainsi que la quantification de son utilité. Afin d'y parvenir, on détermine les taux de pertes résiduelles subies par différents flux en concurrence sur un goulot d'étranglement. Les facteurs pris en compte au cours de cette étude sont le nombre de flux en concurrence, la capacité du lien de goulot d'étranglement et le taux de redondance FEC. On a aussi réalisé l'étude dans le cas d'un trafic TCP en concurrence avec des flux audio.

La raison pour laquelle on a adopté cette façon de faire est le fait que cela s'approche d'une situation pratique qui est celle de plusieurs utilisateurs se trouvant sur un même réseau local d'où ils sont connectés à Internet à travers un même nœud du réseau (routeur). En pratique, le trafic de chacun des utilisateurs est imprévisible, mais on prend les cas cités plus hauts afin de simplifier l'étude. En premier lieu, on suppose que chaque utilisateur passe un appel Voix sur IP; dans une autre cas d'étude, on suppose avoir un utilisateur qui émet un trafic TCP sur le réseau pendant que les autres passent des appels Voix sur IP.

1.3 Structure du document

Afin de communiquer le travail réalisé et les résultats obtenus, ce document est structuré comme suit :

- le chapitre 2 explique le fonctionnement des communications Voix sur IP, les codecs audio utilisés ainsi que leurs caractéristiques, la qualité de service et les métriques utilisées pour son évaluation. Enfin, on passe en revue les mécanismes de correction d'erreurs où on détaille le fonctionnement de la méthode spécifiée dans le RFC 5109 qui a été utilisée dans ce travail.
- le chapitre 3 détaille le banc de test utilisé ainsi que le scénario considéré et les différents cas traités.
- le chapitre 4 comporte les résultats obtenus relativement à l'efficacité du FEC avec Opus à différents taux de redondance, capacité du lien de goulot d'étranglement, débit et type de file d'attente.
- Le chapitre 5 présente et analyse les résultats obtenus relativement à l'efficacité du FEC avec le codec AMR-WB.
- le chapitre 6 conclut ce document en résumant les travaux effectués, les résultats obtenus et des perspectives sur la poursuite de ce travail.

Chapitre 2

COMMUNICATIONS VOIX SUR IP

2.1 Introduction

Le réseau Internet a été conçu à l'origine pour l'échange de fichiers ou de courriels. Les réseaux de téléphonie en circuits commutés « Public Switched Telephone Network » (PSTN) ont longtemps été dédiés à l'échange du trafic voix. Cependant, avec le développement de nouvelles applications de communications en temps réel, les échanges de trafic voix sur le réseau Internet sont apparus et étant donné leur coût très faible par rapport aux services de téléphonie commutés, ils se sont généralisés et font désormais une concurrence sans précédent aux services de téléphonie classiques, au risque même de la disparition de ces services.

Voix sur IP est un ensemble de technologies qui permettent d'assurer une communication vocale et des sessions multimédia sur un réseau IP comme l'Internet. Les systèmes Voix sur IP utilisent des mécanismes de signalisation afin de contrôler l'établissement et l'interruption des communications et des protocoles de distribution spécialisés comme UDP et RTP/RTCP pour acheminer les données audio.

2.2 Le codec audio

Un codec audio est un algorithme qui permet de faire des compressions et décompressions de données audio d'un fichier ou d'un flux audio donné; à travers l'opération de codage, le codec réduit la taille de données brutes permettant ainsi de réduire l'utilisation de l'espace de stockage ou l'utilisation de la bande passante. La qualité audio des données encodées par un codec audio dépend de plusieurs facteurs, entre autres de la nature du réseau sur lequel le flux est transmis

et du codec utilisé, car certains codecs sont plus adaptés à une catégorie de réseaux en particulier comme Opus qui est plus adapté aux réseaux utilisant la technologie IP ou le codec GSM-HR qui est plus adapté aux réseaux GSM. Ceci est dû à la différence des méthodes de transmission entre ces deux catégories de réseaux où le réseau Internet repose sur la commutation de paquets et le réseau GSM sur la commutation de circuits.

La qualité dépend aussi fondamentalement du débit de codage, où pour un codec bien déterminé la qualité s'améliore au fur et à mesure que le débit augmente. On note aussi le mode de codage : à débit constant « Constant Bitrate » (CBR) ou à débit variable « Variable Bitrate » (VBR) qui joue aussi un rôle déterminant dans la qualité des données encodées.

On parle ici du codec Opus qui est une évolution des codecs fonctionnant sur les réseaux à commutation de paquets. Ce codec a été conçu pour fonctionner avec les applications audio interactives [5] entre autres les applications Voix sur IP d'où son appellation de « codec audio interactif ». On traite aussi les codecs AMR-WB et EVS développés conformément aux spécifications du projet 3GPP comme évolution aux codecs utilisés dans les réseaux à commutation de circuits.

Il existe de nombreux autres codecs, mais étant donné l'utilisation très répandue des codecs Opus dans beaucoup d'applications VoIP comme Skype et WebRTC et de AMR-WB dans les communications cellulaires notre étude se limite à ces deux codecs.

2.2.1 Opus

Opus est un codec audio interactif libre de redevances, conçu pour satisfaire les exigences de l'utilisation d'un codec audio dans l'Internet, tel que spécifié par l'IETF [5]. En effet, avant Opus, il y a eu de nombreux codecs dont certains étaient libres et d'autres non, mais qui n'arrivaient pas à satisfaire les exigences requises, qui sont relatives à la qualité, la fréquence d'échantillonnage, le délai, le débit et la robustesse aux pertes, par exemple l'IETF exige dans [5] une qualité audio acceptable jusqu'à un taux de pertes de 5 % et une bonne intelligibilité à 15 % de pertes.

Les travaux sur la création d'Opus se sont faits dans le cadre de la création d'un codec pouvant satisfaire ces exigences particulières, en plus d'offrir de nombreux points opérationnels. En effet Opus fonctionne à différentes bandes passantes et la qualité audio s'améliore d'autant plus que

la bande passante est élevée (en supposant que les autres paramètres restent inchangés). Il est basé sur l'intégration des deux codecs, SILK et CELT qui lui confèrent l'aptitude de fonctionner à différentes bandes passantes (tableau 2.1) et avec différentes qualités audio. SILK est adapté à la transmission et à l'enregistrement de la composante voix et utilise les fréquences d'échantillonnages 8, 12, 16 ou 24 kHz et un débit de transmission compris entre 6 et 40 kbps. Un des avantages que présente SILK est la capacité d'avoir un délai algorithmique relativement faible. CELT est plutôt adapté aux transmissions et enregistrements audio; il a la possibilité d'encoder les données audio en mono et stéréo et il est utilisé pour le transfert de toute sorte de données audio. CELT a une fréquence d'échantillonnage comprise entre 32 kHz et 48 kHz et un débit de transmission compris entre 24 kbps et 128 kbps par canal.

Relativement à d'autres codecs comme Ogg vorbis et HE-AAC, Opus aurait révélé de meilleures performances en termes de qualité par bande passante utilisée [6].

Tableau 2.1 : Différentes bandes passantes du signal audio et les fréquences d'échantillonnage correspondantes utilisées dans Opus

| Abréviations | Bande passante audio | Fréquence d'échantillonnage |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| NB (narrowband) | 4 kHz | 8 kHz |
| MB (medium-band) | 6 kHz | 12 kHz |
| WB (wideband) | 8 kHz | 16 kHz |
| SWB (superwideband) | 12 kHz | 24 kHz |
| FB (fullband) | 20 kHz | 48 kHz |

Opus donne également la possibilité de choisir entre différentes tailles de trames, ce qui donne les différentes configurations des paquets présentés ci-dessous (tableau 2.2) :

Tableau 2.2 : Différentes configurations utilisées par Opus et caractéristiques correspondantes

| Numéro | Mode | Bande passante | Taille de trames |
|---------------|-------------|-----------------------|-------------------------|
| 0...3 | SILK | NB | 10, 20, 40, 60 ms |
| 4...7 | SILK | MB | 10, 20, 40, 60 ms |
| 8...11 | SILK | WB | 10, 20, 40, 60 ms |
| 12...13 | hybride | SWB | 10, 20 ms |
| 14...15 | hybride | FB | 10, 20 ms |
| 16...19 | CELT | NB | 2.5, 5, 10, 20 ms |
| 20...23 | CELT | WB | 2.5, 5, 10, 20 ms |
| 24...27 | CELT | SWB | 2.5, 5, 10, 20 ms |
| 28...31 | CELT | FB | 2.5, 5, 10, 20 ms |

2.2.2 AMR-WB (adaptive multi-rate wideband)

AMR-WB est un codec qui est défini par la spécification TS 26.190 du partenariat de groupes d'associations de télécommunications 3GPP [7]. Comme son nom l'indique, ce codec est destiné à traiter les signaux de composante voix en large bande (50-6400 Hz pour tous les modes et jusqu'à 7000 Hz pour le mode 23.85 kb/s). Le codec AMR-WB peut opérer à différents débits dans la plage 6.6 kb/s à 23.85 kb/s : 6.6, 8.85, 12.65, 14.25, 15.85, 18.25, 19.85, 23.05 et 23.85 kb/s. Afin de réduire la complexité de l'implémentation du codec dans les terminaux d'un réseau téléphonique vocal à commutation de circuits et dans les réseaux 3GPP, le nombre de modes obligatoires du codec AMR-WB a été restreint à 5 : 23.85, 15.85, 12.65, 8.85 et 6.6 kb/s. L'intervalle inter-paquet spécifié est de 20 ms pour tous les modes.

2.2.3 EVS

Le codec EVS a été développé dans le cadre des travaux du groupe 3GPP dans le but de créer un successeur à AMR qui fonctionne sur plusieurs débits [8], optimisé pour la transmission de signaux de composante voix aussi bien que la musique comme dans le cas d'Opus. Ce codec comporte un mécanisme de contrôle de débit à la source et comprend un système de détection d'activité et de génération de bruit de confort pour remédier aux erreurs de transmission et aux pertes de paquets.

Un des avantages qu'offre EVS est l'interopérabilité avec AMR-WB sur les 9 modes de fonctionnement de ce dernier et aussi la possibilité de fonctionnement sur plusieurs bandes passantes audio (tableaux 2.3 et 2.4)

Tableau 2.3 : Différentes bandes passantes du signal audio utilisées dans EVS

| Abréviations | Bande passante audio |
|---------------------|-----------------------------|
| NB | 4 kHz |
| WB | 8 kHz |
| SWB | 16 kHz |
| FB | 20 kHz |

Tableau 2.4 : Différents débits de fonctionnement du codec EVS et bande passante audio correspondante

| Débit audio | Bande passante |
|--------------------|-----------------------|
| 5.9 kbps | NB, WB |
| 7.2 kbps | NB, WB |
| 8 kbps | NB, WB |
| 9.6 kbps | NB, WB, SWB |
| 13.2 kbps | NB, WB, SWB |
| 16.4 kbps | NB, WB, SWB, FB |
| 24.4 kbps | NB, WB, SWB, FB |
| 32 kbps | WB, SWB, FB |
| 48 kbps | WB, SWB, FB |
| 64 kbps | WB, SWB, FB |
| 96 kbps | WB, SWB, FB |
| 128 kbps | WB, SWB, FB |

2.3 Évaluation de la qualité d'une transmission audio

Le « Mean Opinion Score » (MOS) est une note d'évaluation de la qualité audio utilisée dans le domaine des réseaux de télécommunications afin d'évaluer la qualité des données audio reçues. Cet outil a été normalisé par l'ITU dans la recommandation P862 [9]. Le calcul de ce score est réalisé à l'aide du standard PESQ spécifié aussi dans la même recommandation. PESQ donne une prédiction de la qualité perçue par des sujets participants à une évaluation subjective du signal en question en comparant le signal original avec le signal dégradé.

PESQ comporte une extension qui permet d'évaluer les signaux audio de large bande (16 kHz comme fréquence d'échantillonnage) spécifiée dans la recommandation P862.2 de l'ITU [10].

Le MOS donne un score compris entre 1 et 5, avec 5 comme meilleure qualité possible et 1 où la dégradation est la plus perceptible; le tableau 2.5 résume les différentes valeurs du MOS et la perception de la dégradation correspondante :

Tableau 2.5 : Valeurs du MOS et perception de la dégradation correspondante

| MOS | qualité | dégradation |
|------------|----------------|------------------------------|
| 5 | excellent | imperceptible |
| 4 | bon | perceptible mais pas agaçant |
| 3 | moyen | un peu agaçant |
| 2 | mauvais | agaçant |
| 1 | très mauvais | très agaçant |

2.4 Qualité de service (QoS)

L'ITU définit la qualité de service en [11] comme étant l'ensemble des caractéristiques d'un service de télécommunications qui lui confèrent la capacité de satisfaire les besoins déclarés et implicites d'un utilisateur de ce service. Dans le domaine des réseaux informatiques et des autres réseaux à commutation de paquets, le terme qualité de service se réfère à la capacité d'attribuer différentes priorités à différentes applications, utilisateurs ou flux de données ou à garantir un certain niveau de performances à un flux de données.

Le réseau Internet présente des conditions généralement imprévisibles qui dépendent du nombre d'applications actives et des ressources utilisées, de la nature du réseau. L'opérateur ou le « Internet Service Provider » (ISP) a aussi une influence sur les conditions du réseau. Ces

différents facteurs peuvent causer des dégradations aux services utilisant Internet. La tolérance à ces artéfacts dépend de la nature du trafic.

La dégradation de la qualité de service peut être causée par des pertes de paquets qui sont dues à la saturation d'une file d'attente d'un nœud, et par suite la perte des nouveaux paquets, ou encore par des délais variables causés par le temps passé dans la file d'attente.

Les principales métriques de la qualité de service sont la bande passante, le taux de pertes et la gigue.

Dans une communication Voix sur IP, le délai est une métrique de qualité de service de grande importance : afin d'avoir une bonne qualité le délai maximal unidirectionnel désiré est de 150 ms. Une fois que le délai d'aller-retour dépasse 250 ms, les utilisateurs commencent à remarquer le délai; avec un délai supérieur à 500 ms, la conversation devient impossible.

2.4.1 Bande passante

La bande passante est le débit maximal qui peut être atteint dans un lien de transmission, exprimé en bits par secondes (bps). Cette métrique mesure la quantité maximale de données qui peuvent être acheminées à travers un lien de communications. Souvent, les flux de données passent à travers plusieurs liens de communication ce qui fait que le lien de plus petite capacité devient ce qu'on appelle un goulot d'étranglement.

Aussi, on note qu'une bande passante insuffisante pour le bon fonctionnement d'une application peut engendrer des artéfacts de celle-ci ou même son arrêt de fonctionnement.

2.4.2 Taux de pertes

On définit le taux de pertes comme étant le taux de paquets qui n'ont pas réussi à atteindre leur destination par rapport à tous les paquets envoyés [12]. Étant donné la variabilité de la taille de paquets, la mesure du taux de pertes est une métrique imparfaite. Les pertes dans l'Internet sont généralement causées par la congestion de réseaux : le passage d'un flux de données par un lien dont la capacité est inférieure à son débit engendre la mise en attente des paquets face au

goulot d'étranglement; une fois que la file devient saturée, les nouveaux paquets reçus sont rejetés ce qui se traduit par des pertes de paquets. Les pertes de paquets peuvent être aussi dues à la faiblesse d'un signal radio par rapport à la distance à parcourir ou à l'effet d'évanouissement de canal comme c'est le cas avec les réseaux cellulaires, ou tout simplement à des problèmes de routage.

Dans une communication audiovisuelle, le taux de pertes cause une dégradation des transmissions : la qualité de la communication est d'autant moins appréciée par les utilisateurs que le taux de pertes est plus élevé, et qui peut même rendre la communication impossible. En effet la perte de paquets dans une conférence audiovisuelle fait que des portions de la discussion ne parviennent pas à l'interlocuteur. Les codecs ont une robustesse variable aux pertes; pour certains codecs comme G.729 un faible taux de pertes égal à 1 % engendre des erreurs perceptibles à l'écoute et peut même rendre la conversation impossible [13] contrairement à Opus qui offre une qualité audio assez bonne même pour un taux de pertes allant jusqu'à 5 %.

2.4.3 La gigue

La gigue est définie par l'IETF en [14] comme étant la différence de délais de transmission entre deux paquets bien déterminés et en deux points de mesure (source et destination).

La gigue peut causer une dégradation assez élevée de la qualité audio ou vidéo et ceci est dû au fait qu'une gigue assez élevée peut causer des délais de communications inacceptables et que l'ordre d'arrivée des paquets peut alors être différent de l'ordre dans lequel ils ont été envoyés. Afin d'y remédier, une mémoire tampon ou en anglais « jitter buffer » est utilisée au niveau du récepteur.

2.5 Mécanismes de correction d'erreurs

La tolérance aux pertes de paquets dépend de l'application utilisée. Certaines applications comme FTP et HTTP sont moins tolérantes aux pertes, où aucune perte n'est tolérée [15], ce qui fait qu'un mécanisme de retransmission est utilisé avec ces services. D'autres applications sont plus tolérantes aux pertes comme les applications de communications audio-vidéo, où un faible

taux de pertes est acceptable. Cependant, des pertes trop élevées peuvent causer des artéfacts qui dégradent la qualité de la communication et peuvent même rendre cette dernière impossible. La retransmission des paquets perdus peut causer des délais qu'on ne peut pas se permettre dans une communication interactive, ce qui fait que des techniques de correction d'erreurs adaptées ont été conçues à cette fin. Ces techniques sont appelées en anglais « Forward Error Correction » ou FEC.

2.5.1 FEC (Forward Error Correction)

La technique FEC consiste à générer et ajouter au niveau d'un émetteur de l'information redondante à un flux média. La redondance permet au récepteur de détecter et de corriger les éventuelles erreurs au niveau du flux reçu sans avoir besoin de demander une retransmission au récepteur contrairement à d'autres techniques de correction d'erreurs basées sur la retransmission.

Les premiers algorithmes de correction d'erreurs appelés codes de Hamming ont été publiés en 1950 et demeurent d'usage jusqu'à ce jour-ci dans plusieurs applications entre autres la mémoire à codes correcteurs d'erreurs ou en anglais « Error Correcting Codes » (ECC).

2.5.2 Codes correcteurs d'erreurs

En supposant que n est le nombre d'unités de données totales envoyées et que k est le nombre d'unités de données primaires, le rapport $\frac{k}{n}$ est appelé le taux de codage. Un taux de codage de $\frac{2}{3}$ signifie que pour 2 unités de données à transmettre il faut envoyer 3 unités. Le nombre d'unités de données redondantes est $(n - k)$ et le surcoût ou en anglais « overhead » est égal à $\frac{n-k}{k}$. Le surcoût quantifie la redondance relativement aux unités de données du message primaire, donc cette grandeur nous renseigne sur l'utilisation supplémentaire de la bande passante.

2.5.3 Méthode FEC spécifiée dans le RFC 5109

Cette méthode se base sur la génération de données à l'aide de simples opérations de parité, donc une charge de calcul peu élevée et par suite des délais de processeurs relativement faibles.

Le principe de base de cette méthode est la création de paquets de redondance à partir d'au moins deux paquets de données originaux et ceci se fait en appliquant l'opération OU exclusif sur l'ensemble des bits du paquet (figure 2.1).

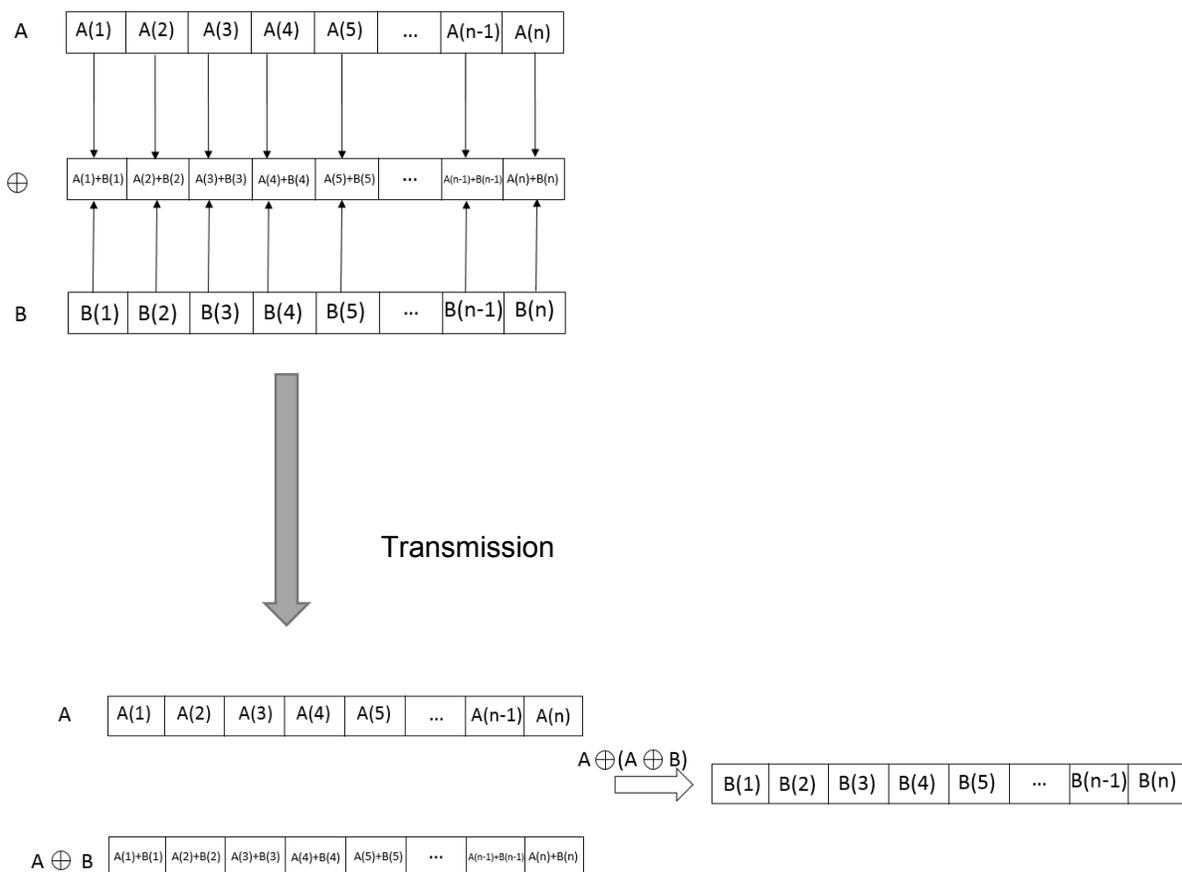


Figure 2.1 : Illustration de fonctionnement du mécanisme FEC du RFC 5109

La raison de notre intérêt pour la méthode FEC du RFC 5109 est son délai faible qui est dû au fait que sa charge de calcul est relativement basse. Ceci est bien entendu la conséquence de la simplicité de l'opération de parité sur laquelle repose cette méthode.

2.5.4 In-band FEC utilisé dans Opus

Le codec Opus utilise des données FEC qui lui sont spécifiques ou ce qu'on appelle In-band FEC insérées dans le trafic audio envoyé.

Il s'agit d'une copie de la trame audio antérieure codée à un débit, et donc une qualité, plus faible.

2.5.5 FEC dans les communications interactives

En communications interactives on a la possibilité d'envoyer les données FEC dans un flux RTP indépendant avec un SSRC et type de contenu différent [16]. Cette technique a l'avantage de la flexibilité, mais présente l'inconvénient du surcoût des entêtes, IP, UDP, FEC header et RTP. Par exemple un paquet Opus codé en mode CBR à 20 kbps a une charge utile de 50 octets. Le flux FEC correspondant a comme taille effective des paquets FEC (générés conformément au mécanisme spécifié dans RFC 5109) de 50 octets. En ajoutant les entêtes évoquées, la taille totale sera de 114 octets, et cela peut causer une surcharge du lien. Une autre approche est d'inclure les données FEC dans le même paquet que les données média; ces données peuvent couvrir plusieurs paquets antérieurs au paquet présent.

Notons que l'intérêt essentiel du In-band FEC est de réduire le surcoût; contrairement à out-of-band FEC qui, à cause des entêtes de paquets risque d'engendrer des surcharges élevées du lien de transmission.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les codecs audio qui nous intéressent dans cette étude et qui sont Opus, AMR-WB et EVS. On a aussi vu la méthode utilisée pour évaluer la qualité d'une transmission audio ainsi que les métriques utilisées pour évaluer la qualité de service d'un moyen de télécommunications.

On a détaillé les techniques de correction d'erreur en se focalisant particulièrement sur la technique FEC étant donné que c'est la technique qui nous intéresse dans cette étude; en

particulier la méthode spécifiée dans le RFC 5109, appréciée pour sa faible latence, mais dont l'efficacité est limitée. On se propose d'étudier à quel point ce manque d'efficacité est un handicap en pratique.

Chapitre 3

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Nous décrivons dans cette partie le banc de test, qui doit nous permettre de transmettre plusieurs flux audio provenant de différentes sources ainsi que les données FEC correspondantes à travers un goulot d'étranglement. Les sources transmettent les données audio à débit constant (mode CBR) et prédéfini selon le débit de codage utilisé. Le nombre de sources est un paramètre variable du banc de test, nous allons le changer tout au long de ce travail; de même pour les délais inter-paquets des flux FEC étant donné que c'est ce paramètre qui nous permet de contrôler le taux de redondance.

Nous détaillons aussi dans cette partie le scénario considéré dans l'étude de performance, les instants de début de transmissions ainsi que les instants entre lesquels on mesure les métriques étudiées. Le scénario considéré consiste en plusieurs flux audio qui commencent quasi instantanément et avec les flux FEC correspondants; ces transmissions durent pendant toute la simulation. La concurrence entre les différents flux sur les ressources disponibles au niveau du goulot d'étranglement engendre des pertes de paquets. Les flux FEC sont utilisés pour y remédier au prix d'un surcoût qui peut être considérable empirant ainsi les choses [16]. Ce scénario va ainsi nous permettre de mesurer à quel point cette technique est efficace pour réduire les pertes de paquets de flux audio.

3.1 Bibliographie

Dans les travaux réalisés en [17] les auteurs ont déterminé les seuils à partir desquels il est préférable de passer d'un débit de codage Opus à un autre parmi les débits suivants : 8 kbps, 14 kbps et 20 kbps. On a étudié les dégradations subies par un flux audio Opus en concurrence avec un trafic de perturbation; on a ainsi présenté les taux de pertes en fonction du débit de trafic de perturbation et par suite les MOS correspondants. Grâce aux graphiques représentant le MOS en fonction du trafic de perturbation, les auteurs ont défini des seuils où des débits de codage réalisent une qualité audio meilleure que celle réalisée par un débit de codage plus élevé.

Ces points d'intersection entre courbes représentant le MOS ont ainsi été définis comme étant les seuils au-delà desquels il est préférable de passer à un débit de codage moins élevé.

Les problèmes tels que la congestion, trafics audio concurrents, et le bruit de canal introduisent des erreurs de transmission. Dans des situations pareilles, la réduction du débit audio peut être insuffisante pour améliorer la qualité audio. FEC peut ainsi être utilisé afin d'optimiser la redondance de la transmission audio selon les conditions du réseau.

Il existe deux catégories de mécanismes FEC : mécanisme FEC indépendant du type de média transmis, qui utilise des algorithmes génériques pour générer des redondances qui sont utilisées par le récepteur pour récupérer les données perdues. Cette technique a comme inconvénient les délais qui risquent de devenir élevés compromettant ainsi la communication audio. Le FEC spécifique au média consiste à coder les paquets audio à qualité moins élevée dans un paquet suivant. Cette technique a pour avantage le fait qu'on a une latence moins élevée, mais peut éventuellement causer un problème de complexité des calculs.

Dans [18] une solution intermédiaire entre ces deux approches est discutée, où on a appliqué le mécanisme FEC aux trames AMR jugées importantes. Les méthodes utilisées pour analyser les trames sont : la mesure de stationnarité par l'encodeur ou encore le composant de détection d'activité en anglais « Voice Activity Detector » (VAD) et la difficulté de récupérer les paquets par une unité d'annulation d'erreur ou en anglais « Error Concealment Unit » (ECU).

Une autre solution possible est un mécanisme adaptatif implémenté dans [19] qui fonctionne par l'activation ou la désactivation d'un mécanisme FEC autour d'un seuil du taux de pertes subi par le flux audio.

Dans [20] on présente les différentes études réalisées où le FEC a été utilisé comme paramètre ajustable ainsi que les différents types de feed-back et les métriques de décision. Les auteurs de l'article ont ainsi souligné l'importance des pertes consécutives pour l'évaluation de la capacité d'une technique FEC à améliorer une communication Voix sur IP. De plus, on y a souligné l'importance de la redondance par rapport à la réduction du débit de codage pour l'amélioration de la robustesse aux pertes de paquets. FEC peut ainsi être utilisé pour optimiser le débit de transmission par rapport aux conditions du réseau. On insiste aussi sur l'importance des délais résultants de l'utilisation d'un mécanisme FEC générique par rapport à ceux dans le cas de mécanisme FEC spécifique au format audio utilisé.

Les délais et les pertes de paquets sont ainsi soulignés comme des facteurs interdépendants qui influent sur la qualité d'une transmission audio. Par conséquent, on voit la nécessité de considérer

une métrique qui combine ces deux facteurs. C'est dans cette perspective que plusieurs études utilisent MOS comme métrique de décision.

Dans [16] et [20] on insiste sur l'importance du surcoût qui peut être causé par l'ajout de paquets FEC à une communication Voix sur IP. En effet, l'ajout de ces paquets à un flux de données peut dans certaines circonstances augmenter les pertes et par suite empirer la communication.

C'est dans cette optique que l'on se propose de déterminer l'impact de l'ajout de données FEC à des flux de données audio en concurrence sur un lien de goulot d'étranglement pour différents codecs, débits de codage et taux de redondance FEC.

3.2 Banc de test

Une file d'attente de type FIFO a été utilisée étant donné son utilisation très répandue sur le réseau Internet.

Le banc de test (figure 3.1) consiste en un certain nombre de sources de trafic UDP qui transmettent des flux audio concurrents à travers un lien de goulot d'étranglement. On sous-entend par flux concurrents des flux qui proviennent de sources différentes et qui passent à travers un même lien du réseau; si la somme des débits entrants est supérieure à la bande passante du lien, cela crée une congestion et par suite un goulot d'étranglement au niveau de ce lien.

Deux capacités du lien du goulot d'étranglement ont été testées : 750 kbps et 7.5 Mbps.

Les simulations ont été réalisées sur NS2, étant donné sa popularité au sein du milieu de la recherche scientifique, sa facilité d'utilisation et sa flexibilité à supporter différents protocoles et types de réseaux.

Le script NS2 utilisé est joint à l'annexe A.

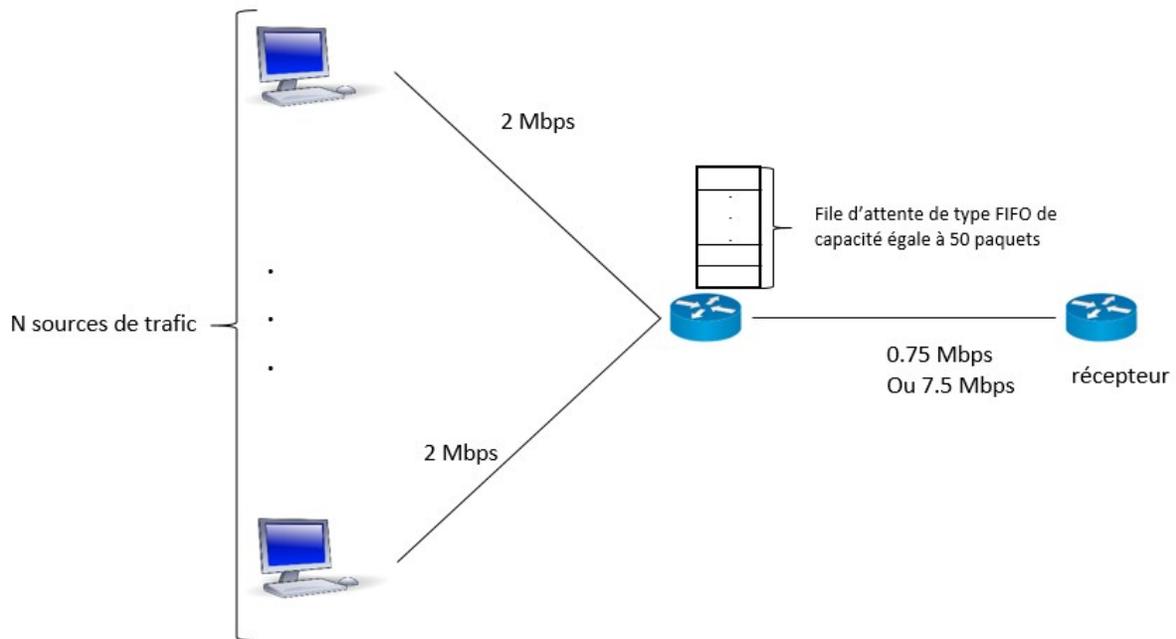


Figure 3.1 : Banc de test utilisé

La capacité de la file d'attente a été fixée à 50 paquets. Des investigations plus approfondies ont prouvé que la taille de file d'attente n'a pas d'effets sur les résultats obtenus, ce qui est tout à fait prévisible étant donné que les mesures des taux de pertes sont effectuées au cours d'un régime permanent.

Dans le cas d'Opus chaque source est supposée transmettre un flux audio codé par le codec Opus en mode CBR et à un débit utile de 20 kbps ou 32 kbps (des paquets de tailles respectivement égales à 50 octets et 80 octets). On rajoute à la charge utile les entêtes de paquets IP, UDP et RTP, de tailles respectivement 20, 8 et 12 octets correspondants à un flux média usuel. Cela fait que les paquets émis sont de taille 90 octets pour un flux de 20 kbps, ou encore un débit observé égal à 36 kbps. Les paquets émis pour des flux de 32 kbps sont de taille 120 octets, soit un débit observé de 48 kbps. Pour AMR-WB chaque source transmet un trafic de 15.85 kbps; les investigations du flux résultant du codage dans ce mode nous ont conduits à déduire que la charge utile d'un paquet émis est de 38 octets. En tenant compte des entêtes (IP, UDP et RTP) les paquets émis sont de taille 78 octets avec un intervalle inter-paquet de 20 ms conformément à [7] qui spécifie que l'intervalle inter-paquet d'AMR-WB est de 20 ms indépendamment du mode utilisé.

Par la suite on rajoute un flux FEC, généré conformément au RFC 5109. Dans [21] on précise que la taille de l'entête FEC est de 10 octets et celle de l'entête du niveau de protection 0 est de 4 octets, ce qui fait que la taille totale d'un paquet FEC généré conformément au RFC 5109 dans le cas présent est égale à celle d'un paquet de données primaires auquel on rajoute 14 octets.

Dans notre simulation, le flux FEC est envoyé par un autre nœud du réseau : un paquet taille de 104 octets est envoyé au même moment après le k-ème paquet du flux média (k dépend du taux de redondance) pour Opus avec des flux de 20 kbps, taille de 134 octets pour des flux Opus de 32 kbps, et 92 octets pour AMR-WB.

L'envoi des paquets FEC par un autre nœud du réseau ne doit rien changer aux résultats obtenus par rapport au cas d'une seule source du moment qu'on a des liens vers le goulot d'étranglement de même délai.

Le calcul du taux de pertes et du taux de pertes résiduelles est réalisé grâce au script awk présenté dans l'annexe [B](#).

Afin d'évaluer les qualités perceptuelles, les taux de pertes ainsi obtenus ont été appliqués à des codages de 5 échantillons audio grâce aux outils « Opus tools » disponibles en [22] et pour AMR-WB appliqué à un flux généré à l'aide d'un pipeline GStreamer qui encode les données audio et les transmet sur la boucle locale.

La raison pour laquelle on a choisi de faire l'évaluation de la qualité sur plusieurs échantillons est le fait que l'évaluation de la qualité perceptuelle dépend de l'échantillon audio en question. Pour avoir une évaluation objective de la qualité perceptuelle, la diversification des échantillons est indispensable.

Les échantillons utilisés dans cette étude sont ceux proposés par l'ITU dans [23] et aussi l'échantillon de référence spécifié dans le site web d'Opus [22]. Les échantillons spécifiés dans [23] consistent en deux échantillons de voix masculines et deux de voix féminines en anglais américain, de durées entre 7 et 8 secondes de fréquence d'échantillonnage égale à 16 kHz. L'échantillon spécifié dans [22] est de durée 10 secondes, mais comporte un mélange de voix masculines et féminines de fréquence d'échantillonnage égale à 32 kHz.

Les fichiers audio contenant un In-band FEC ont été codés et décodés en prenant en considération un taux de pertes correspondant à la valeur définie sur le lien.

L'évaluation de la qualité perceptuelle a été réalisée à l'aide de l'outil PESQ WB, grâce auquel on calcule le MOS en prenant comme fichier de référence le fichier audio d'origine. On calcule la moyenne sur les 5 échantillons considérés.

L'évaluation de la qualité a été réalisée en appliquant des pertes aléatoires sur des flux audio transmis à l'aide de GStreamer sur la boucle locale. On a vu que la moyenne des MOS est invariante à 10^{-2} près en répétant l'expérience 500 fois, ce qui fait qu'on a choisi d'évaluer le MOS en utilisant la moyenne calculée sur 500 fichiers audio résultants par échantillon.

3.3 Scénario de test

Les sources commencent à transmettre à un instant t proche de 0 et s'arrêtent à $t=61$ s. Le taux de pertes est mesuré entre les instants $t=30$ s et $t=60$ s. On détermine le pourcentage de paquets perdus de toutes les sources de trafic.

La raison pour laquelle on mesure le taux de pertes entre ces deux instants est le fait que le système passe par une période qui dure quelques secondes où la file d'attente n'est pas encore saturée, suivi par un régime transitoire qui dure quelques millisecondes. Ensuite, on atteint un régime stationnaire où le taux de pertes suit une périodicité apparente sur laquelle nous reviendrons; ci-dessous (figure 3.2), on représente le taux de pertes moyen mesuré sur 500 ms en fonction du temps dans le cas de 22 sources de 20 kbps et un goulot d'étranglement de 750 kbps. On voit qu'entre les instants $t=9.403$ s et $t=9.743$ s on a un régime transitoire où une augmentation du taux de pertes est évidente. Après cet instant, le taux de pertes suit un régime permanent où le taux de pertes varie de façon périodique.

Il en découle qu'il faut mesurer le taux de pertes sur un régime permanent et avec un grand nombre de multiples de la période afin d'éviter les erreurs de mesure.

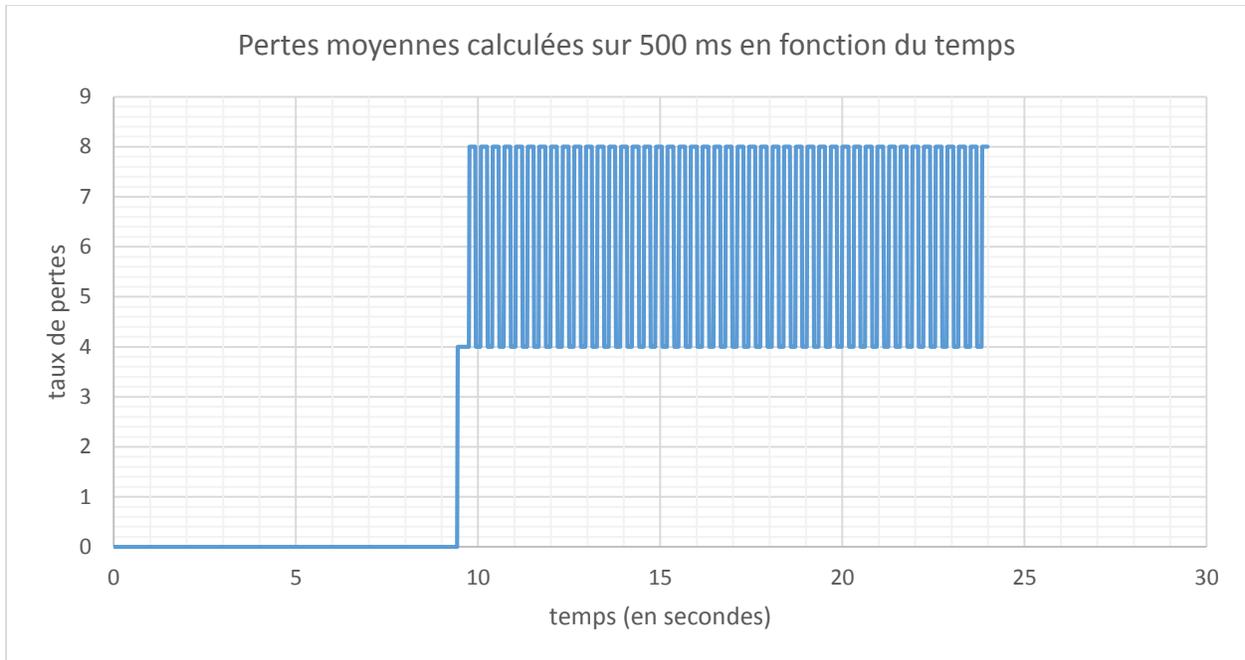


Figure 3.2 : Taux de pertes moyen mesuré sur 500 ms en fonction du temps dans le cas de 22 transmissions et un goulot d'étranglement de 750 kbps

3.3.1 Scénario considéré

Dans le cas d'un goulot d'étranglement de type FIFO, l'alignement des flux est un facteur déterminant sur les taux de pertes. En effet deux flux de mêmes caractéristiques (débit, tailles des paquets...), mais en déphasage l'un par rapport à l'autre subissent des pertes inégales.

Afin de mieux expliquer le phénomène d'alignement des flux, prenons l'exemple ci-dessous (figure 3.3) :

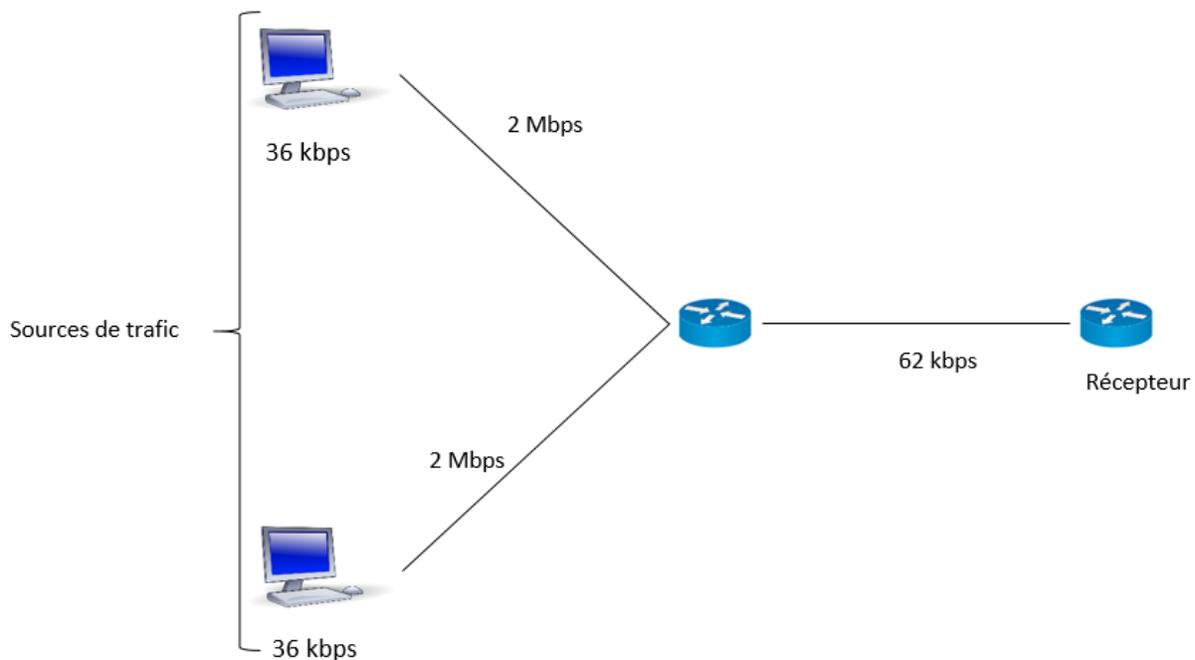


Figure 3.3 : Exemple de deux sources de trafic reliées à un goulot d'étranglement

Pour simplifier l'explication on a décidé de se contenter de deux sources de trafic qui transmettent à un débit de 36 kbps chacune et un lien goulot d'étranglement de capacité égale à 62 kbps.

Les sources transmettent chacune des paquets de taille 90 octets, ce qui correspond à un délai inter-paquets de 20 ms.

La source 1 commence à transmettre à $t=0$, et la source 2 commence à partir de $t=10$ ms. Les deux sources s'arrêtent à $t=61$ s, et le taux de pertes est mesuré entre les instants $t=30$ s et $t=60$ s.

L'analyse du nombre de paquets dans la file d'attente et des événements d'arrivée et de pertes de paquets dans la file d'attente en régime permanent nous a permis d'expliquer les résultats obtenus.

En effet sur les figures [3.4](#) et [3.5](#) on voit un phénomène de battement dû à la périodicité des arrivées des paquets à la file et aux départs de paquets. Plus précisément, on a une période d'une durée de 360 ms; sur cette période 35 paquets sont reçus : 30 paquets sont mis dans la file d'attente et 5 sont perdus à cause de la saturation de la file, deux paquets perdus proviennent

du flux 1 et 3 paquets du flux 2. Ce comportement se répète tout au long de la simulation. C'est cette périodicité qui a engendré une disproportion au niveau des pertes entre les flux (16.64 % pour le flux 2 et 11.2 % pour le flux 1).

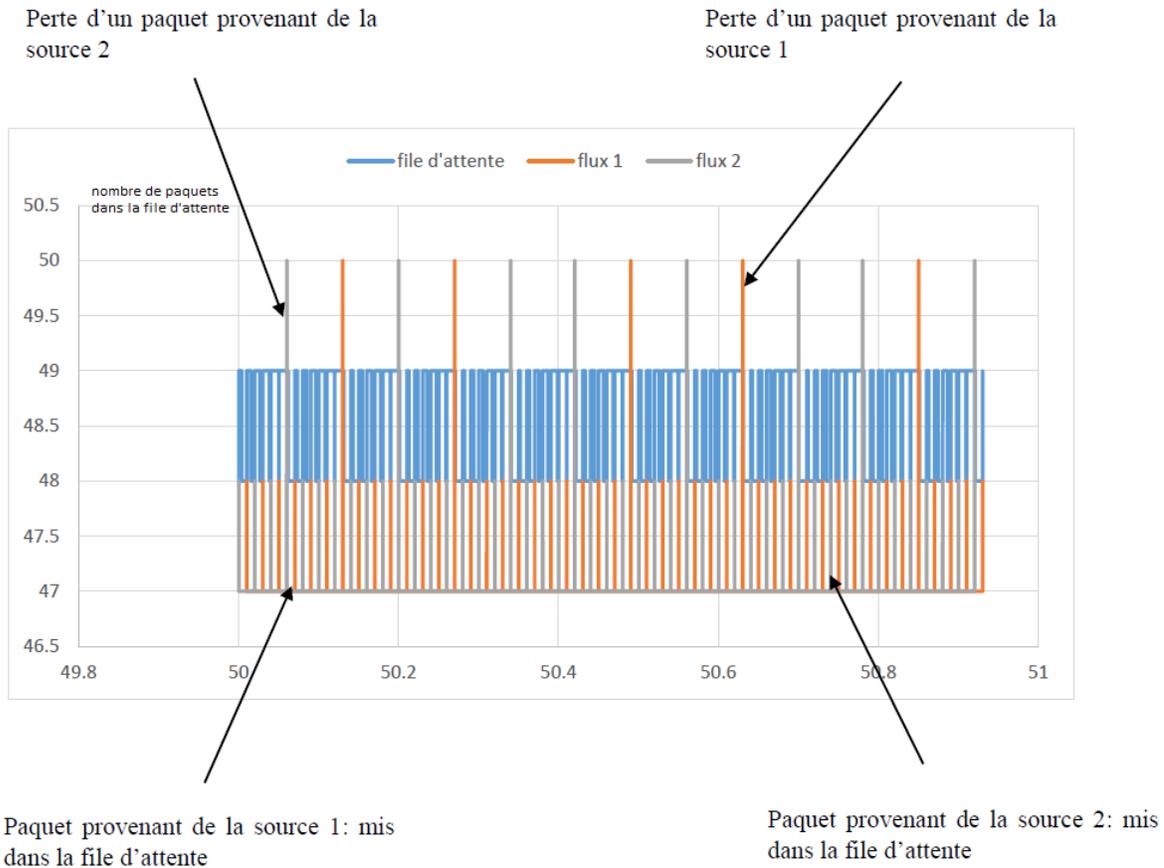
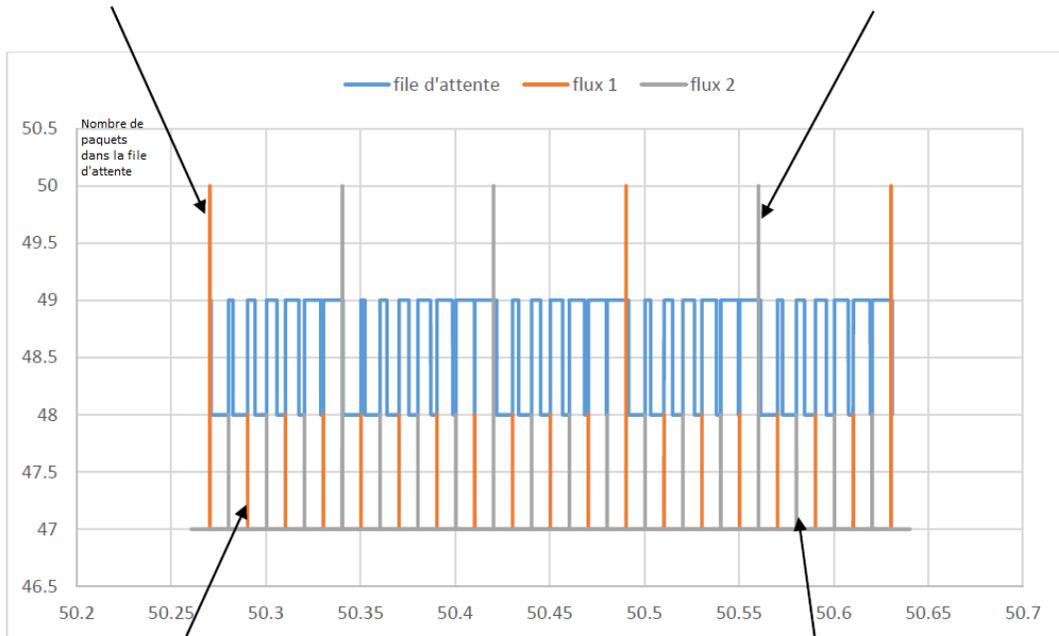


Figure 3.4 : Nombre de paquets dans la file d'attente et récapitulatif des événements entre les instants $t=50$ s et $t=50.93$ s

Perte d'un paquet provenant de la source 1

Perte d'un paquet provenant de la source 2



Paquet provenant de la source 1 : reçu et mis dans la file d'attente

Paquet provenant de la source 2 : reçu et mis dans la file d'attente

Figure 3.5 : Vue plus détaillée du nombre de paquets dans la file et du récapitulatif des évènements entre les instants $t=50.25$ s et $t=50.65$ s

Les paquets de certaines sources sont plus défavorisés que d'autres parce qu'ils arrivent plus fréquemment à une file saturée. On en déduit donc que les déphasages entre sources ont un impact important sur l'hétérogénéité des pertes dans le cas d'une file FIFO. Idéalement, afin de réduire cette hétérogénéité, il faut disperser au maximum les instants de début de transmission des sources; c'est la solution à laquelle on a eu recours dans ce travail où les instants de début de transmission sont décalés de $20 \text{ ms}/n$ (où n est le nombre de sources) comme schématisé à la figure [3.6](#).

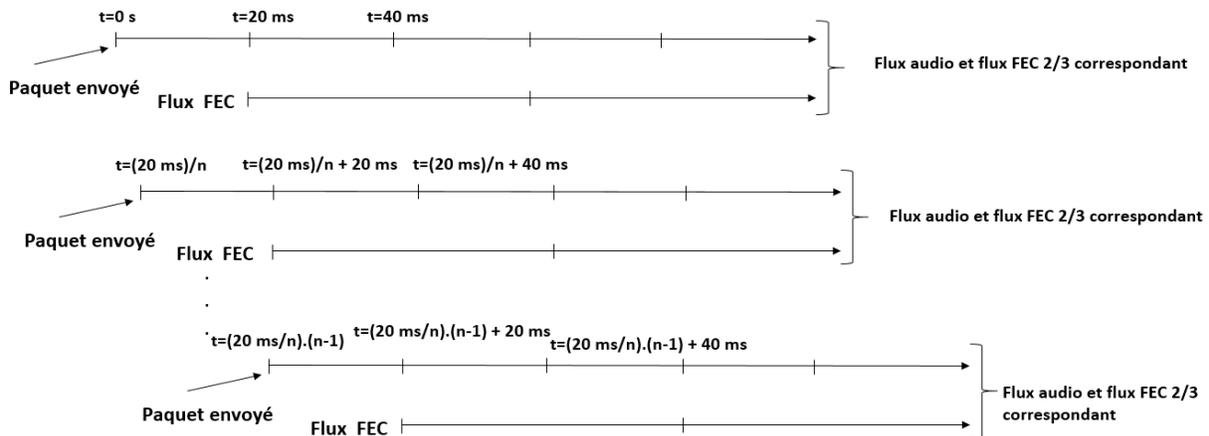


Figure 3.6 : Flux utile et flux FEC en fonction du temps

3.3.2 Différents cas traités

Au cours de cette étude différents cas ont été traités : les cas de flux Opus de débit 20 kbps et 32 kbps, et bien entendu le cas de flux audio codés avec le codec AMR-WB en mode 15.85 kbps. L'autre paramètre pris en considération est le taux de redondance FEC où on va considérer les taux 2/3, 3/4, 4/5 et 5/6. Le tableau 3.1 présente les débits observés selon les taux de redondance, le codec et le débit de codage.

Tableau 3.1 : Débits observés dans pour différents taux de redondance FEC

| Type de flux | Flux Opus de 20 kbps | Flux Opus de 32 kbps | Flux AMR-WB en mode 15.85 |
|--------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| Sans FEC | 36 kbps | 48 kbps | 31.2 kbps |
| FEC 2/3 | 56.8 kbps | 74.8 kbps | 49.6 kbps |
| FEC 3/4 | 49.87 kbps | 65.87 kbps | 43.47 kbps |
| FEC 4/5 | 46.4 kbps | 61.4 kbps | 40.4 kbps |
| FEC 5/6 | 44.32 kbps | 58.72 kbps | 38.56 kbps |

En premier lieu, on prend le cas simple de transmissions des flux audio, ensuite on y ajoute un trafic TCP provenant d'une application FTP se trouvant sur un nœud supplémentaire. Dans ce cas, on se contentera d'étudier les nombres de flux inférieurs aux seuils de saturation, car on verra plus tard en détail qu'on obtient un comportement parfaitement semblable à celui sans un flux TCP après ce seuil.

L'étude a été réalisée dans ces différents cas où on a étudié la moyenne des pertes résiduelles calculées sur tous les flux aussi bien que la répartition des pertes résiduelles sur les intervalles [0-2], [2-5], [5-10] et [10-20], ensuite on a réalisé l'étude sur les pertes en rafale dans ces différents cas.

Les tableaux récapitulatifs des répartitions de pertes comportent 5 nombres qui représentent respectivement : le nombre de flux dont les pertes se trouvent dans le palier en question dans le cas où on n'utilise pas de FEC, le nombre de flux en cas d'application de FEC 2/3, FEC 3/4, FEC 4/5 et FEC 5/6.

3.4 Conclusion

Dans cette partie on a détaillé le banc de test que nous avons utilisé dans l'étude ainsi que le scénario étudié et les différents cas traités tout au long de cette étude. On a aussi expliqué le phénomène d'alignement de flux qui est d'une importance fondamentale dans l'analyse des résultats. Finalement nous avons exposé la façon dont les résultats sont présentés tout au long de ce travail.

Par la suite nous allons détailler les performances obtenues en termes de pertes résiduelles et pertes en rafales dans le cas de flux Opus et AMR-WB et, dans différentes situations, les conclusions seront dégagées quant à l'utilité de la technique FEC.

Chapitre 4

EFFICACITÉ DU FEC AVEC OPUS

L'objectif de cette partie est l'évaluation de l'efficacité des flux FEC. On sous-entend par efficacité la capacité de ces flux à réduire les pertes, ainsi que la perceptibilité des pertes résiduelles sur des données audio. Différents taux de redondance ont été testés dans le cas du out-of-band FEC (2/3, 3/4, 4/5, et 5/6).

Les tests comparatifs sur Opus et d'autres codecs ont montré que la qualité audio obtenue à 11 kbps, 15 kbps et 20 kbps par Opus est meilleure que celle d'autres codecs comme Speex et iLBC [17]. De plus le débit 32 kbps montre de très bonnes performances par rapport à d'autres codecs comme G.722.1 et G.719 [24], et c'est le débit utilisé dans l'implémentation de WebRTC [25] d'où notre intérêt à étudier des flux Opus codés à 20 kbps et 32 kbps.

Le passage de plusieurs flux audio vers un lien de goulot d'étranglement cause une saturation de ce dernier. Le seuil de saturation en termes de nombre de flux dépend du codec utilisé ainsi que des techniques de correction d'erreurs.

Dans ce travail on détermine ces seuils ainsi que l'impact en termes de taux de pertes résiduelles sur les flux audio en concurrence sur un lien de goulot d'étranglement pour des nombres de flux audio en concurrence aux alentours du seuil de saturation.

Pour ce faire, on a établi les moyennes des taux de pertes résiduelles sur les flux étudiés ainsi que la répartition des pertes résiduelles sur les flux avec différents taux de redondance FEC. On a aussi étudié la répartition des pertes en rafale subies par ces flux aussi pour différents taux de redondance; les pertes en rafale ou encore les pertes consécutives de paquets ont un effet nuisible sur une communication Voix sur IP étant donné le fait que ce sont des pertes de portions relativement longues des données qui, en nombre élevé peuvent rendre les données audio résultantes incompréhensibles par l'interlocuteur même avec un effort d'intelligibilité par ce dernier.

Pour des fins de concision, on se contente de présenter les résultats au complet juste pour le cas de flux de 20 kbps; les résultats obtenus dans les autres cas sont joints dans l'annexe [C](#).

4.1 Efficacité du FEC appliqué à des flux Opus

4.1.1 Efficacité du In-band FEC

Ici on a comparé le MOS en fonction du taux de pertes de flux Opus comportant des données audio encodées à 20 kbps par rapport à un codage à 32 kbps ainsi que des flux auxquels on a appliqué un In-band FEC codés à 20 kbps par rapport à des flux audio sans In-band FEC.

Les figures 4.1 et 4.2 représentent l'évolution du MOS en fonction des pertes pour des flux Opus codés à 20 kbps et à 32 kbps.

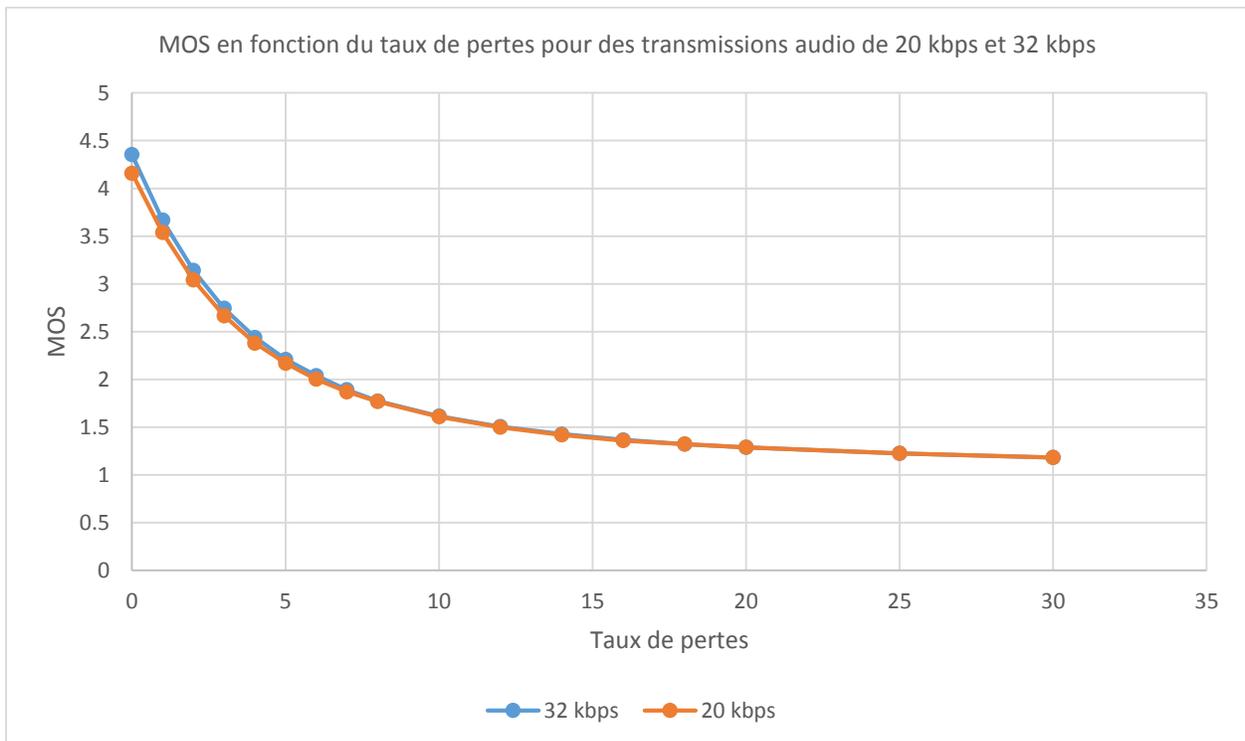


Figure 4.1 : MOS en fonction du taux de pertes pour des taux de pertes compris entre 0 et 30 %

La figure 4.2 montre une petite différence du MOS dans le cas de pertes inférieures à 5 %. Ces différences s'atténuent au fur et à mesure que le taux de pertes augmente jusqu'à devenir pratiquement nulles quand les MOS deviennent quasiment identiques pour les deux débits de codage.

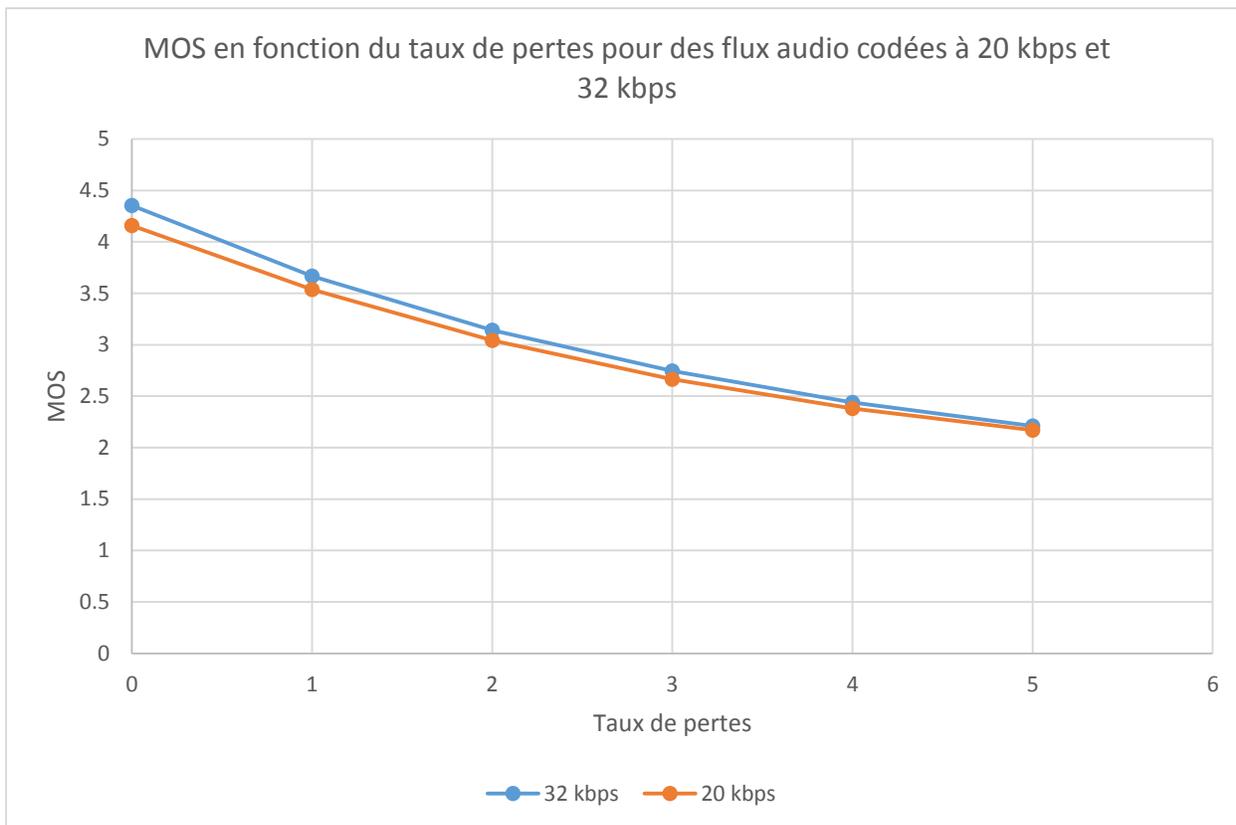


Figure 4.2 : MOS en fonction du taux de pertes pour des taux de pertes compris entre 0 et 5 %

La figure 4.3 représente la variation du MOS en fonction du taux de pertes dans le cas où on utilise un In-band FEC et dans le cas sans FEC avec des flux Opus codés à 20 kbps.

On voit que le MOS dans le cas d'utilisation d'un In-band FEC est inférieur à celui sans FEC; cela s'explique par le fait qu'on utilise une donnée redondante de moindre qualité alors qu'on a gardé un même débit de codage de 20 kbps. On en conclut donc que l'ajout de données In-band FEC à un flux Opus en mode CBR n'améliore pas la qualité audio.

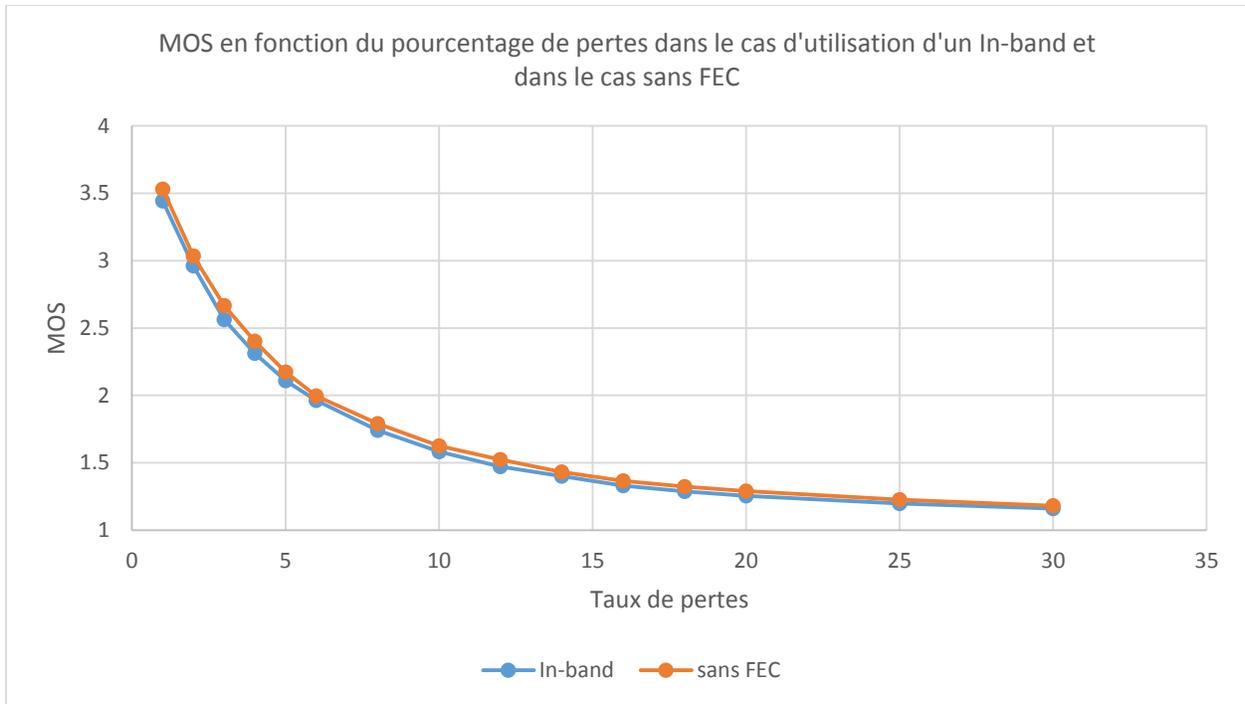


Figure 4.3 : MOS en fonction du taux de pertes dans le cas d'utilisation d'un In-band FEC et dans le cas sans FEC

4.1.2 Pertes dans le cas de flux de 20 kbps

On évalue l'efficacité du FEC à différents taux de redondance, et ceci en premier lieu en étudiant les moyennes des pertes résiduelles sur tous les flux en fonction du nombre de transmissions à différents taux de redondance.

Cependant on a vu que la répartition des pertes entre les flux est inéquitable, ce qui est expliqué en 3.2.1. Ci-dessous (figures 4.4 et 4.5), on prend deux exemples de l'histogramme de répartition des pertes, dans le cas de 22 flux Opus passant par un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps et de 235 flux Opus de 20 kbps passant par un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps. On voit dans le cas de 235 transmissions que 155 flux ne subissent pas de pertes alors que 80 flux subissent un taux de pertes égal à 33.33 %. De même pour le cas de 22 flux on voit que 15 flux ne subissent pas de pertes alors que les 7 autres en subissent à un niveau de 16.67 %. En prenant en considération le débit utile, on trouve un débit total de 440 kbps, ce qui est inférieur à la capacité du goulot d'étranglement. L'explication du fait qu'on ait une congestion est que le surcoût des entêtes rajoute une charge supplémentaire à savoir qu'on a un débit observé de 36

kpbs par flux, ce qui fait un total de 792 kpbs : largement supérieur à la capacité du lien de 750 kbps.

On a donc présenté les plages de pertes pour les différents flux par des tableaux qui récapitulent la distribution des pertes par paliers : [0-2] qui correspond en termes de MOS à l'intervalle [3-4]; l'intervalle de pertes [2-5] correspond à un MOS compris entre 3 et 2.17; [5-10] correspond en termes de MOS à l'intervalle [2.17; 1.62]; l'intervalle [10-20] correspond à un MOS compris entre 1.62 et 1.29. Bien entendu des pertes plus élevées correspondent à un MOS plus bas que 1.29.

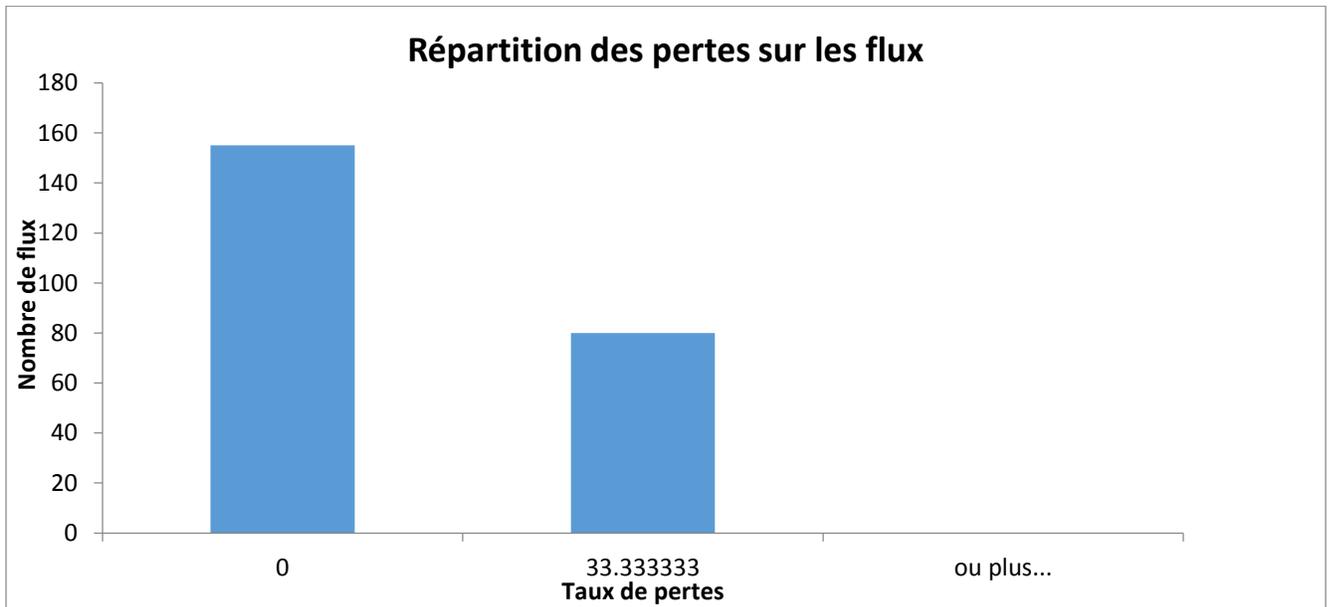


Figure 4.4 : Répartition des pertes sur les flux dans le cas de 235 transmissions et un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

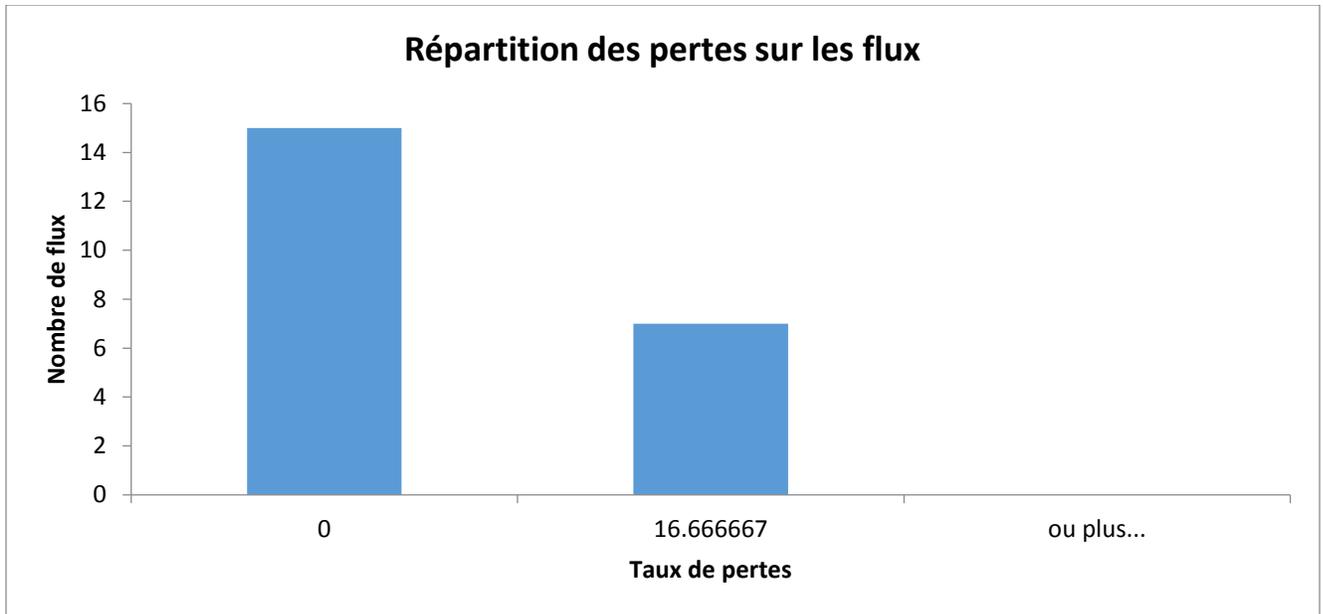


Figure 4.5 : Répartition des pertes sur les flux dans le cas de 22 transmissions et un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

La figure 4.6 présente la moyenne des pertes résiduelles sur tous les flux en fonction du nombre de flux. On voit que les taux de pertes résiduelles gardent toujours des valeurs supérieures ou égales à celles obtenues par des flux ordinaires sans FEC. Les valeurs des pertes résiduelles sont très proches les unes des autres, mais il n'empêche qu'à partir de 26 transmissions on voit une certaine distinction entre les valeurs du taux de pertes résiduelles des différents taux de redondance où FEC 4/5 montre une efficacité légèrement meilleure que FEC 5/6, suivi par FEC 2/3 et enfin le FEC 3/4 qui prouve la meilleure efficacité, très proche de celle des flux sans FEC.

Notons que cette moyenne n'a pas de valeur pratique étant donné les fortes disparités entre les flux qui ont des pertes et ceux qui n'en ont pas et nous ne l'utiliserons qu'à titre indicatif. Pour cette raison on va passer à une autre présentation où on présente dans des tableaux les nombres de flux par marges de pertes et par taux de redondance FEC.

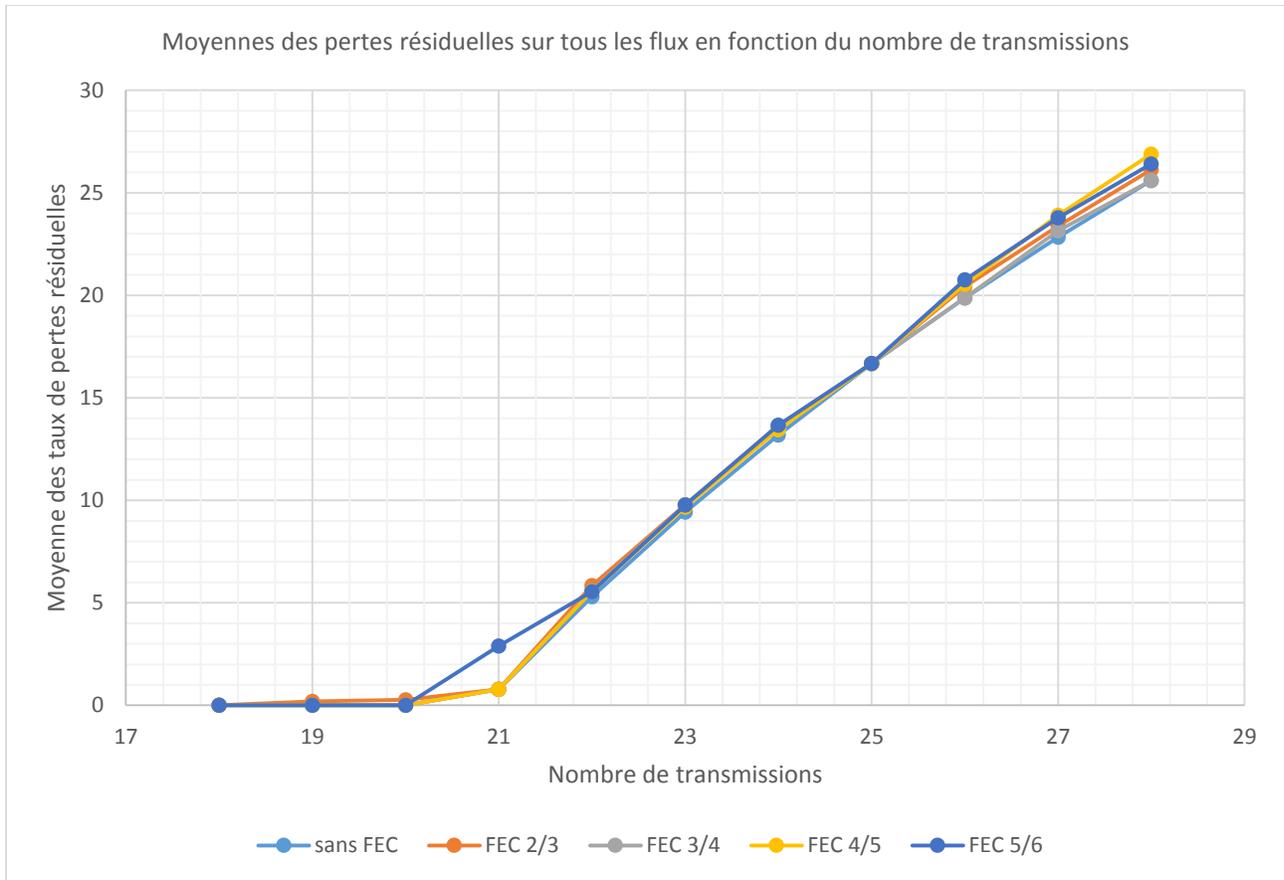


Figure 4.6 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux de 20 kbps envoyés sur un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

La distribution des pertes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps est présentée dans le tableau [4.1](#) où chaque élément de la table est une séquence de chiffres dont le premier nombre dans une colonne bien déterminée présente le nombre de flux dans la marge de pertes correspondante dans le cas sans FEC, le deuxième montre le nombre de flux dans le cas où FEC 2/3 est utilisé, par la suite on présente le nombre de flux avec FEC 3/4, le quatrième nombre est celui des flux avec FEC 4/5 et finalement on a le nombre de flux avec FEC 5/6.

Tableau 4.1 : Répartition des pertes par palier en fonction du nombre de flux dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

| nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| 18 | 18 18 18 18 18 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 19 18 19 19 19 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 20 19 20 20 20 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 20 20 20 20 17 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 2 | 1 1 1 1 2 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 15 2 1 2 4 | 0 8 8 9 2 | 0 8 13 8 15 | 7 4 0 3 1 | 0 0 0 0 0 |
| 23 | 10 0 0 0 0 | 0 6 1 5 0 | 0 3 11 8 15 | 13 14 11 10 8 | 0 0 0 0 0 |
| 24 | 5 0 0 0 0 | 0 1 0 4 0 | 0 8 0 5 1 | 19 13 24 15 23 | 0 0 0 0 0 |
| 25 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 25 25 25 25 25 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 2 0 0 0 | 21 10 21 8 15 | 5 14 5 18 11 |
| 27 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 | 17 11 4 2 0 | 10 15 23 25 27 |
| 28 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 13 8 13 3 0 | 15 20 15 25 28 |
| 29 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 9 1 0 1 0 | 20 28 29 28 29 |
| 30 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 5 1 0 0 0 | 25 29 30 30 30 |
| 31 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 1 1 0 0 0 | 30 30 31 31 31 |

Les résultats obtenus montrent que les flux FEC sont d'une efficacité limitée pour maintenir les pertes résiduelles dans une marge raisonnable comme en témoigne le cas de 22 transmissions où le flux FEC 2/3 garde les pertes résiduelles de deux flux audio dans l'intervalle [0-2] alors que sans FEC on en a 15 dans cet intervalle. Cependant, des différences entre les taux de redondance ont été constatées où pour un nombre limité de flux, les taux de redondance élevés sont plus efficaces comme dans le cas de 22 flux audio où le FEC 5/6 parvient à garder les pertes résiduelles de 4 flux audio dans l'intervalle [0-2] alors que le FEC 2/3 en garde juste deux dans cet intervalle.

En contrepartie, on voit que pour des nombres assez élevés de flux audio cette tendance est inversée comme c'est le cas de 27 et 28 flux où le FEC 2/3 a respectivement 15 et 20 flux avec des taux de pertes supérieurs à 20 % et le FEC 5/6 a la totalité des flux avec des taux de pertes dans cet intervalle.

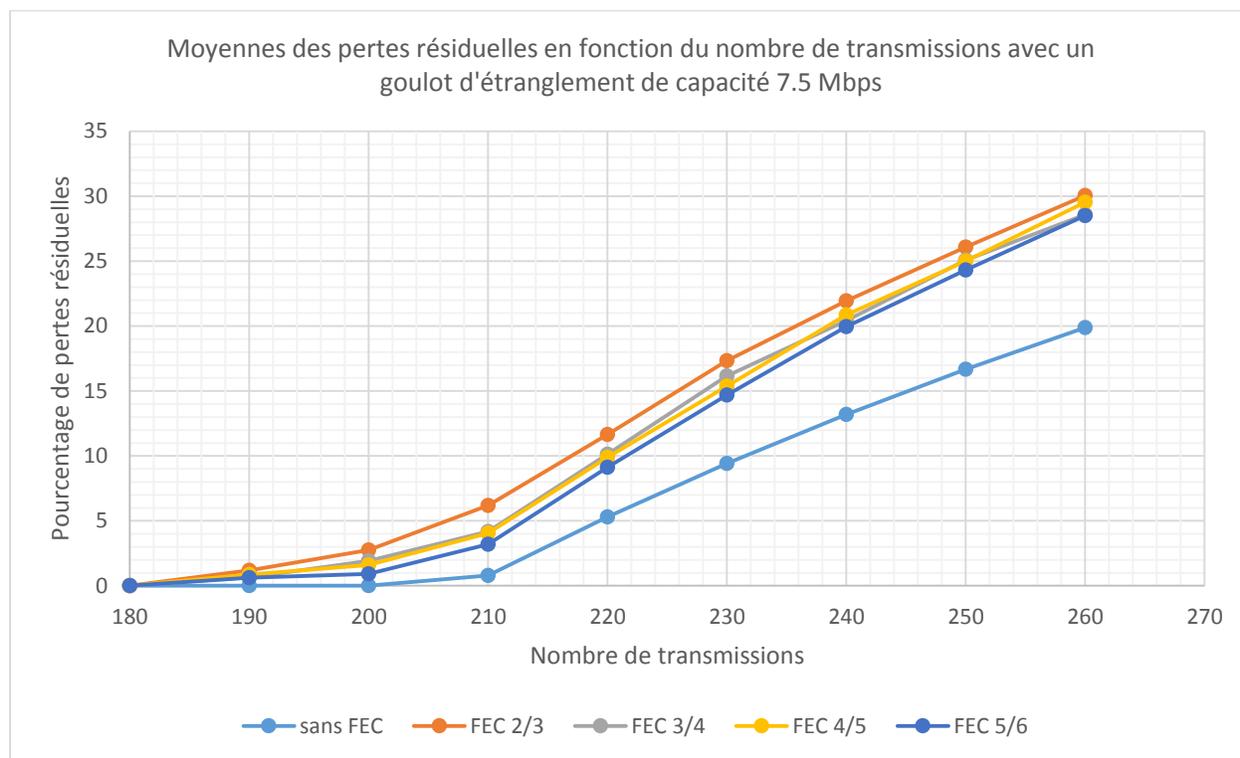


Figure 4.7 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio envoyés sur un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps et des flux de 20 kbps

Les résultats obtenus avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps (figure 4.7) montrent que les taux de pertes résiduelles sont largement supérieurs aux taux de pertes sans utilisation du FEC, d'où on voit que le FEC devient de moins en moins utile, voire même nuisible, au fur et à mesure que le nombre de transmissions et la capacité du goulot d'étranglement sont plus élevés. On note aussi que les pertes résiduelles sont très proches les unes des autres pour différents taux de redondance, et c'est la même tendance qui a été observée dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps. Bien entendu cela s'explique par le fait que le gain que l'on peut réaliser à l'aide des données FEC est compromis par la saturation de réseau causée par le surcoût.

Tableau 4.2 : Pertes résiduelles en fonction du nombre de flux dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|------------------|---------------------|
| 190 | 190 150 158 184 184 | 0 35 31 0 0 | 0 5 1 0 0 | 0 0 0 0 6 | 0 0 0 6 0 |
| 195 | 195 187 181 175 188 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 20 0 | 0 0 14 0 7 | 0 8 0 0 0 |
| 200 | 200 164 144 24 164 | 0 0 37 12 35 | 0 0 15 105 1 | 0 30 4 59 0 | 0 6 0 0 0 |
| 205 | 205 127 195 9 198 | 0 0 0 7 0 | 0 53 0 104 0 | 0 19 0 83 7 | 0 6 10 2 0 |
| 210 | 205 105 152 16 94 | 0 0 0 0 48 | 0 57 0 64 56 | 0 28 39 113 12 | 5 20 19 17 0 |
| 215 | 195 157 118 0 136 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 46 40 | 0 0 62 159 24 | 20 58 35 10 15 |
| 220 | 185 97 44 0 45 | 0 0 0 1 42 | 0 0 60 26 70 | 0 66 82 160 54 | 35 57 34 33 9 |
| 225 | 175 98 14 0 31 | 0 0 35 0 36 | 0 0 62 6 52 | 0 79 84 159 82 | 50 48 30 60 24 |
| 230 | 161 47 3 0 10 | 0 0 7 0 16 | 0 29 41 1 45 | 0 47 116 123 106 | 64 107 63 106 53 |
| 235 | 155 8 24 0 0 | 0 0 0 0 5 | 0 25 58 0 27 | 0 110 71 79 142 | 80 92 82 156 61 |
| 240 | 145 2 142 0 0 | 0 6 0 0 0 | 0 16 0 0 1 | 0 77 0 46 130 | 95 139 98 194 109 |
| 245 | 135 45 2 3 2 | 0 0 7 0 5 | 0 0 13 15 38 | 0 53 73 82 92 | 110 147 150 145 108 |

L'étude de la répartition des pertes sur les flux (tableau 4.2) confirme que les flux FEC n'aident pas à diminuer les pertes résiduelles, comme on le voit au niveau du nombre de flux subissant un taux de pertes résiduelles compris entre 0 % et 2 % où les transmissions sans FEC ont le nombre le plus élevé. Cependant, le nombre de flux montrant un taux de pertes résiduelles dans cet intervalle diffère selon le taux de redondance avec une tendance à être plus élevé pour FEC 5/6 pour un nombre relativement faible de flux audio en concurrence par rapport aux autres taux de redondance. Par exemple, on voit que dans le cas de 205 flux on a 127 flux dans cette catégorie avec FEC 2/3 contre 195 flux avec FEC 3/4, 9 flux avec FEC 4/5 et 198 flux avec FEC

5/6. On voit que cette tendance s'inverse au fur et à mesure que le nombre de flux audio augmente et au-delà du seuil de 215 flux on a un nombre plus élevé de flux dans l'intervalle [0-2] pour le FEC 2/3. Cela est aussi le cas avec 225 flux où 98 flux audio se trouvent dans l'intervalle [0-2] pour le FEC 2/3, 14 flux dans l'intervalle [2-5] pour FEC 3/4, aucun flux dans l'intervalle [5-10] pour FEC 4/5 et 31 flux de pertes supérieures à 20 % pour FEC 5/6.

4.1.3. Pertes en rafale dans le cas de flux de 20 kbps

Dans cette partie on évalue l'efficacité du FEC en étudiant les pertes en rafale subies par les différents flux. On précise ici que le nombre maximal de pertes consécutives qui a été enregistré pour les valeurs du nombre de flux considérées est égal à 3. Ce qui fait que l'étude a porté sur les pertes consécutives (2 et 3 pertes consécutives) en fonction du nombre de flux.

On présente le nombre de flux subissant des pertes dans les intervalles de pertes suivants : entre 0 % et 2 %; entre 2 % et 5 %; entre 5 % et 10 %; entre 10 % et 20 %, en fonction du nombre de flux et du taux de redondance en question.

On voit sur le tableau 4.3 que le taux de pertes en rafale reste compris entre 0 et 2 % pour un nombre de flux compris entre 18 et 23 flux. À partir de 24 flux, des pertes consécutives sont constatées et les flux FEC s'avèrent d'une efficacité assez limitée à les réduire. Par exemple pour 26 flux on voit que FEC 2/3 parvient juste à garder 5 flux à un taux de pertes en rafale (deux pertes consécutives) compris entre 0 % et 2 % et FEC 3/4 en garde jusqu'à 21 flux. Les autres taux de redondance se sont montrés d'une efficacité assez limitée et on ne voit aucun flux audio dans cet intervalle pour FEC 4/5 et FEC 5/6.

Dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps, on voit que les transmissions sans FEC ne subissent pas de pertes en rafale contrairement aux flux avec FEC qui en subissent beaucoup à partir de 200 flux passant par le goulot d'étranglement (tableaux 4.4 et 4.6). Il n'empêche que le taux de redondance 5/6 prouve une meilleure efficacité à réduire les pertes en rafale que les autres taux avec un nombre relativement limité de flux audio, par exemple on voit dans le cas de 205 flux que FEC 5/6 parvient à garder la totalité des 205 flux dans l'intervalle de pertes en rafale (deux pertes successives) [0-2] alors que le FEC 2/3 en garde 196 dans cet intervalle. Cependant pour un nombre plus élevé de flux audio concurrents on voit que cette tendance est inversée et que FEC 2/3 est le plus efficace. Par exemple, pour 230 flux

audio, on a 165 flux avec un taux de pertes en rafale inférieur à 2 %; en contrepartie avec un taux de redondance égal à 5/6 on a 131 flux dont le taux de pertes en rafale est inférieur à 2 %.

Tableau 4.3 : Taux de pertes en rafale (deux pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps

| nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| 18 | 18 18 18 18 18 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 19 19 19 19 19 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 20 20 20 20 20 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 21 21 21 21 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 22 22 22 22 22 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 23 | 23 23 23 23 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 24 | 24 21 18 21 21 | 0 0 6 1 3 | 0 3 0 2 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 25 | 25 25 25 25 25 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 26 5 21 0 0 | 0 0 0 10 11 | 0 19 0 9 10 | 0 2 0 7 4 | 0 0 5 0 1 |
| 27 | 21 16 3 0 0 | 0 0 10 2 0 | 0 0 12 12 6 | 0 6 2 13 21 | 6 5 0 0 0 |
| 28 | 22 15 13 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 5 0 | 0 11 0 17 27 | 6 2 15 6 1 |
| 29 | 21 2 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 11 5 1 0 | 0 12 18 14 19 | 8 4 6 14 10 |
| 30 | 20 3 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 9 3 0 0 | 0 16 22 20 14 | 10 2 5 10 16 |

L'étude sur les pertes en rafale de 3 pertes consécutives (tableaux 4.5 et 4.6) montre aussi que les flux FEC ne parviennent pas à réduire le taux de pertes par rapport au cas sans FEC où ces pertes en rafale sont complètement inexistantes.

Cependant, on a vu une différence en termes d'efficacité entre les différents taux de redondance où le FEC 5/6 a montré une meilleure efficacité relativement aux autres taux de redondance; à titre illustratif on prend le cas de 245 flux avec un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps où on a eu 238 flux avec des pertes en rafale de pourcentage compris entre 0 % et 2 % alors qu'avec le FEC 2/3 les flux dont les pertes en rafale dans ce palier sont de 223. Ce qui fait que dans ce cas FEC

5/6 serait plus intéressant que les autres taux de redondance. Cela va à l'encontre des résultats trouvés avec les pertes en rafale de deux pertes consécutives et on explique cette constatation par le fait qu'on a un équilibre entre les pertes simples, doubles et triples c'est-à-dire qu'on a moins de pertes triples, mais plus de pertes doubles ou simples.

Tableau 4.4 : Taux de pertes en rafale (deux pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 200 | 200 199 199 199 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 1 1 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 205 | 205 196 204 204 205 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 1 0 | 0 9 0 0 0 | 0 0 1 0 0 |
| 210 | 210 191 207 208 198 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 11 | 0 16 0 0 1 | 0 3 3 2 0 |
| 215 | 215 200 199 184 204 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 30 0 | 0 0 0 1 11 | 0 15 16 0 0 |
| 220 | 220 192 172 138 187 | 0 0 0 39 0 | 0 0 0 40 27 | 0 0 46 3 6 | 0 28 2 0 0 |
| 225 | 225 194 135 121 177 | 0 0 0 44 0 | 0 0 79 46 37 | 0 0 9 14 10 | 0 31 2 0 1 |
| 230 | 230 165 101 134 131 | 0 0 0 0 0 | 0 0 80 74 72 | 0 55 46 22 25 | 0 10 3 0 2 |
| 235 | 235 119 156 52 85 | 0 0 0 96 61 | 0 0 0 66 68 | 0 106 73 21 21 | 0 10 6 0 0 |
| 240 | 240 93 191 49 57 | 0 0 0 65 72 | 0 86 0 78 62 | 0 56 0 48 49 | 0 5 49 0 0 |
| 245 | 245 181 79 181 136 | 0 0 0 0 0 | 0 0 91 0 66 | 0 0 61 0 35 | 0 64 14 64 8 |

Tableau 4.5 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 18 | 18 18 18 18 18 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 19 19 19 19 19 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 20 20 20 20 20 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 21 21 21 21 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 22 22 22 22 22 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 23 | 23 23 23 23 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 24 | 24 24 24 24 24 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 25 | 25 25 25 25 25 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 26 24 26 22 26 | 0 0 0 0 0 | 0 2 0 4 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 27 | 27 26 27 27 27 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 28 | 28 23 28 28 28 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 5 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 29 | 29 23 28 29 27 | 0 0 1 0 0 | 0 6 0 0 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 30 | 30 21 30 28 25 | 0 0 0 2 4 | 0 8 0 0 1 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

Tableau 4.6 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 20 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 200 | 200 200 200 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 205 | 205 204 205 205 205 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 210 | 210 208 210 210 210 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 2 0 0 0 |
| 215 | 215 215 214 215 215 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 1 0 0 |
| 220 | 220 212 219 218 220 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 2 0 | 0 0 1 0 0 | 0 8 0 0 0 |
| 225 | 225 220 225 225 225 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 5 0 0 0 |
| 230 | 230 204 206 218 212 | 0 0 0 0 0 | 0 0 24 0 17 | 0 0 0 12 1 | 0 26 0 0 0 |
| 235 | 235 206 227 222 221 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 13 14 | 0 29 0 0 0 | 0 0 8 0 0 |
| 240 | 240 204 240 197 210 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 43 29 | 0 34 0 0 1 | 0 2 0 0 0 |
| 245 | 245 223 195 234 238 | 0 0 0 0 0 | 0 0 46 0 0 | 0 0 4 0 7 | 0 22 0 11 0 |

4.1.4. Pertes dans le cas de flux de 32 kbps

Dans cette partie on change le débit de codage et on passe à 32 kbps. On calcule la moyenne des pertes résiduelles sur tous les flux et on étudie la répartition des pertes sur les flux audio considérés.

La figure [4.8](#) montre les valeurs des moyennes des pertes résiduelles sur tous les flux en fonction du nombre de flux. On voit que les valeurs des pertes résiduelles sont très proches les unes des autres pour tous les taux de redondance et que l'utilisation du FEC n'aide pas à réduire les pertes, mais plutôt dans le meilleur des cas cette technique maintient le niveau de pertes égal à celui obtenu sans utilisation du FEC.

Les résultats obtenus avec des flux de 32 kbps sont analogues à ceux obtenus avec des flux de 20 kbps à la différence près que les pertes commencent avec un nombre moins élevé de flux audio : avec un goulot d'étranglement de 750 kbps les pertes commencent à partir de 15 flux et avec le goulot de 7.5 Mbps les pertes commencent à 160 flux et ceci est entièrement prévisible étant donné que l'augmentation du débit de codage entraîne l'abaissement du seuil de saturation en termes de nombre de flux audio.

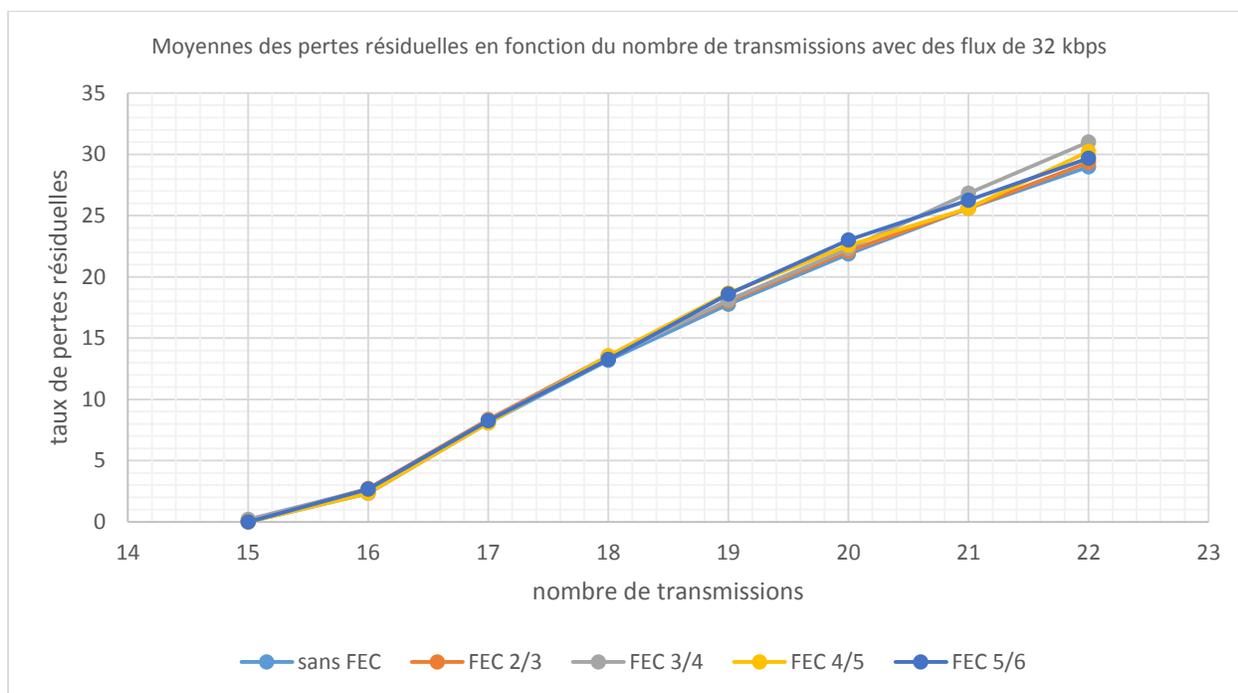


Figure 4.8 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

Dans l'annexe [C.1](#), on présente la répartition des pertes sur les paliers en fonction du nombre de flux et du taux de redondance FEC.

On voit que pour de faibles valeurs du nombre de flux on n'a pas d'efficacité apparente du FEC : les flux sans FEC ont des nombres de flux dans la tranche [0-2] plus élevés que les flux avec FEC. À partir de 18 flux on a une efficacité apparente des flux FEC où par exemple à 18 flux on a 9 flux dans l'intervalle [5-10] avec FEC 2/3 alors que sans FEC 17 flux ont des pertes dans l'intervalle [10-20]. Cependant cela n'a pas grand intérêt étant donné que les différences de qualité ne sont pas assez perceptibles; en effet, l'intervalle de pertes [5-10] correspond à un

intervalle de MOS compris entre 2.2 et 1.6 alors qu'à partir de 10 %, le MOS obtenu est inférieur à 1.6.

Ci-dessous (figure 4.9), on présente les moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps. On voit que les résultats sont analogues à ceux obtenus avec des flux de 20 kbps où les pertes résiduelles avec FEC sont supérieures à celle avec des flux sans FEC avec une petite différence entre les différents taux de redondance.

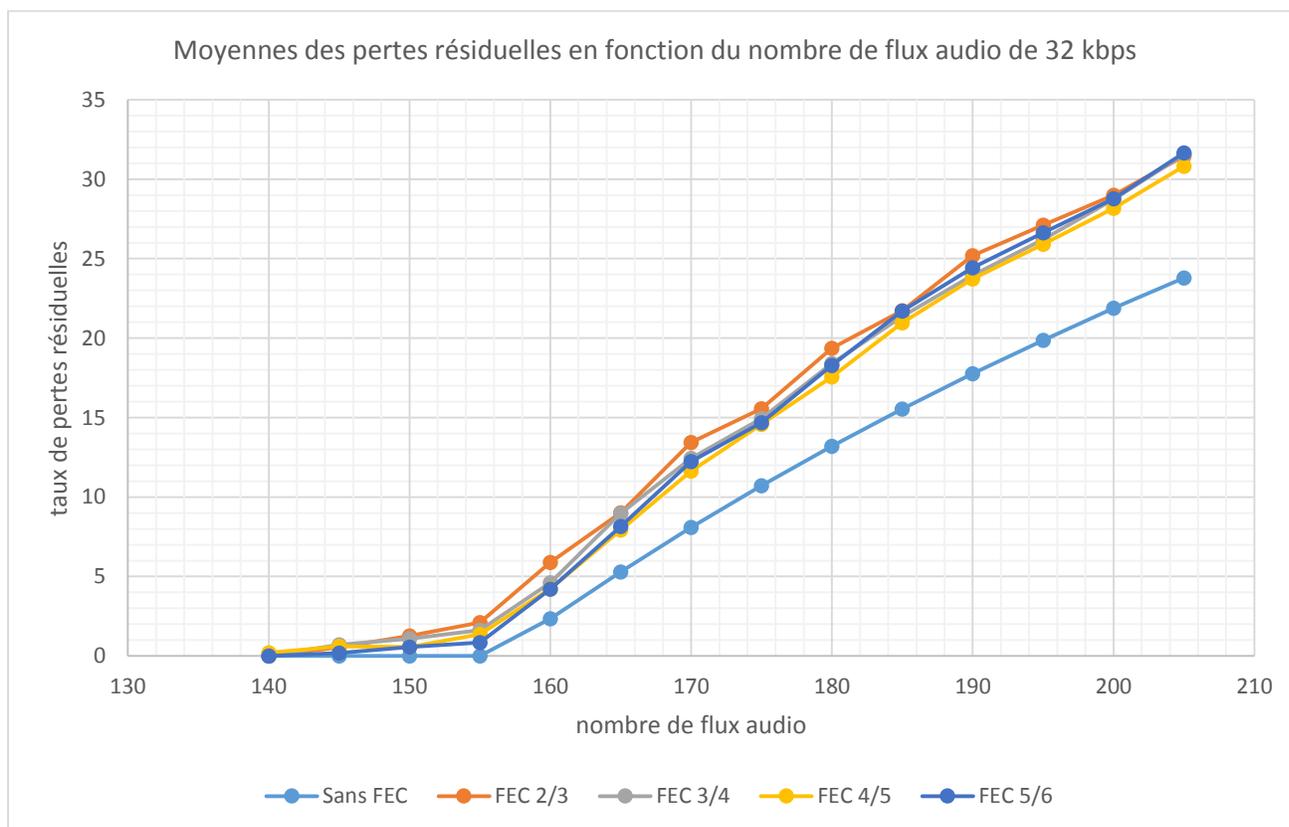


Figure 4.9 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps

Cependant, en observant la répartition des pertes sur les paliers (Annexe C.2) on voit que pour un nombre relativement élevé de flux on a un plus grand nombre de flux dans un intervalle de pertes acceptable [0-2] avec FEC que pour les flux sans FEC.

Ceci est visible avec 195 flux où on a 86 flux avec FEC 3/4 dans l'intervalle [0-2] alors qu'on n'en avait que 35 dans cet intervalle sans FEC. De même avec 200 flux où 13 flux ont eu des taux de pertes dans l'intervalle [0-2] avec FEC 2/3 alors qu'aucun flux n'a été dans cet intervalle de pertes avec des flux sans FEC. Cela s'explique par le fait que les répartitions des pertes résiduelles sont inévitables entre les flux où, sans FEC, on a un maximum de pertes atteint de 25 % alors qu'avec FEC 3/4 le maximum atteint est de 66.66 %; en contrepartie, beaucoup d'autres flux subissent des pertes comprises entre 0 % et 2 %, plus nombreux que ceux dans le cas sans FEC.

4.1.5 Pertes en rafale dans le cas de flux de 32 kbps

Avec un goulot d'étranglement de capacité égale à 750 kbps, on a vu que les pertes en rafale commencent à partir d'un nombre relativement très élevé de flux audio. Dans le cas sans FEC à partir de 26 flux, avec FEC 2/3 à partir de 24 flux et avec le FEC 3/4 à partir de 22 flux.

Cependant avec un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps (annexes [C.3](#) et [C.4](#)) les pertes en rafale commencent à partir de 150 flux. Ceci s'explique par le fait que le nombre de flux concurrents a un impact sur les pertes en rafale. C'est-à-dire que dans le cas d'un faible nombre de flux, il y a moins de chance que deux paquets successifs provenant d'une même source de trafic arrivent sur une file saturée, car il y a moins de chance que le délai inter-paquets soit suffisant pour saturer la file que pour un nombre très élevé de flux.

Les résultats obtenus montrent que les pertes en rafale sont plus élevées dans le cas de flux avec FEC que sans FEC; ce qui fait qu'on a un comportement analogue à celui obtenu avec des flux de 20 kbps où les flux FEC sont inefficaces, voire même nuisibles.

4.2 Efficacité du FEC appliqué à des flux Opus en concurrence avec un flux TCP

Dans cette partie du travail, on réalise l'étude sur les flux audio Opus en concurrence avec du trafic TCP sur lequel est envoyé un flux FTP. En premier lieu on représente la moyenne des taux

de pertes résiduelles ensuite on analyse la répartition des pertes résiduelles sur les intervalles en fonction du nombre de flux audio en concurrence.

4.2.1 Pertes dans le cas de flux de 20 kbps

L'étude de variation du taux de pertes en fonction du nombre de flux audio (figure 4.11) montre des fluctuations du taux de pertes moyen en fonction du nombre de flux pour un nombre inférieur à 21 flux, qui correspond à la saturation du lien. À partir de ce seuil, on voit que les taux de pertes prennent des valeurs parfaitement égales à celles obtenues précédemment dans le cas de concurrence de plusieurs flux audio en absence de flux TCP. Plus d'investigations au niveau des fichiers traces nous ont menés à une explication : au-delà du seuil de saturation les paquets TCP arrivent au niveau du goulot d'étranglement sur une file d'attente saturée ce qui fait qu'ils sont systématiquement perdus. Le délai de retransmission maximal (retransmit timeout) est doublé, augmentant ainsi le temps écoulé entre l'envoi de deux paquets TCP consécutifs. Par conséquent, on a de moins en moins de paquets TCP émis par la source et par suite on se trouve dans le cas de flux audio uniquement. Ceci fait que le trafic passant sur le goulot d'étranglement entre 30 s et 60 s est purement UDP à partir de 21 flux audio; et on obtient des résultats parfaitement identiques à ceux obtenus sans utilisation d'un flux TCP.

On observe une augmentation du taux de pertes avec quelques fluctuations entre 2 et 20 transmissions : ces fluctuations sont dues à la variation du débit du trafic TCP (figure 4.10) selon le mécanisme de retransmission du protocole.

Contrairement au cas sans TCP, on observe ici des performances intéressantes du FEC où entre 0 et 20 flux audio on a des points où les flux FEC ont réduit les pertes résiduelles jusqu'à 0 % parfois. Cette efficacité dépend quand même des taux de redondance; par exemple entre 2 et 12 flux audio on a eu, dans le cas de FEC 4/5 et 5/6, un niveau de pertes inférieur à celui où FEC n'est pas utilisé : une différence maximale a été atteinte à 12 flux égale à 4.7 % (8.81 % de pertes pour les flux sans FEC et 4.11 % pour les flux avec FEC 4/5).

À partir de 14 flux le FEC 2/3 montre les taux de pertes les plus bas par rapport à tous les autres taux de redondance. Cela s'explique par le fait que le seuil de saturation dans ce cas est, comme illustré à la figure 4.11, inférieur à celui des autres taux de redondance, ce qui fait que le trafic TCP est plus limité et par suite on a moins de pertes résiduelles.

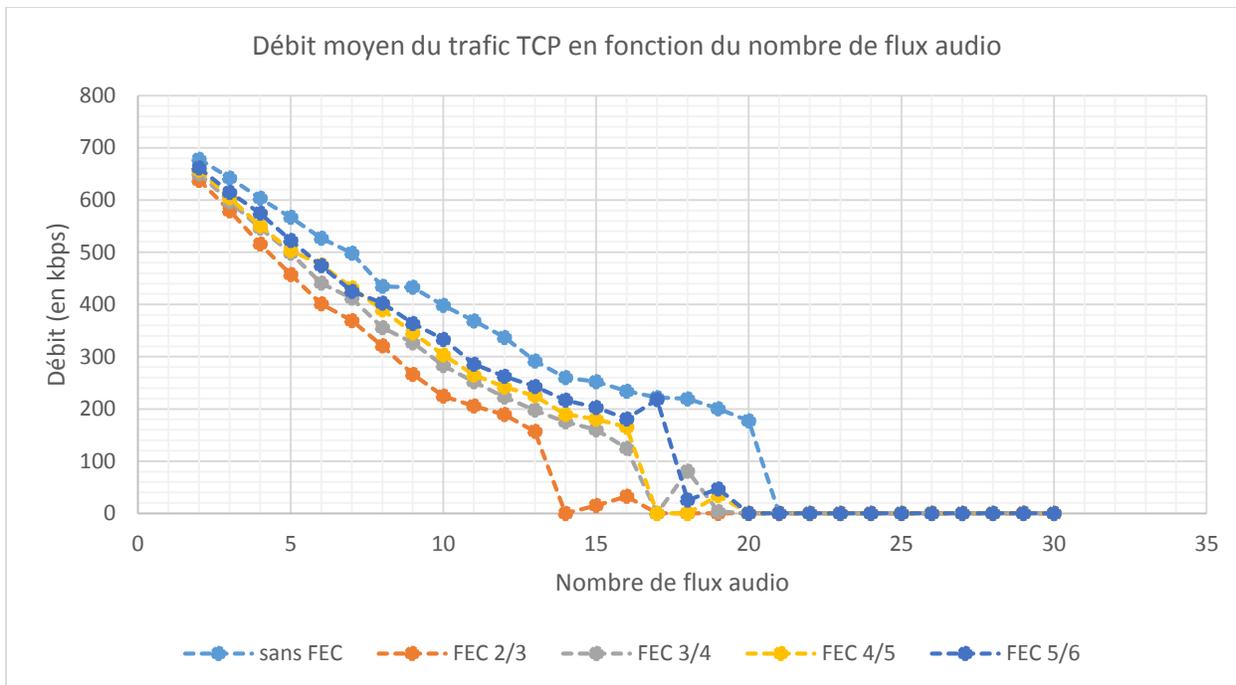


Figure 4.10 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux Opus de 20 kbps dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

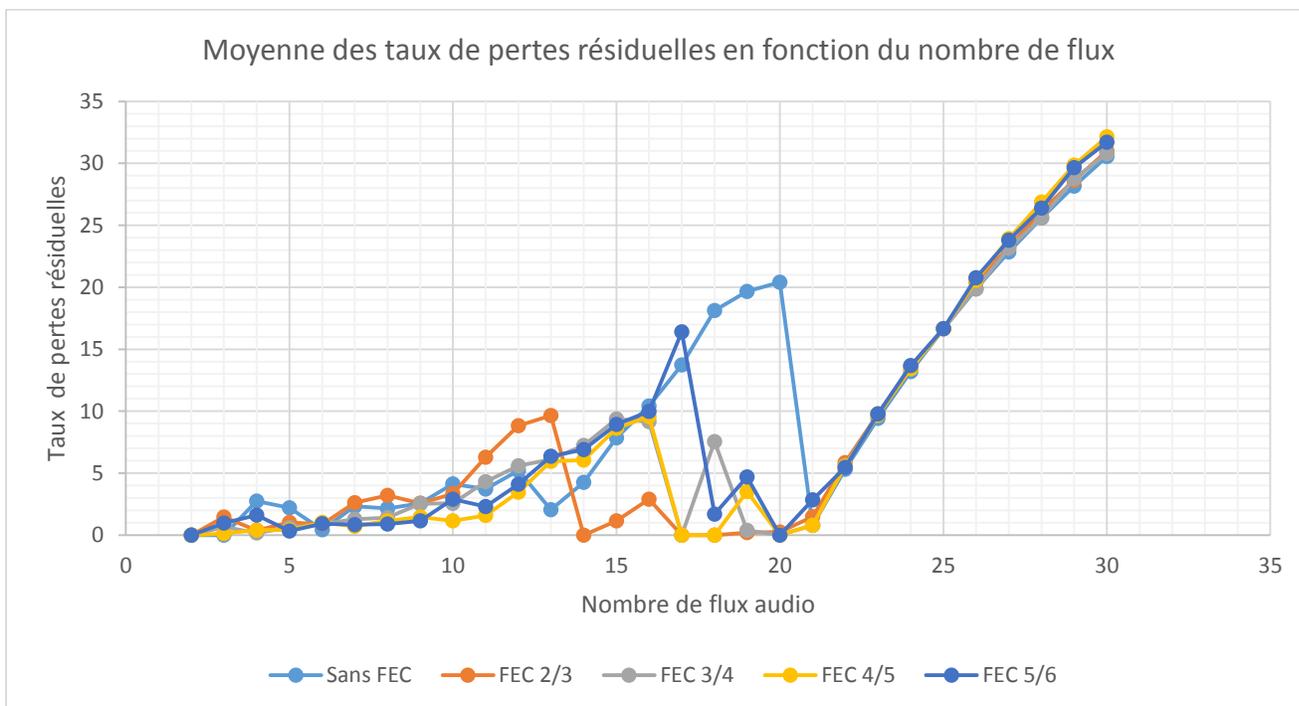


Figure 4.11 : Moyenne des taux de pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

Avec un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps (figure 4.12), on observe un comportement analogue à celui avec 750 kbps, où au-delà d'un certain seuil on a les mêmes configurations que celles obtenues sans TCP : dans le cas présent à partir de 210 flux. L'investigation des fichiers trace montre qu'au-delà du seuil de saturation les paquets TCP ne sont plus émis par l'application FTP étant donné que le retransmit timeout est doublé en cas de perte de paquets.

Cependant on a vu des performances intéressantes des FEC avec un avantage des taux de redondance élevés pour des valeurs du nombre de flux proches du seuil de saturation.

En effet, pour des valeurs du nombre de flux entre 0 et 185 flux on a vu une efficacité sans égale du FEC où on a réussi à rendre les pertes pratiquement nulles; pourtant les pertes sont très élevées dans le cas sans FEC, où on a pu atteindre une différence de 20 % comme c'était le cas avec 195 flux où sans FEC on a un taux de pertes résiduelles moyen de 21.65 % alors que c'était égal à 0.72 % avec FEC 5/6.

En ce qui concerne la répartition des pertes sur les paliers (tableaux 4.7 et 4.8), on voit que les flux FEC ont contribué à garder les pertes dans une marge acceptable [0-2] bien entendu pour des valeurs du nombre de flux inférieures au seuil de saturation. Dans certains cas on a même vu que certains taux de redondance permettaient de garder la totalité des flux dans l'intervalle [0-2]. Cela a été le cas avec un total de 14 ou 15 flux et un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps. Cette tendance a aussi été observée entre 165 et 195 flux où aucun flux n'a été gardé dans cette marge sans FEC, mais à l'aide des flux FEC on a pu en garder la majorité voire même la totalité comme cela a été le cas avec 175 et 180 flux et FEC 2/3.

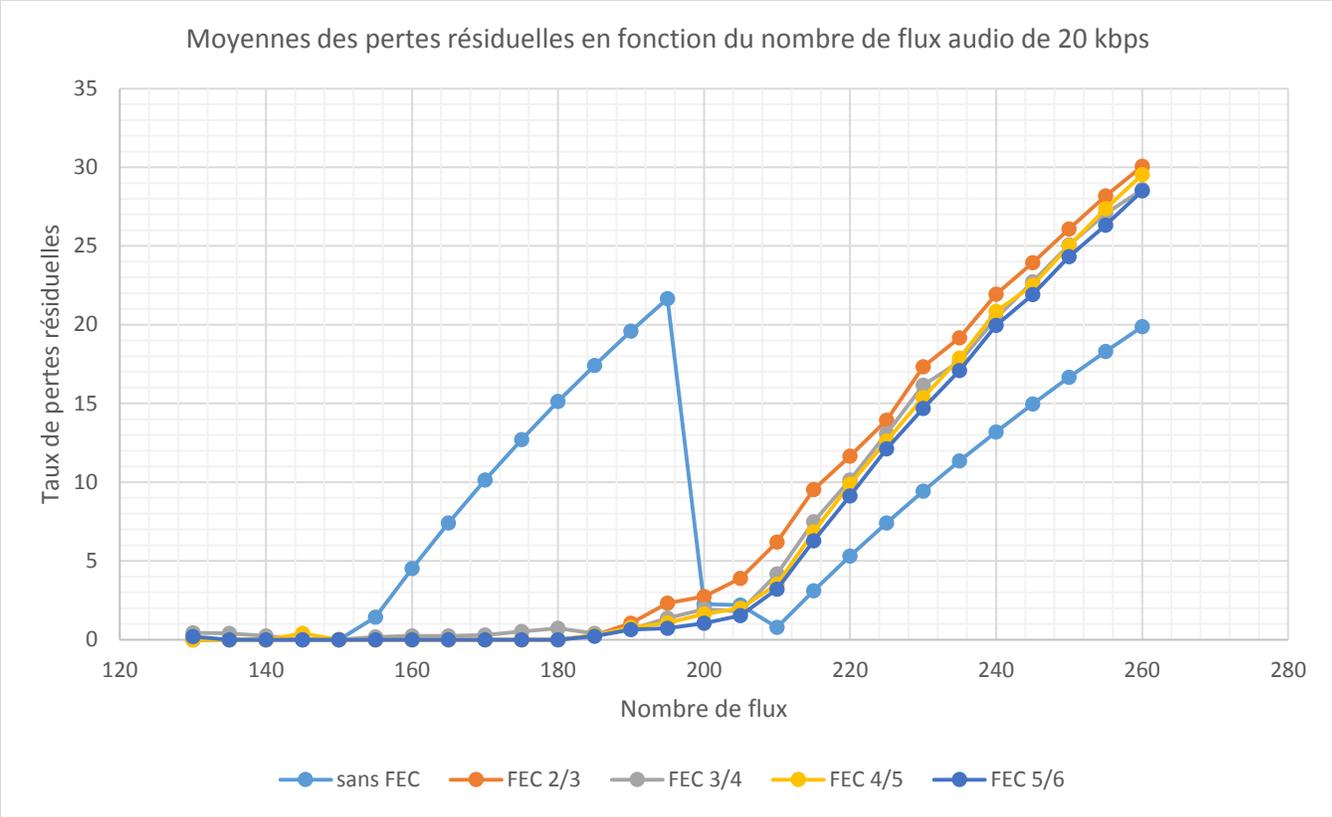


Figure 4.12 : Moyenne des taux de pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps

Tableau 4.7 : Taux de pertes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio concurrents avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 3 | 3 2 3 3 2 | 0 1 0 0 1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 4 | 0 4 4 4 2 | 4 0 0 0 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 5 | 0 4 5 5 5 | 5 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 6 5 5 6 6 | 0 1 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 0 2 6 7 7 | 7 5 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 0 2 5 6 7 | 8 5 3 2 1 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 0 4 3 7 8 | 9 3 6 2 1 | 0 2 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 0 4 3 8 1 | 10 3 7 2 9 | 0 3 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 1 1 1 7 6 | 8 4 7 4 5 | 2 5 3 0 0 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 0 0 0 0 0 | 5 1 2 12 8 | 7 7 10 0 4 | 0 4 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 5 0 0 1 0 | 8 1 2 4 3 | 0 3 11 8 10 | 0 9 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 0 14 0 0 0 | 14 0 4 3 3 | 0 0 7 11 11 | 0 0 3 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 0 15 0 0 0 | 0 0 0 1 0 | 15 0 9 10 12 | 0 0 6 4 3 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 0 2 0 0 0 | 0 14 0 0 0 | 5 0 11 9 6 | 11 0 5 7 10 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 0 17 17 17 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 1 | 16 0 0 0 14 | 0 0 0 0 2 |
| 18 | 0 18 0 18 15 | 0 0 4 0 3 | 0 0 14 0 0 | 18 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 0 18 19 0 0 | 0 18 0 19 11 | 0 0 0 0 8 | 11 0 0 0 0 | 8 0 0 0 0 |
| 20 | 0 19 20 20 20 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 | 5 0 0 0 0 | 15 0 0 0 0 |
| 21 | 20 16 20 20 17 | 0 0 0 0 0 | 0 5 0 0 2 | 1 0 1 1 2 | 0 0 0 0 0 |

Tableau 4.8 : Taux de pertes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio concurrents avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 150 | 150 150 150 150 150 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 95 155 155 155 155 | 60 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 160 | 15 160 160 160 160 | 55 0 0 0 0 | 90 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 165 | 0 165 165 165 165 | 0 0 0 0 0 | 165 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 170 | 0 170 169 170 170 | 0 0 1 0 0 | 70 0 0 0 0 | 100 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 175 | 0 175 154 175 175 | 0 0 18 0 0 | 0 0 3 0 0 | 175 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 180 | 0 180 178 180 180 | 0 0 2 0 0 | 0 0 0 0 0 | 180 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 185 | 0 184 175 183 183 | 0 0 0 0 0 | 0 0 9 0 0 | 185 0 1 0 2 | 0 1 0 2 0 |
| 190 | 0 162 158 184 184 | 0 0 31 0 0 | 0 24 1 0 0 | 92 4 0 0 6 | 98 0 0 6 0 |
| 195 | 0 187 181 172 188 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 22 0 | 15 0 14 0 7 | 180 8 0 1 0 |
| 200 | 79 164 144 177 151 | 121 0 37 0 34 | 0 0 15 0 12 | 0 30 4 20 3 | 0 6 0 3 0 |
| 205 | 75 127 195 146 158 | 130 0 0 42 26 | 0 53 0 12 21 | 0 19 0 5 0 | 0 6 10 0 0 |
| 210 | 205 105 152 134 94 | 0 0 0 0 48 | 0 57 0 49 56 | 0 28 39 22 12 | 5 20 19 5 0 |
| 215 | 195 183 118 27 136 | 0 0 0 50 0 | 0 0 0 96 40 | 0 0 62 40 24 | 20 32 35 2 15 |

4.2.2 Pertes en rafale dans le cas de flux de 20 kbps

Les pertes en rafale (deux et 3 pertes consécutives) ont été déterminées pour les deux valeurs de la capacité du goulot d'étranglement (750 kbps et 7.5 Mbps). Les tableaux [4.9](#) - [4.12](#) récapitulent le nombre de flux par intervalle de taux de pertes en rafale.

Tableau 4.9 : Pertes en rafale (deux pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 3 | 3 3 3 3 3 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 4 | 4 4 4 4 4 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 5 | 5 5 5 5 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 6 6 6 6 6 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 7 7 7 7 7 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 8 8 8 8 8 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 9 9 9 9 9 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 10 10 10 10 10 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 8 11 11 10 11 | 3 0 0 1 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 12 11 9 12 12 | 0 1 3 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 13 7 11 6 5 | 0 6 2 7 8 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 14 14 10 7 6 | 0 0 3 7 8 | 0 0 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 15 15 4 2 4 | 0 0 11 13 11 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 16 16 4 5 1 | 0 0 12 11 15 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 2 17 17 17 7 | 15 0 0 0 3 | 0 0 0 0 7 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 0 18 12 18 18 | 18 0 6 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 13 19 19 19 18 | 6 0 0 0 1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

On remarque que les pertes en rafale sont inexistantes pour des valeurs du nombre de flux relativement faibles (entre 2 et 10 flux pour un lien de goulot d'étranglement de 750 kbps et entre 155 et 185 flux pour une capacité de 7.5 Mbps). Cependant, après une valeur assez élevée du nombre de flux on voit que les pertes en rafale commencent à apparaître et que les flux FEC ont largement contribué à garder plusieurs flux dans un intervalle de pertes en rafale assez bas (entre 0 % et 2 %). Cela a été le cas à 17 flux où les données FEC avec des taux de redondance 2/3, 3/4

et 4/5 ont gardé la totalité des 17 flux dans cet intervalle, de même avec 18 flux où les paquets FEC 2/3, 4/5 et 5/6 ont contribué à garder la totalité des flux dans l'intervalle 0 % à 2 % de pertes en rafale.

Pareillement, dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps, les pertes en rafale s'accroissent en fonction du nombre de flux où à partir de 190 flux on voit que 40 flux subissent entre 2 % et 5 % de pertes en rafale (deux pertes consécutives); cependant, les mécanismes FEC appliqués nous ont aidés à maintenir la totalité des flux à des taux de pertes en rafale dans l'intervalle [0-2] dans ces cas précis (190 et 195 flux).

Tableau 4.10 : Pertes en rafale (2 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 165 | 165 165 165 165 165 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 170 | 170 170 170 170 170 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 175 | 175 175 175 175 175 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 180 | 180 180 180 180 180 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 185 | 185 185 185 185 185 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 190 | 150 190 190 190 190 | 40 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 195 | 114 195 195 195 195 | 61 0 0 0 0 | 20 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 200 | 200 199 199 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 205 | 205 196 204 204 204 | 0 0 0 0 1 | 0 0 0 1 0 | 0 9 0 0 0 | 0 0 1 0 0 |
| 210 | 210 191 207 204 198 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 11 | 0 16 0 6 1 | 0 3 3 0 0 |

Tableau 4.11 : Pertes en rafale (3 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 13 | 13 13 13 13 13 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 14 14 14 14 14 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 15 15 15 15 15 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 16 16 16 16 16 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 17 17 17 17 13 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 4 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 12 18 18 18 18 | 6 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 19 19 19 19 19 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

Tableau 4.12 : Pertes en rafale (3 pertes successives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux audio en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 165 | 165 165 165 165 165 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 170 | 170 170 170 170 170 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 175 | 175 175 175 175 175 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 180 | 180 180 180 180 180 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 185 | 185 185 185 185 185 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 190 | 190 190 190 190 190 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 195 | 195 195 195 195 195 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 200 | 200 200 200 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 205 | 205 204 205 205 205 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 210 | 210 208 210 210 210 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 2 0 0 0 |

4.2.3 Pertes dans le cas de flux Opus de 32 kbps

Dans cette partie on étudie des flux de 32 kbps pour un nombre de flux compris entre 2 et 20 (figure 4.14) avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps et entre 115 et 165 flux avec un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps (figure 4.15).

Comme pour les flux de 20 kbps on voit des fluctuations des moyennes des pertes résiduelles beaucoup plus apparentes dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps, qui s'expliquent par les fluctuations du débit du flux TCP (figure 4.13)

Les résultats obtenus montrent une efficacité du FEC entre 115 et 155 flux où on voit que la moyenne des taux de pertes résiduelles en cas d'introduction du FEC est inférieure à celle obtenue sans FEC. Les meilleures performances obtenues sont avec FEC 2/3, 4/5 et 5/6 où on a réussi à garder les pertes résiduelles à 0 jusqu'à 140 flux; à partir de ce seuil les pertes résiduelles obtenues avec FEC 4/5 et 5/6 sont inférieures à celles obtenues avec FEC 2/3 et 3/4. Cela s'explique par le fait que ces deux taux de redondance causent une importante surcharge du lien qui est moins élevée dans le cas des FEC 4/5 et 5/6.

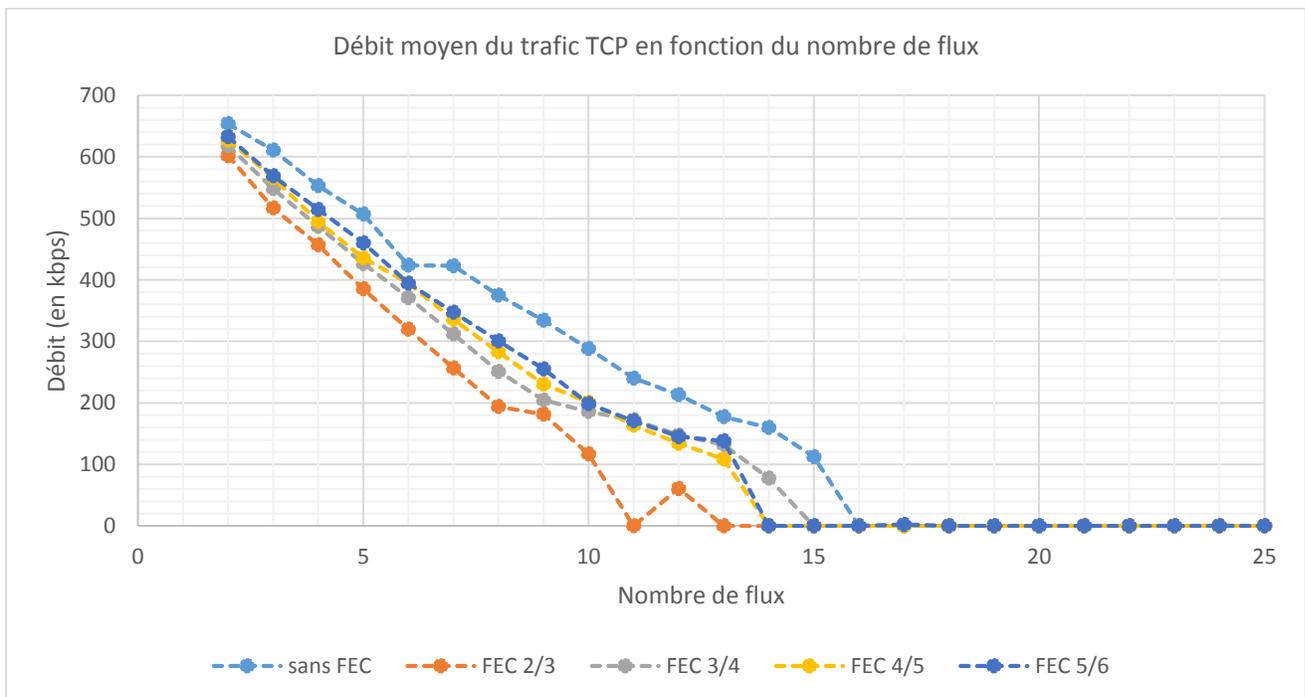


Figure 4.13 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

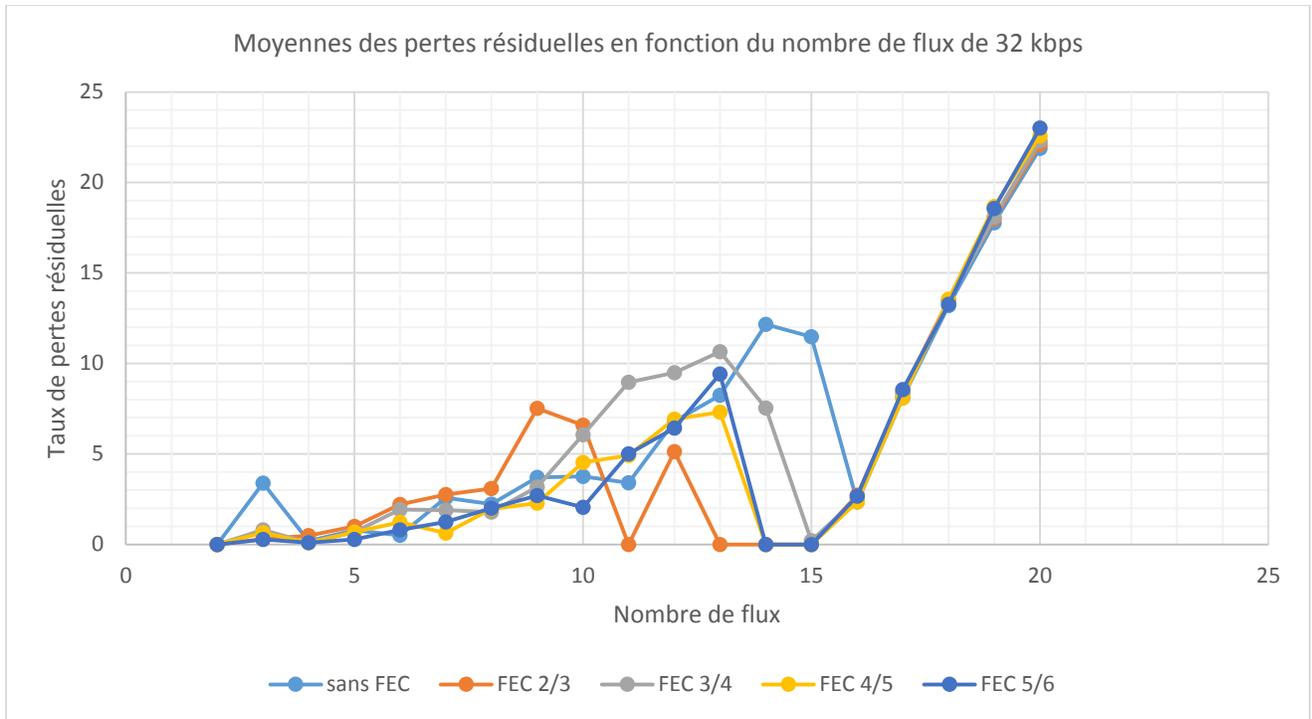


Figure 4.14 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

La répartition des pertes sur les différents intervalles (Annexes [C.5](#) et [C.6](#)) montre aussi des résultats analogues à ceux obtenus avec des flux de 20 kbps où, avant d'atteindre le seuil de saturation, on a une efficacité apparente du FEC permettant de garder une grande partie des flux dans un intervalle de pertes [0-2]; par exemple on voit avec 145 flux que 139 flux audio ont eu des pertes résiduelles comprises entre 0 % et 2 % avec FEC 2/3 alors que dans le cas sans FEC on n'en a eu que 3 dans cet intervalle.

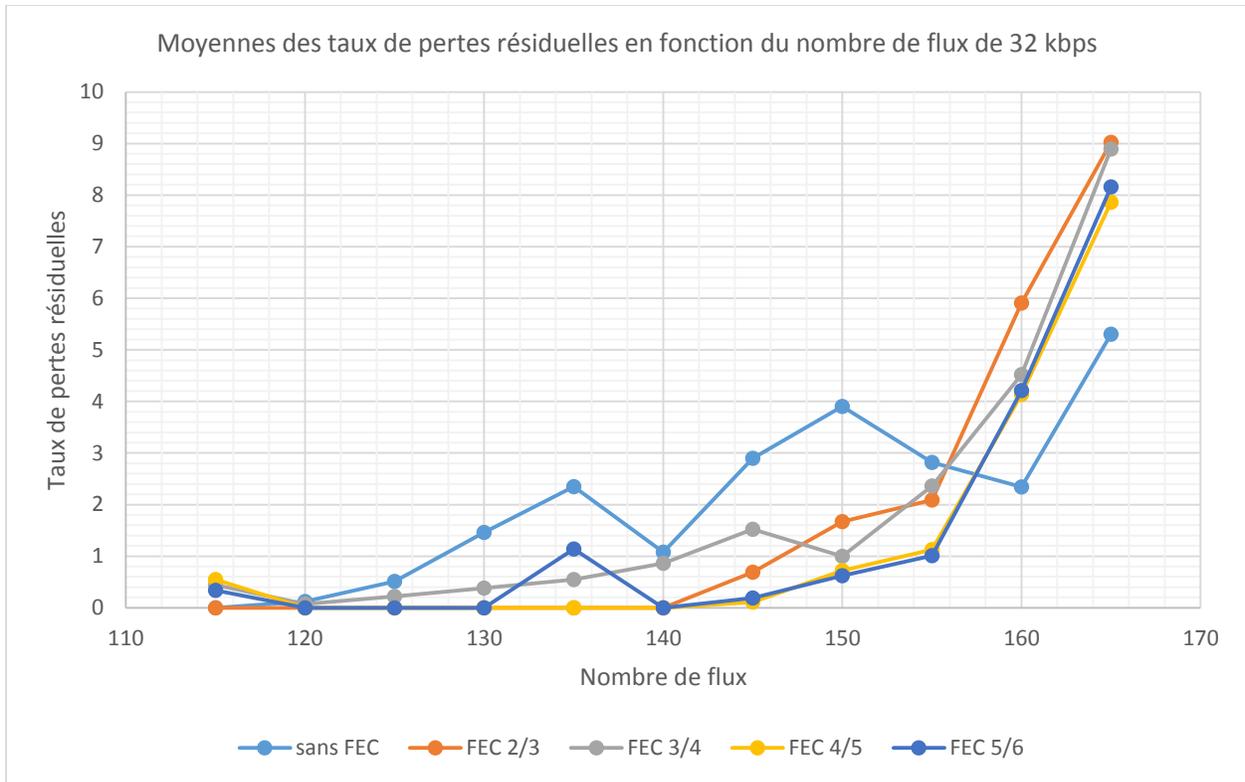


Figure 4.15 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

4.2.4 Pertes en rafale dans le cas de flux de 32 kbps

Dans cette partie on étudie les pertes en rafale sur les flux Opus codés à 32 kbps, dans les annexes [C.7](#) et [C.8](#) on présente le taux de pertes en rafale particulièrement de deux pertes consécutives. On ne réalisera pas l'étude par rapport aux pertes en rafale de 3 pertes consécutives, car ces dernières n'apparaissent que pour un nombre très élevé de flux ce qui n'est pas pris en considération dans cette étude. Pourtant ce n'était pas le cas avec les flux de 20 kbps; on explique ce phénomène par le fait que le temps écoulé entre l'envoi de deux paquets UDP successifs au niveau du lien de goulot d'étranglement est supérieur à celui avec des paquets résultants de flux de 20 kbps. Par conséquent le délai de bout en bout des paquets FTP devient plus élevé et donc on a de moins en moins de paquets TCP dans le goulot d'étranglement, ce qui fait que le lien est moins saturé et par suite il y a moins de pertes en rafale au niveau des flux audio.

Les résultats obtenus montrent que les pertes en rafale de deux pertes consécutives ne sont pas très présentes non plus avant le seuil de saturation ce qui est tout à fait attendu pour la raison citée précédemment. Cependant dans le cas où ces dernières ont été présentes qui sont les cas de 14 et 15 flux, les paquets FEC ont aidé à y remédier où on a vu qu'avec un taux de redondance de 2/3 on a maintenu la totalité des flux dans une marge de pertes en rafale acceptable [0-2].

4.3 Conclusion

Le mécanisme In-band FEC n'a aucune efficacité par rapport au cas d'un flux audio où cette technique n'est pas utilisée et à débit de codage identique.

Le mécanisme out-of-band FEC aussi n'a aucune efficacité dans le cas de plusieurs flux audio en concurrence sur un goulot d'étranglement; cette technique devient même nuisible au fur et à mesure qu'on augmente la capacité du lien de goulot d'étranglement où on a vu une augmentation significative des pertes par rapport au cas où FEC n'est pas utilisé.

Cependant, FEC s'avère d'une grande efficacité à réduire les pertes des flux audio dans le cas où ceux-ci sont concurrents avec un flux TCP pour des nombres de flux inférieurs au seuil de saturation. Cette efficacité est plus apparente avec un lien de goulot d'étranglement de capacité plus élevée telle que l'on a réussi à atteindre une différence entre les taux de pertes moyens (entre le cas sans FEC et avec utilisation du FEC) égale à 20.93 %. Le taux de redondance 5/6 montre les meilleures performances par rapport aux autres taux où on a vu un niveau de pertes inférieur à celui obtenu avec les autres taux de redondance. On note qu'à partir du seuil de saturation les pertes coïncident parfaitement avec les valeurs obtenues dans le cas de flux audio sans la présence d'un flux TCP.

Chapitre 5

EFFICACITÉ DU FEC AVEC AMR-WB

Nous répétons la même étude que pour Opus avec AMR-WB en mode 15.85 kbps. L'analyse qualitative de données codées par AMR-WB par rapport à d'autres codecs [26] montre qu'à débit comparable AMR offre de meilleures performances que GSM HR, GSM FR et GSM EFR. Les performances du mode 15.85 kbps sont parmi les meilleures de tous les modes AMR-WB ce qui fait qu'on s'intéresse à ce mode dans ce travail.

5.1 Efficacité du FEC appliqué à des flux AMR-WB

5.1.1 Étude des pertes

Dans cette partie du travail on analyse l'efficacité du FEC appliqué à des flux AMR-WB en mode 15.85 kb/s.

La figure 5.2 présente la moyenne des pertes résiduelles sur tous les flux en fonction du nombre de transmissions AMR-WB, tandis que le tableau de l'annexe C.9 montre les répartitions des pertes sur les paliers [0-2], [2-5], [5-10], [10-20] et plus que 20 %. D'après la figure 5.1 qui représente le MOS en fonction du nombre de flux, ces paliers correspondent respectivement à des valeurs du MOS comprises entre [3.6 , 2.7], [2.7 , 2.18], [2.18 , 1.8], [1.8 , 1.6] et un MOS inférieur à 1.6 pour un taux de pertes supérieur à 20 %.

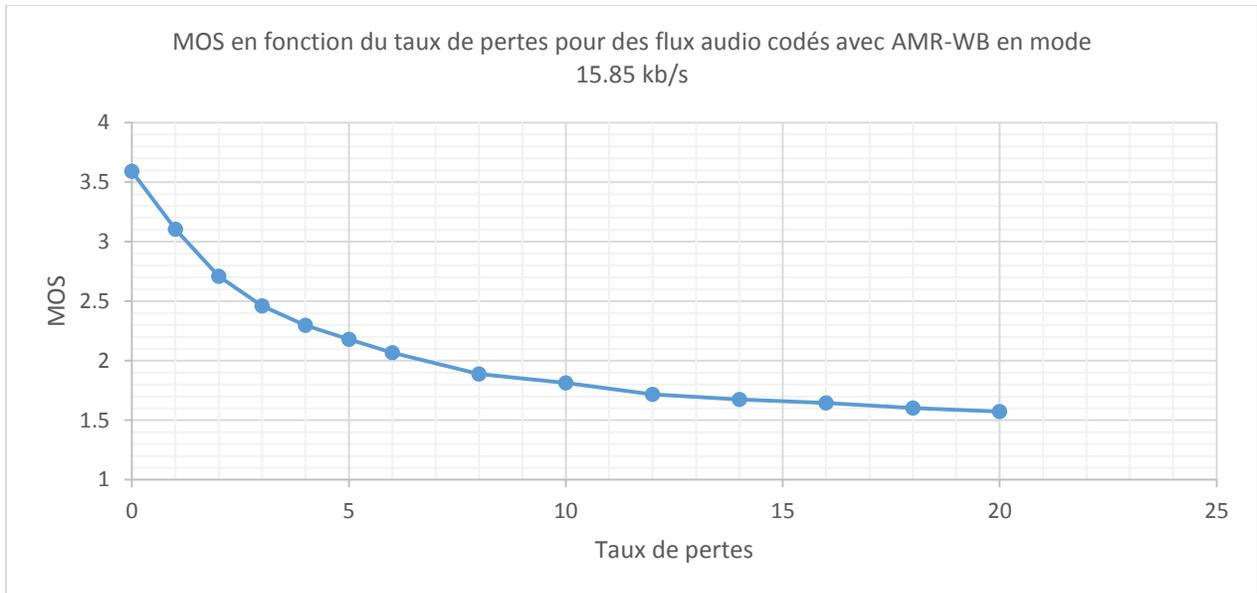


Figure 5.1 : MOS en fonction du taux de pertes pour des flux audio codés en mode 15.85 kb/s

Dans la figure [5.2](#), on voit que les pertes deviennent visibles à partir de 25 flux dans le cas sans FEC, mais bien avant ce seuil pour les transmissions avec FEC, surtout avec le taux de redondance (2/3) où les flux audio commencent à subir des pertes à partir de 22 transmissions.

Les meilleures performances sont quand même celles des flux sans FEC comme dans le cas d'Opus; il n'empêche qu'on distingue différentes performances entre les différents taux de redondance où le FEC 5/6 est le plus efficace entre 23 et 25 transmissions et même pour des valeurs élevées du nombre de flux (30 flux). Le taux de redondance (2/3) est généralement le moins efficace et ceci est plus avéré avec 30 transmissions où le taux de pertes résiduelles moyen est plus élevé que celui des autres taux de redondance.

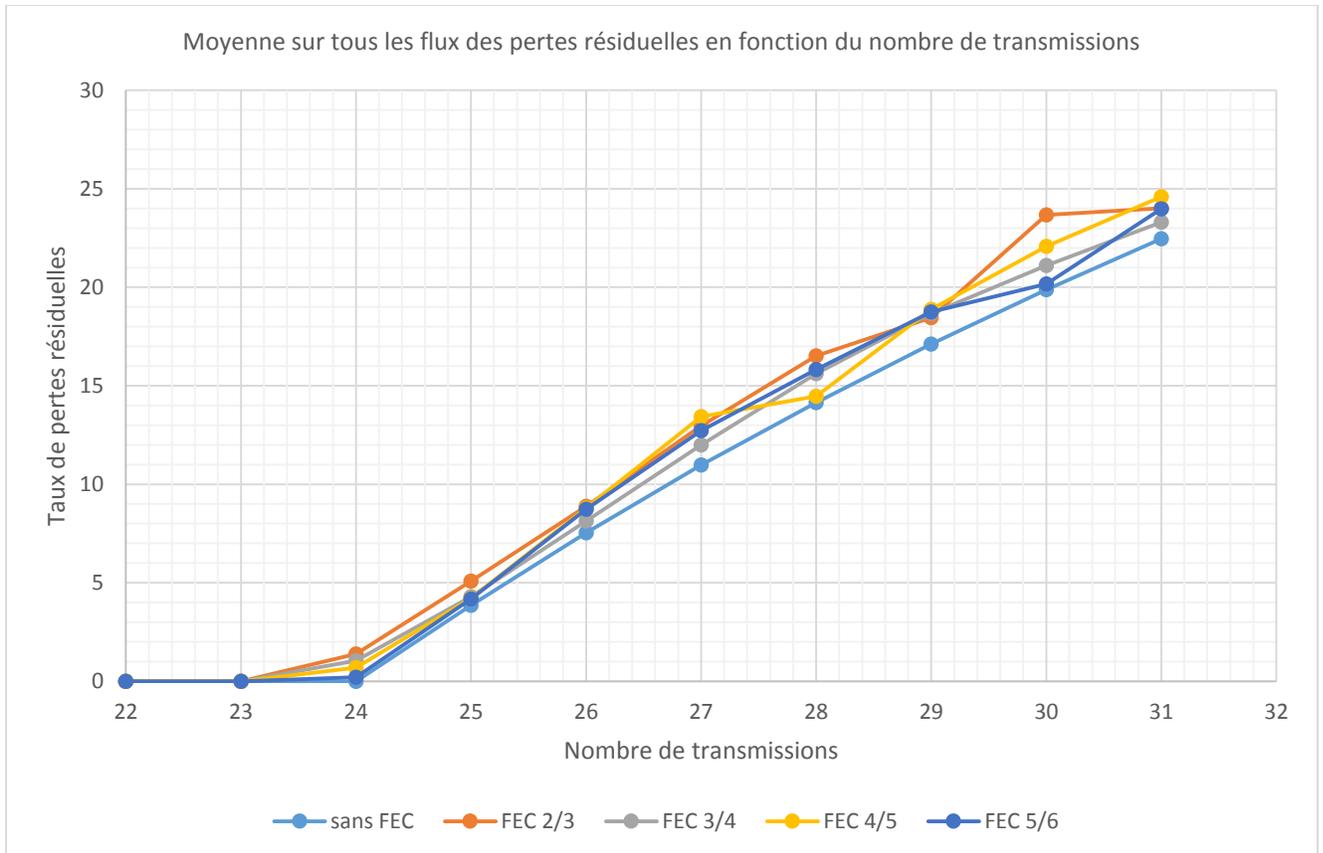


Figure 5.2 : Moyenne sur tous les flux des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

Les résultats obtenus avec des transmissions sur un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps (figure 5.3) montrent une augmentation assez significative des taux de pertes des flux comportant des paquets FEC par rapport à ceux sans FEC. Ces pertes excessives sont de toute évidence causées par la surcharge du goulot d'étranglement par les paquets FEC, ceci est plus apparent avec le FEC (2/3) où on voit les taux de pertes résiduelles les plus élevés par rapport aux autres taux de redondance.

En ce qui concerne la répartition des pertes sur les intervalles, on voit dans les tableaux C.9 et C.10 une efficacité limitée des flux FEC à quelques flux audio en particulier où par exemple au niveau de 30 flux dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps on a 6 flux dans l'intervalle [0-2] grâce à la technique FEC 2/3 alors qu'aucun flux n'a été maintenu dans cet intervalle dans le cas sans FEC.

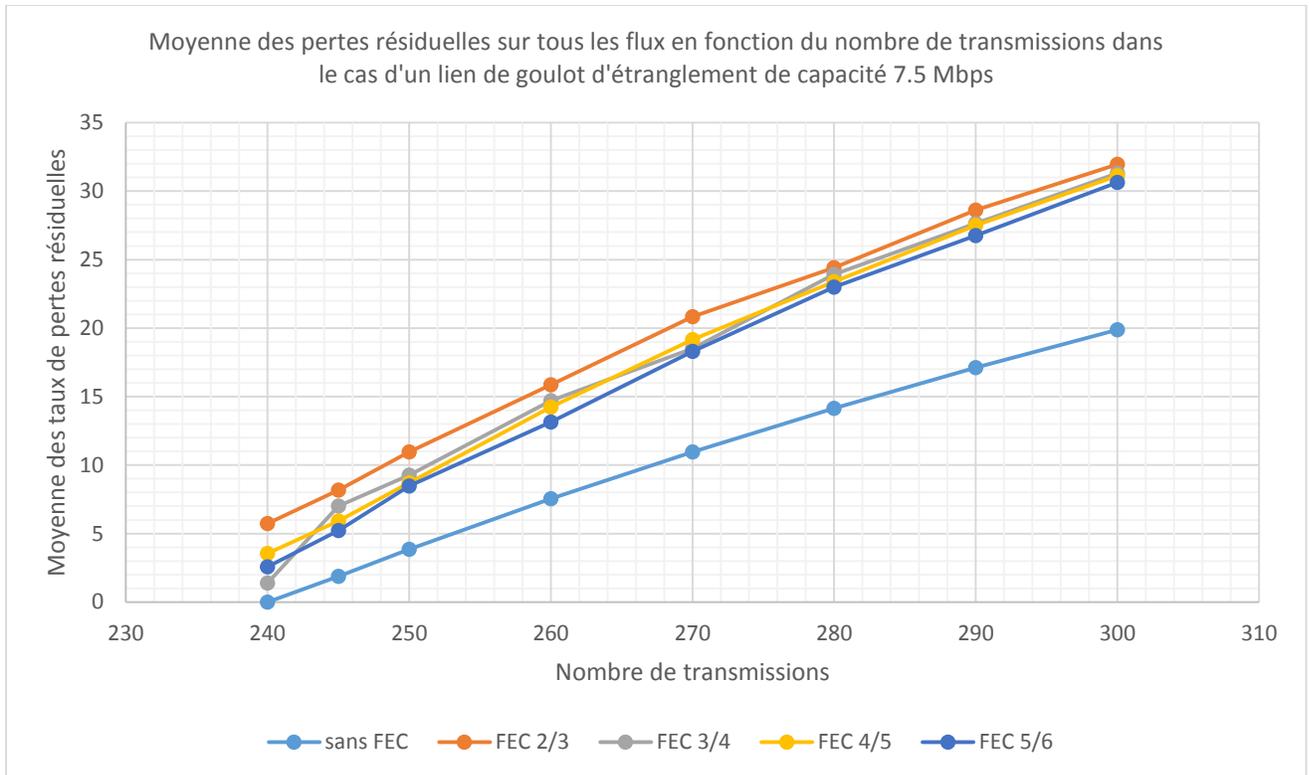


Figure 5.3 : Moyenne sur tous les flux des pertes résiduelles en fonction du nombre de transmissions avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

On constate cependant que d'autres flux AMR-WB ont subi des pertes excessives comme dans le cas de 30 flux (tableau 5.1) où on a 13 flux avec des pertes de taux supérieur à 20 % dans le cas avec FEC, mais sans FEC on en a juste 6. Dans le cas de 29 flux, avec FEC 2/3 on a 5 flux AMR-WB dont les pertes subies sont comprises entre 2 % et 5 %, 5 autres dont les pertes sont comprises entre 5 % et 10 % et 12 flux dont les pertes sont supérieures à 20 %, alors que sans FEC on a la totalité des flux avec un taux de pertes compris entre 10 % et 20 %. Cela fait que l'utilisation du FEC n'a pas grand intérêt dans ce cas.

Tableau 5.1 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps (cas de 29 et 30 flux)

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|
| 29 | 0 0 0 0 0 | 0 5 0 0 1 | 0 5 2 0 3 | 29 7 15 15 18 | 0 12 12 14 7 |
| 30 | 0 6 1 0 0 | 0 2 0 0 0 | 0 3 2 6 0 | 24 6 10 10 19 | 6 13 17 14 11 |

Avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps, on a aussi des résultats analogues (tableau C.10) à la différence près qu'on voit plus de disparité au niveau de la répartition des pertes où par exemple avec 260 flux on a eu 255 flux subissant des pertes entre 5 % et 10 % alors qu'avec FEC 2/3 on a 160 flux subissant des pertes dont les taux sont compris entre 0 % et 2 % et 100 flux dont les taux de pertes excèdent 20 %.

Cette disparité s'explique par le fait qu'un grand nombre de flux accentue le phénomène d'alignement des flux expliqué en 3.2.1 où des flux sont favorisés avec une qualité acceptable alors que d'autres deviennent encore plus défavorisés et leurs qualités sont complètement inaudibles.

La différence par rapport à Opus qu'on a constaté ici est le fait qu'avec AMR-WB la technique FEC a aidé à améliorer considérablement la qualité de plusieurs flux au détriment d'autres flux où la communication est devenue impossible.

5.1.2 Étude des pertes en rafale

L'étude des pertes en rafale (tableaux C.11 - C.14) montre que dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps on a, avec un nombre relativement faible de flux, une efficacité du FEC permettant de réduire les pertes en rafale (deux ou 3 consécutives). Par exemple, avec 26 et 27 flux le FEC 2/3 a aidé à garder 22 flux à un taux de pertes en rafale compris entre 0 % et 2 % alors que sans FEC on n'en avait que deux. Pour un nombre élevé de flux audio (à partir de 29 flux), on voit que cette tendance change où les pertes en rafale dans le cas de flux sans FEC diminuent et ce sont les pertes simples qui y prennent plus d'ampleur.

Cependant, dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de 7.5 Mbps les résultats obtenus (tableaux C.12 et C.14) montrent que les flux FEC n'aident pas à remédier aux pertes en rafale où on remarque que ces dernières sont plus apparentes avec FEC que dans le cas sans FEC. Ceci s'explique par le fait que la saturation du lien est plus élevée avec un grand nombre de flux et surtout lorsqu'on y rajoute les données FEC.

5.2 Efficacité du FEC appliqué à des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP

5.2.1 Étude des pertes

Les moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux (figure 5.5) montrent des fluctuations de la moyenne des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux audio pour des valeurs inférieures ou égales à 24; à partir de ce seuil et pareillement que dans le cas Opus on atteint le seuil de saturation du lien et par suite les résultats deviennent similaires à ceux obtenus sans l'ajout d'un trafic TCP.

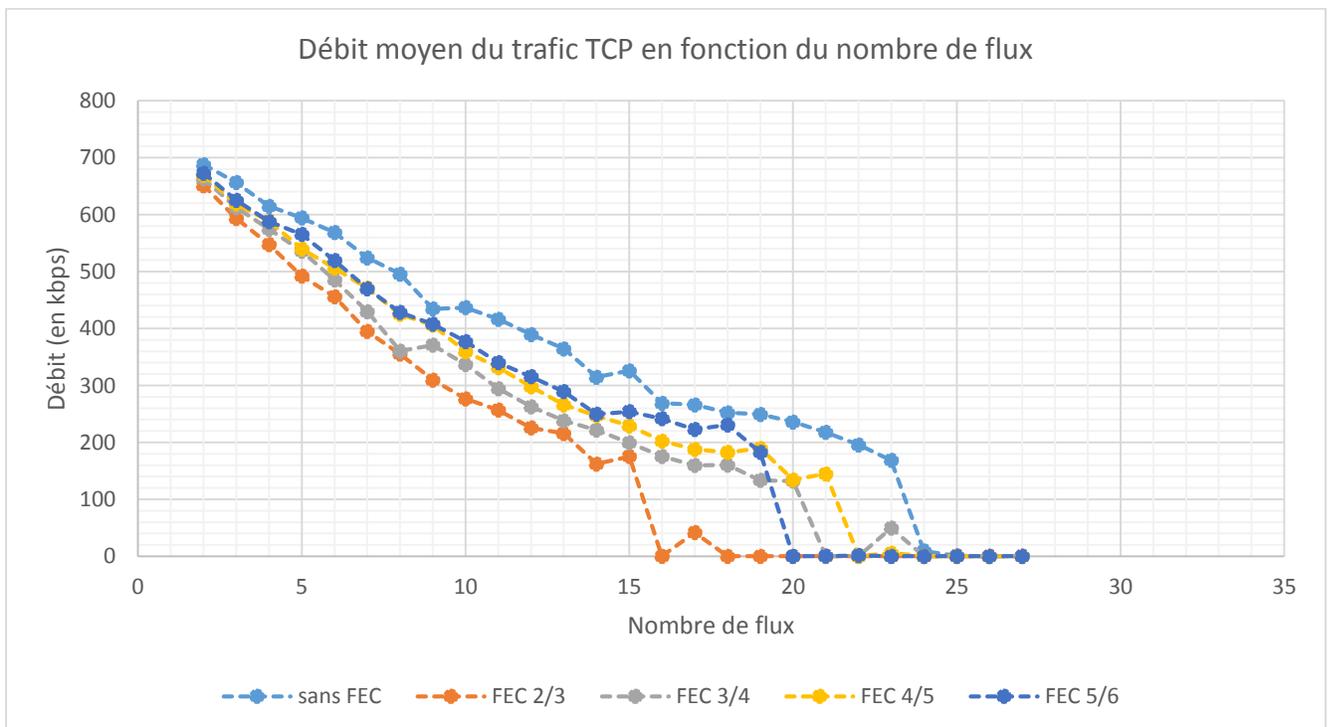


Figure 5.4 : Débit moyen du trafic TCP en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

Les moyennes des taux de pertes fluctuent en fonction du nombre de flux audio, ce qui est dû à l'impact du trafic TCP (figure 5.4) sur la saturation du réseau qui devient plus saturé avec un lien de goulot d'étranglement de faible capacité que lorsque ce dernier est de capacité élevée.

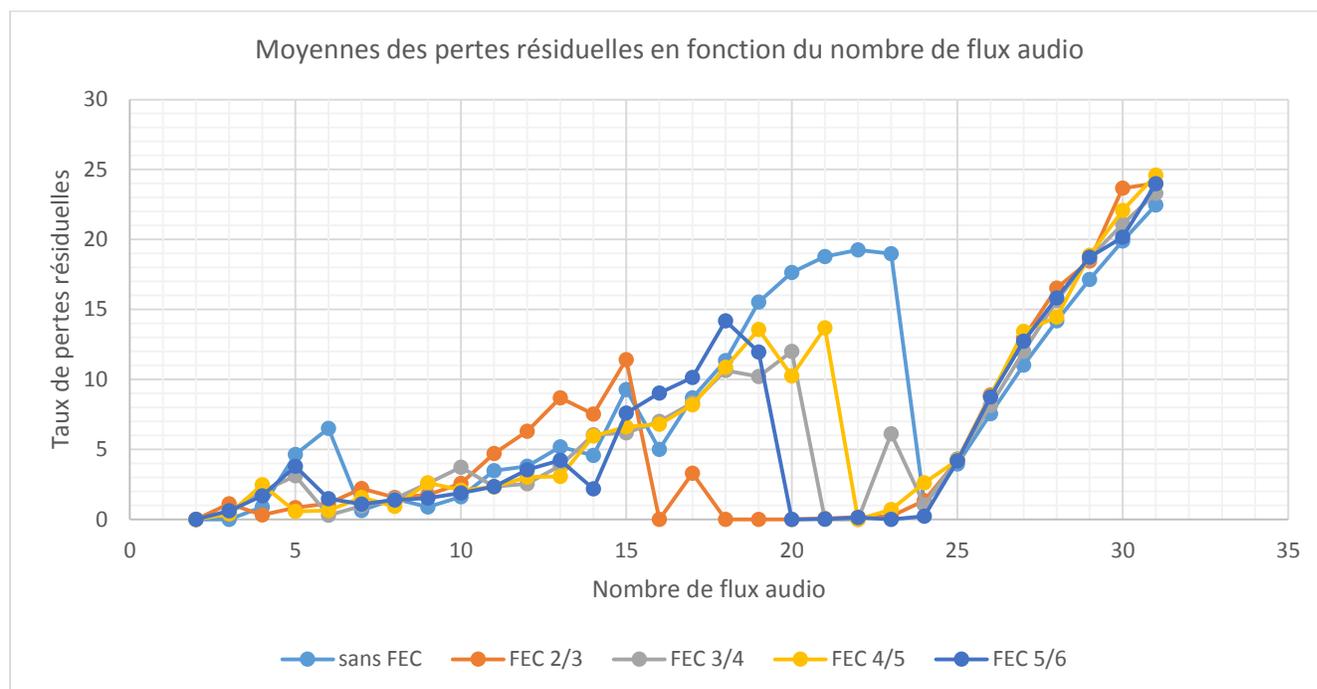


Figure 5.5 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

L'efficacité des flux FEC est perçue à partir de 16 flux en concurrence dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps où on a réussi à avoir un taux de pertes résiduelles moyen égal à 0 % comme ça été le cas avec 16 flux en concurrence et un taux de redondance FEC égal à 2/3 ou encore à partir de 20 flux avec FEC 5/6.

Des résultats avec moins de fluctuations sont obtenus avec un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps (figure 5.6) où les flux FEC révèlent une efficacité sans égale à réduire les pertes, permettant souvent de les rendre nulles comme cela a été le cas avec le taux de redondance 5/6 entre 175 et 205 flux audio. Ce comportement est bien entendu analogue à celui obtenu avec des flux Opus; donc on relève la même explication à savoir qu'avec des flux FEC on a une saturation du lien pour un nombre de flux moins élevé que dans le cas sans FEC. Cela fait

que le délai de retransmission maximal (retransmit timeout) est doublé et par suite de moins en moins de paquets TCP sont envoyés et donc le réseau est moins saturé.

Bien entendu la chute du niveau de pertes à 235 flux dans le cas sans FEC s'explique par le dépassement du seuil de saturation à ce niveau où le goulot d'étranglement devient saturé et par suite le comportement devient analogue à celui obtenu dans le cas de flux audio uniquement.

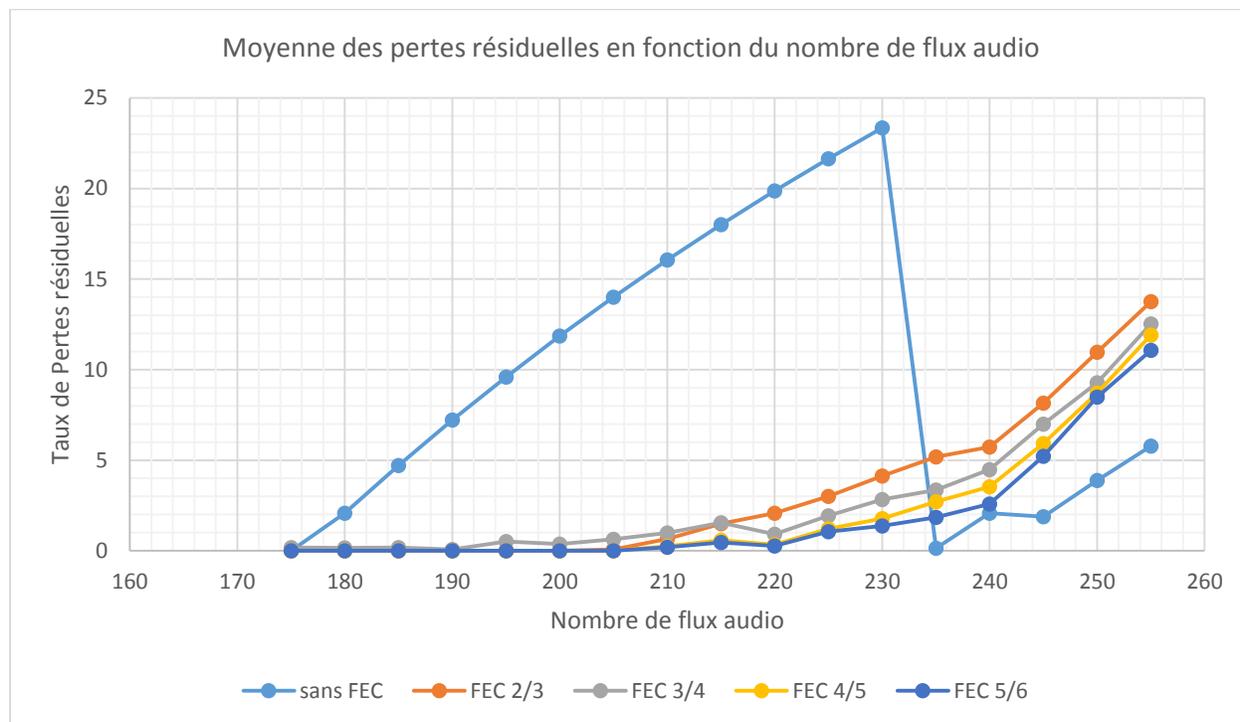


Figure 5.6 : Moyennes des pertes résiduelles en fonction du nombre de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

L'étude de la répartition des taux de pertes sur les différents paliers (tableaux [C.15](#) et [C.16](#)) montre que dans le cas de lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps on a à partir de 16 flux en concurrence un grand nombre de flux audio dont les pertes subies sont comprises entre 0 % et 2 % lorsqu'on y applique FEC, mais qui subissent plus de pertes dans le cas sans FEC. En effet, avec 18 flux en concurrence on a la totalité des 18 flux qui ne subissent aucune perte avec FEC 2/3 alors que sans FEC les taux de pertes subies sont comprises entre 10 % et 20 %.

Dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps on a dans le cas de 200 flux la totalité des flux qui sont gardés à l'intervalle [0-2] avec tous les taux de redondance FEC traités. Pour des valeurs supérieures du nombre de flux on a la majorité des flux audio qui sont inclus dans cet intervalle alors que pour les flux sans FEC les flux subissent majoritairement des pertes comprises dans les paliers [10-20] et supérieures à 20 %.

On en déduit que pareillement à Opus on a une efficacité du FEC à réduire les pertes résiduelles des flux audio dans le cas de concurrence avec un flux TCP pour des valeurs du nombre de flux inférieures au seuil de saturation.

5.2.2 Étude des pertes en rafale

Les pertes en rafale (de deux et 3 pertes consécutives) sont présentées dans les annexes [C.17](#)-[C.20](#); on voit que les pertes en rafale ne sont pas très présentes entre 5 et 11 flux pour un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps et entre 200 et 210 flux pour un lien de capacité 7.5 Mbps. Cependant après ces seuils les pertes en rafale commencent à apparaître, mais la technique FEC a prouvé sa capacité à les réduire, parfois même à les rendre complètement nulles comme cela a été le cas avec 21, 22 et 23 flux et FEC 2/3, aussi avec 230 et 235 flux et FEC 2/3.

On en déduit que les flux FEC réduisent les pertes en rafale dans le cas de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP sur un goulot d'étranglement, bien entendu pour des valeurs du nombre de flux audio inférieures au seuil de saturation.

5.3 Conclusion

Pareillement à Opus, la technique FEC ne montre aucune efficacité dans le cas de flux audio AMR-WB en concurrence sur un goulot d'étranglement où les taux de pertes sont même devenus largement supérieurs à ceux obtenus avec FEC surtout avec un lien de goulot d'étranglement de capacité élevée. Une efficacité du FEC est constatée dans le cas de flux audio en concurrence avec un flux TCP pour des nombres de flux audio inférieurs au seuil de saturation; cette efficacité

est de plus en plus apparente dans le cas de lien de goulot d'étranglement de capacité élevée. Cette efficacité dépend des taux de redondance FEC utilisés; en effet, le taux de redondance 5/6 montre les meilleures performances où pour des valeurs du nombre de flux proches du seuil de saturation les pertes résiduelles avec ce taux de redondance sont les moins élevées par rapport aux autres taux.

Chapitre 6

CONCLUSION

Au cours de cette étude on a évalué l'efficacité de différentes variantes du mécanisme FEC sur des flux audio Opus et AMR-WB en concurrence sur un lien de goulot d'étranglement : L'étude a porté sur le In-band FEC et le out-of-band FEC à différents taux de redondance : 2/3, 3/4, 4/5 et 5/6.

On a vu que le In-band FEC n'est pas efficace, mais bien au contraire réduit légèrement la qualité d'expérience par rapport au cas où In-band FEC n'est pas utilisé. Cela est dû au fait que l'on conserve le même débit de codage alors qu'on est en train de rajouter des données In-band FEC au flux de données ce qui fait qu'on a une baisse de la qualité audio. En pratique on doit augmenter le débit de codage pour conserver la même qualité audio tout en rajoutant des données In-band FEC.

Concernant le out-of-band FEC, deux cas ont été traités jusque-là : le cas simple où on a juste des flux audio en concurrence au niveau du goulot d'étranglement et le cas où les flux sont en concurrence avec un flux TCP sur lequel est envoyé un trafic FTP.

Dans le cas simple, on a vu que les flux audio subissent plus de pertes lorsqu'on y ajoute des données FEC que lorsqu'ils n'y sont pas ajoutées; ceci est tout à fait explicable par le fait que l'ajout du FEC cause une surcharge du réseau qui engendre plus de pertes que celles qu'on avait sans FEC. Les pertes résiduelles ainsi obtenues sont légèrement supérieures à celles obtenues sans FEC dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de faible capacité, mais elles sont largement supérieures avec un goulot d'étranglement de capacité élevée. On trouve l'explication à ce phénomène dans le fait que la surcharge du lien est de plus en plus importante avec un nombre très élevé de flux en concurrence et surtout avec l'ajout des flux FEC. Même l'étude des pertes en rafale a révélé que FEC n'aide pas à réduire ces derniers qui bien au contraire ont augmenté considérablement pour la même raison citée précédemment.

Dans le cas où on a ajouté du trafic TCP en concurrence avec les flux audio on a vu une efficacité du FEC permettant, pour certaines valeurs du nombre de flux audio inférieures au seuil de saturation, de rendre les pertes résiduelles complètement nulles et dans d'autres cas d'obtenir des valeurs de pertes résiduelles beaucoup moins élevées que dans le cas sans FEC. Ceci résulte du fait que la saturation du goulot d'étranglement fait en sorte qu'un paquet TCP émis après la saturation de la file d'attente a plus de chance d'être perdu, et par conséquent TCP double le délai maximal de retransmission et ainsi de suite. Finalement on se trouve avec une source TCP qui n'envoie plus de paquets; ce qui est contraire au cas sans FEC où la saturation du réseau est atteinte à un nombre relativement élevé de flux audio. Dans ce cas les paquets TCP n'ont aucune difficulté à être acheminés à la destination et par suite on a de plus en plus de paquets qui sont envoyés par la source et donc les flux audio sont plus défavorisés et donc subissent plus de pertes.

La taille de paquets utilisée ou encore le débit de codage audio joue un rôle déterminant quant à l'efficacité du FEC où on a vu que les pertes en rafales ont diminué quand on est passé du débit de codage 20 kbps à 32 kbps, ce qui veut dire une meilleure efficacité du FEC.

Le taux de redondance joue aussi un rôle important quant à la réduction des pertes résiduelles où on a vu que les FEC avec un taux de redondance élevé sont plus efficaces : le taux de redondance $5/6$ est le plus efficace suivi par $4/5$, $3/4$ et $2/3$.

Comme perspective de suite à ce travail, on propose de faire une étude analogue avec un goulot d'étranglement dont la file d'attente est de type RED ou SFQ, en commençant en premier lieu par l'étude de cas de deux sources et observer les répartitions des pertes entre les flux. Par la suite, l'étude devra porter sur l'étude de plusieurs flux concurrents et finalement le cas de flux audio concurrents avec un flux TCP.

Cette étude s'est contentée du cas de flux Opus et AMR-WB et n'a pas traité le cas de flux audio EVS, donc il serait intéressant de réaliser l'étude sur des flux de ce genre avec des débits de codage assez élevés (48 kbps et plus). Les autres débits de codage seraient analogues aux cas traités avec Opus et AMR-WB.

RÉFÉRENCES

- [1] Brian C. Wales, «history,» 26 juin 1991. [En ligne]. Disponible: <http://www.speakfreely.org/history.html>. [Accès le 17 mai 2016].
- [2] Ibisworld, «VoIP in the US: Market Research Report,» *ibisworld*, avril 2016.
- [3] S. Barker, «Future voice strategies,» Juniper, Canada, Allemagne, Japon, Royaume Unis, États Unis, octobre 2015.
- [4] Statista, «Global social networks ranked by number of users 2016,» 18 avril 2016. [En ligne]. Disponible: <http://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networks-ranked-by-number-of-users/>. [Accès le 17 mai 2016].
- [5] J. Valin, «Requirements for an Internet Audio Codec,» *RFC 6366*, août 2011.
- [6] Chen Raymond, Timothy Terriberry, Jan Skoglund, Gregory Maxwell et Hoang Thi Minh Nguyet, «Opus testing,» [En ligne]. Disponible: www.ietf.org/proceedings/80/slides/codec-4.pdf. [Accès le 17 mai 2016].
- [7] 3GPP, «3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Mandatory Speech Codec speech processing functions; AMR Wideband speech codec; Transcoding functions,» *TS 26.190*, 2000.
- [8] 3GPP, «Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; codec for enhanced voice services (EVS); general overview,» *3gpp TS 26.441 version 13.0.0 release 13*, 2016.
- [9] ITU, «Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs,»

- février 2001. [En ligne]. Disponible: [://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en](http://www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200102-I/en). [Accès le 17 mai 2016].
- [10] ITU, «Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs,» novembre 2005. [En ligne]. Disponible: www.itu.int/rec/T-REC-P.862-200511-I!Amd2/en. [Accès le 17 mai 2016].
- [11] ITU, «Recommandation ITU-T E.800: Definition of terms related to quality of service,» septembre 2008. [En ligne]. Disponible: www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I/en. [Accès le 17 mai 2016].
- [12] S. Bradner, «Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices,» *RFC 1242*, juillet 1991.
- [13] Cisco, «Quality of Service for Voice over IP,» 16 avril 2001. [En ligne]. Disponible: http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/solutions_docs/qos_solutions/QoSVoIP/QoSVolP.html. [Accès le 17 mai 2016].
- [14] C. Demichelis, «IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM),» *RFC 3393*, novembre 2002.
- [15] Yan Chen, Toni Farley et Nong Ye, «QoS requirements of network applications on the internet,» *IOS press*, vol. 4, pp. 55-76, 2004.
- [16] J. Uberti, «WebRTC Forward Error Correction Requirements,» *draft-ietf-rtcweb-fec-03*, 20 mars 2016.
- [17] Yi Han, Damien Magoniy, Patrick McDonagh et Liam Murphy, «Determination of Bit-rate adaptation thresholds for Opus codec for VoIP services,» *IEEE*, 23-26 juin 2014.
- [18] J. Ingremer, F. Tomas et S. Per, «Bandwidth efficient AMR operation for VoIP,» *Speech coding, IEEE Workshop Proceedings*, pp. 150-152, 2002.

- [19] M. Manousos, S. Apostolacos, I. Grammatikakis, D. Mexis, D. Kagklis et E. Sykas, «Voice-Quality Monitoring and control for VoIP,» *IEEE Internet Computing*, vol. 9, n° 14, pp. 35-42, 2005.
- [20] Leandro S G De Carvalho et Edjair de Sousa Mota, «Survey on application-layer mechanisms for speech quality adaptation in VoIP,» *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 45, n° 13, pp. 361-3631, 2013.
- [21] A. Li et Ed, «RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction,» *RFC 5109*, décembre 2007.
- [22] Xiph.org foundation, «downloads,» [En ligne]. Disponible: www.opus-codec.org/downloads/. [Accès le 18 mai 2016].
- [23] ITU, «ITU-T Test Signals for Telecommunication Systems,» [En ligne]. Disponible: <http://www.itu.int/net/itu-t/sigdb/genaudio/AudioForm-g.aspx?val=1000050>. [Accès le 18 mai 2016].
- [24] V. Laroshenko, O. Jokish, M. Maruschke et M. Meszaros, «Audio and speech quality survey of the Opus codec,» *27e Conférence électronique Speech Signal Processing*, mars 2016.
- [25] Michael Maruschke, Olivier Jikisch, Martin Meszaros et Victor Laroshenko, «Review of the Opus Codec in a WebRTC Scenario for Audio and Speech Communication,» chez *speech and computer*, Springer International Publishing, 04 septembre 2015, pp. 348-355.
- [26] GSM association, «Adaptive Multirate Wide Band, version 2,» 21 février 2013.

Annexe A

```
set ns [new Simulator]

set f [open out.tr w]

$ns trace-all $f

$ns color 1 Blue

$ns color 2 Red

set nf [open out.nam w]

$ns namtrace-all $nf

proc finish {} {
    global ns nf
    $ns flush-trace
    close $nf
    exit 0
}

# r est le nombre de sources et s est la taille en octets des paquets de données primaires

set r [lindex $argv 0]

set s [lindex $argv 1]

#creation des noeuds

for {set i 1} {$i <= [expr $r*2 + 2]} {incr i} {
    set n($i) [$ns node]
}

#creation des liens

for {set i 1} {$i <= [expr $r*2]} {incr i} {
```

```

    $ns duplex-link $n($i) $n([expr $r*2+1]) 2 Mb 10ms DropTail
}
$ns duplex-link $n([expr $r*2 + 1]) $n([expr $r*2 + 2]) 0.75 Mb 10ms DropTail
$ns queue-limit $n([expr $r*2 + 1]) $n([expr $r*2 + 2]) 50
set null1 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $n([expr $r*2 + 2]) $null1

```

creation des agents UDP

```

for {set i 1} {$i <= $r} {incr i} {
    set udp($i) [new Agent/UDP]
    $ns attach-agent $n($i) $udp($i)
    set cbr($i) [new Application/Traffic/CBR]
    $cbr($i) set packetSize_ [lindex $argv 1]
    $cbr($i) set interval_ 0.02
    $cbr($i) attach-agent $udp($i)
    $ns connect $udp($i) $null1
    $udp($i) set fid_ $i
}

```

#creation des agents CBR

```

for {set i 1} {$i <= $r} {incr i} {
    set udp([expr $i + $r]) [new Agent/UDP]
    $ns attach-agent $n([expr $i + $r]) $udp([expr $i + $r])
    set cbr([expr $i + $r]) [new Application/Traffic/CBR]
    $cbr([expr $i + $r]) set packetSize_ [expr $s + 14]
    $cbr([expr $i + $r]) set interval_ 0.04
}

```

```

$cbr([expr $i + $r]) attach-agent $udp([expr $i + $r])
$ns connect $udp([expr $i + $r]) $null1
$udp([expr $i + $r]) set fid_ $i
}

```

début de transmission des paquets utiles

```

for {set i 1} {$i <= $r} {incr i} {
$ns at [expr (0.02/$r)*$i] "$cbr($i) start"
}

```

#début de transmission des paquets FEC

```

for {set i [expr $r+1]} {$i <= $r*2} {incr i} {
$ns at [expr ((0.02/$r)*($i-$r))+0.02] "$cbr($i) start"
}

```

```

for {set i 1} {$i <= [expr $r*2]} {incr i} {

```

```

$ns at 61 "$cbr($i) stop"

```

```

}}

```

```

$ns at 62 "finish"

```

```

$ns run

```

Exemple d'appel dans une commande linux : ns voipnetwork.tcl 23 90

Le script est dans ce cas exécuté avec 23 sources et des paquets de données primaires de taille 90 octets

Annexe B

```
BEGIN {

    fsDrops = 0; #nombre de paquets perdus
    numFs = 0; # nombre de paquets envoyés
    seq = 0; # numéro de séquence du flux primaire
    seq_fec = 0; #numéro de sequence du flux FEC
    k=0;      # numéro de case du tableau représentatif du flux
              primaire
    k_fec=0; # numéro de case du tableau représentatif du flux FEC
}
{
action = $1;
time = $2;
from = $3;
to = $4;
type = $5;
pktsize = $6;
flow_id = $8;
src = $9;
dst = $10;
seq_no = $11;
packet_id = $12;

#1500 correspond au numéro de sequence du paquet à partir duquel on
commence à compter les pertes et 750 est le numéro de sequence du
paquet FEC correspondant (ici le FEC 2/3)

if (seq_no<=1500 && flow_id==2 && to == 3 && action=="+")
    {
    seq=seq_no;
    }
}
```

```

if (seq_no<=750 && flow_id==5 && to == 3 && action=="+")
{
    seq_fec=seq_no;
}

#génération d'un tableau (audio_flow) spécifiant l'état de chaque
paquet de trafic utile : 1 si le paquet est reçu par le nœud
destinataire et 0 sinon

if (flow_id==2 && action == "r" && to == 3 && seq_no<3000 &&
seq_no=> 1500)
{
    if (seq == seq_no)
    {
        audio_flow[k]=1;
        seq++;
        k++;
    }
    Else
    {
        k=seq_no-seq+k;
        audio_flow[k]=1;
        k++
        seq=seq_no+1;
    }
}

#génération d'un tableau (fec_flow) spécifiant l'état de chaque paquet
du flux fec : 1 si le paquet est reçu par le nœud destinataire et 0
sinon

if (flow_id==5 && action == "r" && to == 3 && seq_no<1500 && seq-
no=> 750)
{
    if (seq_fec == seq_no)
    {

```

```

        fec_flow[k_fec]=1;
        seq_fec++;
        k_fec++;
    }
    Else
    {
        k_fec=seq_no-seq_fec+k_fec;
        fec_flow[k_fec]=1;
        seq_fec=seq_no+1;
        k_fec++;
    }
}

#calcul du nombre de paquets de trafic utile et du nombre de paquets
perdus au niveau du goulot d'étranglement
if (flow_id==2 && action == "d" && seq_no<3000 && seq_no=> 1500)
{
    fsDrops++;
}
if (flow_id==2 && seq_no<3000 && seq_no=> 1500 && action == "+" && from
== 2 )
{
    numFs++;
}
}
END {

#analyse des flux audio et FEC et génération du taux de pertes
résiduelles
for (j = 1; j<1500; j=j+2)
{

    if (audio_flow[j] == 0 && audio_flow[j-1] == 0
    {

```

```
        residualDrop=residualDrop+2;
    }
    else if (audio_flow[j] == 0 || audio_flow[j-1] == 0)
    {
        if (fec_flow[(j-1)/2] == 0)
        {
            residualDrop++;
        }
    }
}
printf("%f\t%f\n", (fsDrops/numFs)*100, (residualDrop/numFs)*100);
```

Annexe C

Tableau C.1 : Pertes résiduelles en fonction du nombre de flux de 32 kbps dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|----------------|------------|--------------|----------------|----------------|
| 15 | 15 15 14 15 15 | 0 0 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 13 5 9 13 5 | 0 9 6 0 10 | 0 2 1 0 1 | 3 0 0 3 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 6 0 0 6 0 | 0 0 0 0 2 | 0 10 15 0 10 | 11 7 2 11 5 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 9 0 0 0 | 17 8 18 18 18 | 1 1 0 0 0 |
| 19 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 11 16 18 15 14 | 8 3 1 4 5 |
| 20 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 5 2 6 0 4 | 15 18 14 20 16 |
| 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 3 0 0 | 21 21 18 21 21 |
| 22 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 22 22 22 22 22 |

Tableau C.2 : Pertes résiduelles dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------------|
| 140 | 140 140 140 140 140 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 145 | 145 134 134 137 139 | 0 0 0 0 5 | 0 11 11 7 1 | 0 0 0 1 0 | 0 0 0 0 0 |
| 150 | 150 122 141 129 140 | 0 0 0 13 10 | 0 21 0 8 0 | 0 7 9 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 155 132 110 148 138 | 0 0 34 0 5 | 0 0 10 0 11 | 0 21 1 0 0 | 0 2 0 7 1 |
| 160 | 140 76 45 61 55 | 5 0 55 52 39 | 0 53 36 38 50 | 0 17 23 8 16 | 15 14 1 1 0 |
| 165 | 125 11 99 34 7 | 5 24 0 25 47 | 0 67 0 58 61 | 0 55 45 40 48 | 35 8 21 8 2 |
| 170 | 110 19 84 39 71 | 5 0 0 0 0 | 0 36 0 32 34 | 0 73 51 74 32 | 55 42 35 25 33 |
| 175 | 75 11 6 16 0 | 25 0 8 16 2 | 0 27 29 22 34 | 0 97 92 69 122 | 75 40 40 52 17 |
| 180 | 80 52 107 3 4 | 5 0 0 1 2 | 0 0 0 19 22 | 0 44 0 93 75 | 95 84 73 64 77 |
| 185 | 65 2 0 11 3 | 5 7 0 0 7 | 0 19 11 27 15 | 0 67 70 59 54 | 115 90 104 88 106 |
| 190 | 50 0 6 0 0 | 5 3 4 0 0 | 0 7 16 4 0 | 0 67 40 53 23 | 135 113 124 133 167 |
| 195 | 35 0 86 0 0 | 5 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 50 0 28 17 | 155 145 109 167 178 |
| 200 | 0 13 0 0 0 | 25 0 0 0 0 | 0 19 0 0 0 | 0 42 28 8 11 | 175 126 172 192 189 |

Tableau C.3 : Taux de pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 140 | 140 140 140 140 140 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 145 | 145 145 145 145 145 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 150 | 150 147 150 150 150 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 3 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 155 154 155 154 154 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 1 | 0 1 0 1 0 |
| 160 | 160 142 150 152 146 | 0 0 0 0 0 | 0 0 9 8 14 | 0 17 1 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 165 | 165 101 160 137 140 | 0 0 0 0 20 | 0 52 0 26 5 | 0 12 0 2 0 | 0 0 5 0 0 |
| 170 | 170 106 149 141 154 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 47 0 22 15 | 0 17 21 7 1 |
| 175 | 175 120 96 114 73 | 0 0 0 0 51 | 0 0 55 39 50 | 0 43 18 21 1 | 0 12 6 1 0 |
| 180 | 180 145 154 126 143 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 36 0 | 0 0 0 17 37 | 0 35 26 1 0 |
| 185 | 185 82 53 113 91 | 0 0 0 0 0 | 0 69 68 0 65 | 0 30 54 67 26 | 0 4 10 5 3 |
| 190 | 190 71 64 69 12 | 0 0 0 0 45 | 0 68 53 64 97 | 0 47 48 52 36 | 0 4 25 5 0 |
| 195 | 195 52 151 17 42 | 0 0 0 40 72 | 0 83 0 65 54 | 0 39 0 66 26 | 0 21 44 7 1 |
| 200 | 200 155 38 17 60 | 0 0 0 50 2 | 0 0 60 71 68 | 0 41 77 61 60 | 0 4 25 1 10 |

Tableau C.4 : Taux de pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps en fonction du nombre de flux de 32 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 140 | 140 140 140 140 140 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 145 | 145 145 145 145 145 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 150 | 150 150 150 150 150 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 155 155 155 155 155 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 160 | 160 159 160 160 160 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 165 | 165 156 165 165 164 | 0 0 0 0 0 | 0 8 0 0 1 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 170 | 170 157 169 170 167 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 12 0 0 0 | 0 1 1 0 3 |
| 175 | 175 153 174 175 173 | 0 0 0 0 2 | 0 0 0 0 0 | 0 22 1 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 180 | 180 167 180 175 180 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 5 0 | 0 13 0 0 0 |
| 185 | 185 154 169 185 173 | 0 0 0 0 0 | 0 0 10 0 0 | 0 27 6 0 12 | 0 4 0 0 0 |
| 190 | 190 142 179 169 156 | 0 0 0 0 32 | 0 0 0 21 2 | 0 43 11 0 0 | 0 5 0 0 0 |
| 195 | 195 123 195 153 152 | 0 0 0 33 0 | 0 0 0 9 30 | 0 56 0 0 13 | 0 16 0 0 0 |
| 200 | 200 168 148 122 166 | 0 0 0 2 0 | 0 0 42 64 29 | 0 0 7 12 5 | 0 32 3 0 0 |

Tableau C.5 : Pertes en fonction du nombre de flux de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 2 | 2 2 2 2 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 3 | 0 3 3 3 3 | 3 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 4 | 4 4 4 4 4 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 5 | 5 4 4 5 5 | 0 1 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 6 4 4 5 6 | 0 2 2 1 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 0 4 5 7 5 | 7 1 2 0 2 | 0 2 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 1 1 5 4 3 | 7 7 3 4 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 0 0 2 5 2 | 9 1 7 4 7 | 0 7 0 0 0 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 0 0 0 0 5 | 10 2 2 6 5 | 0 8 8 4 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 0 1 1 0 0 0 | 11 0 1 7 3 | 0 0 5 4 8 | 0 0 5 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 0 0 0 0 0 | 0 3 5 2 2 | 12 9 7 10 10 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 0 13 0 0 0 | 0 0 0 2 0 | 13 0 2 11 10 | 0 0 11 0 3 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 0 14 0 14 14 | 0 0 1 0 0 | 0 0 13 0 0 | 14 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 0 15 14 15 15 | 0 0 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 15 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 13 5 11 13 5 | 0 9 2 0 10 | 0 2 3 0 1 | 3 0 0 3 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 6 0 0 6 0 | 0 0 0 0 1 | 0 10 15 0 9 | 11 7 2 11 7 | 0 0 0 0 0 |

Tableau C.6 : Pertes en fonction du nombre de flux de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 120 | 120 120 120 120 120 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 125 | 125 125 125 125 125 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 130 | 127 130 130 130 130 | 3 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 135 | 10 135 135 135 112 | 125 0 0 0 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 140 | 140 140 133 140 140 | 0 0 7 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 145 | 3 139 113 143 139 | 142 0 32 0 5 | 0 0 0 2 1 | 0 6 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 150 | 0 122 141 124 133 | 146 0 0 17 14 | 4 21 0 9 0 | 0 7 9 0 3 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 43 132 145 144 115 | 108 0 0 0 28 | 4 0 0 0 12 | 0 21 0 8 0 | 0 2 10 3 0 |
| 160 | 145 76 45 61 55 | 0 0 55 52 39 | 0 53 48 38 50 | 0 17 12 8 15 | 15 14 0 1 1 |
| 165 | 125 11 99 34 6 | 5 24 0 25 49 | 0 67 0 58 60 | 0 55 45 40 48 | 35 8 21 8 2 |

Tableau C.7 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 140 | 140 140 140 140 140 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 145 | 145 145 145 145 145 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 150 | 150 147 150 150 150 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 3 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 155 | 155 154 154 155 155 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 1 0 0 |
| 160 | 160 142 150 152 146 | 0 0 0 0 0 | 0 0 9 8 14 | 0 17 1 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 165 | 165 101 160 137 140 | 0 0 0 0 20 | 0 52 0 26 5 | 0 12 0 2 0 | 0 0 5 0 0 |

Tableau C.8 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) en fonction du nombre de flux Opus de 32 kbps en concurrence avec un flux TCP dans le cas d'un goulot d'étranglement de 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 2 | 2 2 2 2 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 3 | 3 3 3 3 3 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 4 | 4 4 4 4 4 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 5 | 5 5 5 5 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 6 6 6 6 6 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 7 5 7 7 5 | 0 2 0 0 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 8 8 8 8 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 9 4 9 9 9 | 0 5 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 10 10 10 10 10 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 11 11 3 11 5 | 0 0 8 0 6 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 12 12 3 10 7 | 0 0 9 2 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 13 13 4 12 7 | 0 0 9 1 6 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 13 14 11 14 14 | 1 0 3 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 12 15 15 15 15 | 3 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 16 16 16 16 16 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 17 17 17 17 17 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

Tableau C.9 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| 24 | 24 15 18 21 23 | 0 9 4 2 1 | 0 0 2 0 0 | 0 0 0 1 0 | 0 0 0 0 0 |
| 25 | 0 6 10 4 6 | 25 7 6 14 11 | 0 9 7 7 8 | 0 3 2 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 0 2 0 1 1 | 1 9 1 5 4 | 25 9 19 10 13 | 0 6 6 10 8 | 0 0 0 0 0 |
| 27 | 0 1 0 6 0 | 0 0 1 0 6 | 4 9 8 6 10 | 23 10 16 8 5 | 0 7 2 7 6 |
| 28 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 2 | 0 4 4 4 10 | 28 18 20 22 10 | 0 6 4 2 6 |
| 29 | 0 0 0 0 0 | 0 5 0 0 1 | 0 5 2 0 3 | 29 7 15 15 18 | 0 12 12 14 7 |
| 30 | 0 6 1 0 0 | 0 2 0 0 0 | 0 3 2 6 0 | 24 6 10 10 19 | 6 13 17 14 11 |
| 31 | 0 2 1 0 0 | 0 0 0 0 1 | 0 1 4 4 7 | 5 10 7 9 11 | 26 18 19 18 12 |

Tableau C.10 : Pertes en fonction du nombre de flux AMR-WB dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 240 | 240 194 230 212 163 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 63 | 0 0 0 0 14 | 0 46 10 28 0 |
| 245 | 185 212 169 135 199 | 0 0 0 0 0 | 60 0 0 66 0 | 0 0 56 31 28 | 0 33 20 13 18 |
| 250 | 125 94 152 40 123 | 0 0 0 48 0 | 125 74 0 73 56 | 0 55 57 72 58 | 0 27 41 17 13 |
| 255 | 65 62 16 176 0 | 0 0 37 0 27 | 190 66 60 0 87 | 0 67 88 0 133 | 0 60 54 79 8 |
| 260 | 5 160 94 171 148 | 0 0 0 0 0 | 255 0 0 0 0 | 0 0 68 0 56 | 0 100 98 89 56 |
| 265 | 0 19 23 26 3 | 0 0 0 0 11 | 210 55 41 23 52 | 55 66 136 154 126 | 0 125 65 62 73 |
| 270 | 0 65 171 0 0 | 0 0 0 1 1 | 155 0 0 11 31 | 115 67 0 135 145 | 0 138 99 123 93 |
| 275 | 0 43 99 7 48 | 0 24 0 8 0 | 100 0 0 44 50 | 175 77 64 102 72 | 0 131 112 114 105 |
| 280 | 0 1 157 0 0 | 0 0 0 2 1 | 45 13 0 10 9 | 235 81 0 73 95 | 0 185 123 195 175 |
| 285 | 0 177 0 38 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 32 | 275 0 60 38 87 | 10 108 225 209 143 |
| 290 | 0 176 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 6 12 4 | 225 0 29 72 71 | 65 114 255 206 215 |
| 295 | 0 165 36 55 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 175 0 25 36 16 | 120 130 234 204 279 |

Tableau C.11 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 23 | 23 23 23 23 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 24 | 24 24 24 24 24 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 25 | 25 24 24 24 25 | 0 0 0 1 0 | 0 1 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 2 22 19 6 11 | 0 0 5 10 0 | 24 4 2 9 13 | 0 0 0 1 2 | 0 0 0 0 0 |
| 27 | 13 22 10 22 17 | 0 0 9 0 1 | 14 0 7 0 7 | 0 5 1 2 2 | 0 0 0 3 0 |
| 28 | 23 10 11 28 19 | 0 7 5 0 0 | 5 10 11 0 7 | 0 1 1 0 2 | 0 0 0 0 0 |
| 29 | 29 12 8 7 19 | 0 0 4 10 0 | 0 7 12 12 8 | 0 7 5 0 2 | 0 3 0 0 0 |
| 30 | 30 22 16 6 11 | 0 0 2 11 10 | 0 6 0 0 9 | 0 2 12 13 0 | 0 0 0 0 0 |
| 31 | 31 19 22 26 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 6 | 0 11 6 5 4 | 0 1 1 0 0 |

Tableau C.12 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 240 | 240 234 240 234 239 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 1 | 0 6 0 6 0 |
| 245 | 245 245 236 233 233 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 12 0 | 0 0 9 0 12 |
| 250 | 250 210 234 202 231 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 45 0 | 0 37 0 3 19 | 0 3 16 0 0 |
| 255 | 255 189 151 230 132 | 0 0 0 0 88 | 0 0 83 0 30 | 0 61 18 0 5 | 0 5 3 25 0 |
| 260 | 260 240 208 220 230 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 20 52 40 30 |
| 265 | 265 165 172 161 141 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 82 | 0 83 81 94 40 | 0 17 12 10 2 |
| 270 | 270 198 221 57 71 | 0 0 0 122 84 | 0 0 0 66 81 | 0 0 0 25 34 | 0 72 49 0 0 |
| 275 | 275 216 230 123 203 | 0 2 0 0 0 | 0 0 0 104 0 | 0 0 0 37 71 | 0 57 45 11 1 |
| 280 | 280 125 210 65 61 | 0 5 0 0 99 | 0 71 0 121 92 | 0 76 0 71 26 | 0 3 70 23 2 |

Tableau C.13 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|----------------|-----------|-------------|------------|-----------|
| 25 | 25 25 25 25 25 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 26 | 26 26 15 19 22 | 0 0 7 5 0 | 0 0 4 2 4 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 27 | 15 23 12 19 13 | 0 0 4 0 0 | 1 0 7 0 9 | 11 4 4 7 5 | 0 0 0 1 0 |
| 28 | 15 18 12 15 19 | 0 0 7 0 0 | 1 10 8 13 7 | 12 0 1 0 2 | 0 0 0 0 0 |
| 29 | 19 29 0 2 14 | 0 0 6 4 0 | 1 0 18 11 9 | 9 0 5 12 5 | 0 0 0 0 1 |
| 30 | 30 20 22 22 16 | 0 0 0 7 0 | 0 0 0 0 13 | 0 9 7 1 1 | 0 1 1 0 0 |
| 31 | 31 22 12 20 14 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 15 | 0 7 16 8 1 | 0 2 3 3 1 |

Tableau C.14 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas de flux AMR-WB et un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|----------------|---------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|
| 240 | 240 239 240 240 240 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |
| 245 | 245 245 244 243 245 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 1 2 0 |
| 250 | 250 242 250 245 249 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 5 0 | 0 8 0 0 1 |
| 255 | 255 242 251 252 253 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 2 | 0 0 4 0 0 | 0 13 0 3 0 |
| 260 | 260 249 255 259 258 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 11 5 1 2 |
| 265 | 265 237 255 263 240 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 24 | 0 0 10 2 1 | 0 28 0 0 0 |
| 270 | 270 247 270 216 254 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 43 15 | 0 0 0 11 1 | 0 23 0 0 0 |
| 275 | 275 252 253 264 261 | 0 6 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 9 0 | 0 17 22 2 14 |
| 280 | 280 214 280 250 229 | 0 2 0 0 0 | 0 0 0 0 35 | 0 62 0 30 16 | 0 2 0 0 0 |

Tableau C.15 : Pertes dans le cas de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP et un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 3 | 3 3 3 3 3 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 4 | 4 4 3 1 2 | 0 0 1 3 2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 5 | 0 5 1 5 0 | 5 0 4 0 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 0 5 6 5 4 | 0 1 0 1 2 | 6 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 7 3 6 5 7 | 0 4 1 2 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 8 6 7 8 8 | 0 2 1 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 9 5 4 3 8 | 0 4 5 6 1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 5 5 2 5 6 | 5 4 5 5 4 | 0 1 3 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 0 3 3 3 5 | 11 3 8 8 6 | 0 5 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 0 1 1 7 0 | 12 4 11 3 11 | 0 7 0 2 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 0 0 0 3 0 | 6 1 13 10 10 | 7 8 0 0 3 | 0 4 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 0 0 0 6 6 | 12 1 4 2 6 | 2 12 10 3 2 | 0 1 0 3 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 0 0 3 0 0 | 0 0 4 4 0 | 15 5 4 11 15 | 0 10 4 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 0 16 0 0 0 | 10 0 4 4 0 | 6 0 9 11 11 | 0 0 3 1 5 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 0 0 0 0 0 | 0 17 4 1 0 | 17 0 7 11 8 | 0 0 6 5 9 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 0 18 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 8 9 0 | 18 0 10 9 18 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 0 19 0 0 0 | 0 0 3 0 0 | 0 0 4 4 3 | 19 0 12 15 16 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 0 20 0 0 20 | 0 0 0 1 0 | 0 0 4 6 0 | 20 0 16 13 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 0 21 21 0 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 1 0 | 21 0 0 20 0 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 0 21 22 22 22 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 20 0 0 0 0 | 2 0 0 0 0 |
| 23 | 0 22 0 23 23 | 0 1 1 0 0 | 0 0 22 0 0 | 21 0 0 0 0 | 2 0 0 0 0 |

Tableau C.16 : Pertes dans le cas de flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP et d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 200 | 0 200 200 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 200 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 205 | 0 204 191 205 205 | 0 0 13 0 0 | 0 0 1 0 0 | 205 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 210 | 0 191 195 208 208 | 0 0 12 0 0 | 0 16 1 0 0 | 210 3 2 0 2 | 0 0 0 2 0 |
| 215 | 0 160 144 210 210 | 0 47 70 0 0 | 0 7 1 0 0 | 210 1 0 0 5 | 5 0 0 5 0 |
| 220 | 0 162 197 217 217 | 0 0 0 0 0 | 0 45 19 0 0 | 140 13 4 0 3 | 80 0 0 3 0 |
| 225 | 0 150 192 214 213 | 0 0 0 0 0 | 0 56 0 0 0 | 25 18 27 0 12 | 200 1 6 11 0 |
| 230 | 0 213 140 177 159 | 0 0 0 0 52 | 0 0 67 41 19 | 0 0 23 12 0 | 230 17 0 0 0 |
| 235 | 235 177 119 194 215 | 0 0 64 0 0 | 0 0 41 0 0 | 0 47 8 31 18 | 0 11 3 10 2 |

Tableau C.17 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps, des flux audio AMR-WB en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 5 | 5 5 5 5 5 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 6 | 5 6 6 6 6 | 1 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 7 | 7 6 7 7 7 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 8 | 8 8 8 8 8 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 9 9 9 9 9 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 10 10 10 10 10 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 11 11 11 11 11 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 12 11 12 12 12 | 0 1 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 13 8 13 13 10 | 0 5 0 0 3 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 14 13 9 11 12 | 0 1 5 1 2 | 0 0 0 2 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 15 4 15 13 2 | 0 11 0 2 13 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 16 16 16 10 2 | 0 0 0 6 14 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 17 17 9 11 0 | 0 0 8 6 17 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 18 18 7 1 0 | 0 0 11 17 11 | 0 0 0 0 7 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 1 19 7 7 0 | 18 0 12 11 18 | 0 0 0 8 1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 0 20 1 4 20 | 20 0 16 16 0 | 0 0 3 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 6 21 21 0 21 | 15 0 0 21 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 5 22 22 22 22 | 22 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 23 | 4 23 18 23 23 | 19 0 5 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

Tableau C.18 : Pertes en rafale (2 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps, des flux audio AMR-WB en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 200 | 200 200 200 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 205 | 205 205 205 205 205 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 210 | 210 210 210 210 210 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 215 | 212 213 215 215 215 | 3 0 0 0 0 | 0 2 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 220 | 176 215 220 220 220 | 34 0 0 0 0 | 10 0 0 0 0 | 0 5 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 225 | 113 219 225 225 225 | 49 0 0 0 0 | 63 0 0 0 0 | 0 6 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 230 | 56 230 229 230 230 | 60 0 0 0 0 | 114 0 0 0 0 | 0 0 1 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 235 | 235 230 232 235 233 | 0 0 0 0 0 | 0 0 2 0 0 | 0 0 1 0 0 | 0 5 0 0 2 |

Tableau C.19 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 750 kbps; des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 8 | 8 8 8 8 8 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 9 | 9 9 9 9 9 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 10 | 10 10 10 10 10 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 11 | 11 11 11 11 11 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 12 | 12 12 12 12 12 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 13 | 13 13 13 13 13 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 14 | 14 14 14 14 14 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 15 | 13 15 15 15 15 | 2 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 16 | 16 16 16 16 16 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 17 | 17 17 17 17 17 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 18 | 18 18 18 18 15 | 0 0 0 0 3 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 19 | 18 19 19 17 19 | 1 0 0 2 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 20 | 18 20 20 20 20 | 2 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 21 | 21 21 21 21 21 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 22 | 22 22 22 22 22 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 23 | 23 23 23 23 23 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |

Tableau C.20 : Pertes en rafale (3 pertes consécutives) dans le cas d'un lien de goulot d'étranglement de capacité 7.5 Mbps; des flux AMR-WB en concurrence avec un flux TCP

| Nombre de flux | [0-2] | [2-5] | [5-10] | [10-20] | >20 |
|-----------------------|---------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| 200 | 200 200 200 200 200 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 205 | 205 205 205 205 205 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 210 | 210 210 210 210 210 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 215 | 215 215 215 215 215 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 220 | 220 220 220 220 220 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 225 | 225 225 225 225 225 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 230 | 230 230 230 230 230 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 |
| 235 | 235 234 235 235 235 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 1 0 0 0 |