

# Allocation de ressources pour la transmission de données scalables sous contrainte de QoS sur canal OFDM

Heykel HOUAS, Cléo BARAS, Inbar FIJALKOW

Laboratoire ETIS ENSEA/UCP/CNRS UMR-8051  
6 Avenue du Ponceau, 95014 Cergy-Pontoise, France  
{heykel.houas, cleo.baras, inbar.fijalkow}@ensea.fr

**Résumé** – Dans un contexte OFDM où le canal est sélectif en fréquence, on se propose d’optimiser la transmission de données scalables à la fois à l’issue de l’encodage source (nombre de classes à transmettre) et lors de l’encodage canal (protection inégale extrême contre les erreurs grâce aux rendements de code et aux modulations), sous une contrainte de qualité de service définie par l’utilisateur. Un algorithme répondant à ce problème d’optimisation, nommé FT-OFDM, est ici proposé et appliqué à la transmission de données de parole (MPEG-4). Les performances en terme de qualité perçue de la donnée reconstruite seront analysées et comparées à celles des schémas de protection inégale contre les erreurs actuels.

**Abstract** – In a OFDM context with frequency selective channel, we propose to optimize the transmission of the scalable data after the source coding stage (number of classes to transmit) and during the channel coding process (extrem *unequal error protection* scheme based on code rates and modulation orders) under End-to-End Quality of Service constraints. An algorithm, solution of the optimization problem, stated as FT-OFDM, is proposed and is computed on a system that transmits MPEG-4 speech data. We analyse the performance of our method on the perceived quality of the received data and we compare it to State-Of-The-Art UEP schemes, showing the efficiency of the proposed procedure.

## 1 Introduction

La transmission de données scalables pour les applications multimédia est un enjeu de taille dans les communications haut débit ; elle doit atteindre des objectifs de Qualité de Service (QoS) tout en répondant aux exigences et à la diversification des canaux (débit, réseaux, conditions de transmission) et des périphériques de réception. Les codeurs scalables offrent l’avantage, étant donnée la granularité du flux transmis, d’adapter la QoS aux attentes du périphérique de réception. Malheureusement ces derniers ne sont pas robustes aux erreurs de transmissions, compte tenu de leur fort taux de compression<sup>1</sup>.

Les stratégies de transmission proposées par l’État de l’Art se catégorisent en deux familles. La première dont fait partie le codage source-canal conjoint [2] s’attache à minimiser la courbe débit-distorsion entre la source et le canal. Si cette dernière est performante, elle nécessite d’adapter tous les composants de la chaîne de transmission ce qui rend cette technique exclusive à un système de communication et complexe si le nombre de codeurs de sources employés est élevé. La deuxième regroupe les stratégies de codage de canal tels que les schémas de protection inégale contre les erreurs *Unequal Error Protection (UEP)* s’appuyant sur une structure hiérarchisée des données en classes de sensibilité aux erreurs de transmission [3]. Bien que plus facile à mettre en oeuvre, ces stratégies envisagent rarement d’exploiter la scalabilité des données : le nombre de classes à transmettre est toujours le même. Nous nous

plaçons quant à nous à la frontière de ces deux stratégies.

En effet, dans [4], nous proposons une politique d’allocation de ressources appelée Flexible Transmission (FT), adaptée aux canaux de Rayleigh. Elle s’appuie sur un critère d’optimisation original : la maximisation du débit source (i.e. du nombre de classes transmises) sous contraintes de débit de transmission sur le canal et de qualité de service (avec une expression simple des QoS comme étant des *Taux d’Erreurs Binaires (TEB)* par classe).

Dans ce papier, nous proposons une extension de cet algorithme au contexte multiporteuses OFDM<sup>2</sup> en prenant une fois encore en compte le caractère scalable des données à transmettre et en y ajoutant cette fois une utilisation originale de la diversité (en fréquence) qu’apporte le canal afin d’atteindre les QoS.

Le papier est organisé comme suit. La section 2 décrit le système de transmission. La partie 3 pose le problème d’optimisation des ressources à allouer dans le contexte OFDM. Une solution est proposée dans 4 et est mise en application dans la section 5 dans le cadre d’une transmission de données audio MPEG-4 sur canal ADSL où l’on évaluera ses performances en compétition avec d’autres stratégies de transmission de l’État de l’Art.

## 2 Description du système

Cette section décrit le système de transmission considéré, dont une vue schématique est donnée figure 1.

<sup>1</sup>Cette étude fait partie du projet FP6/IST M-Pipe [1] financé par la Commission Européenne).

<sup>2</sup>Orthogonal Frequency Division Multiplexing

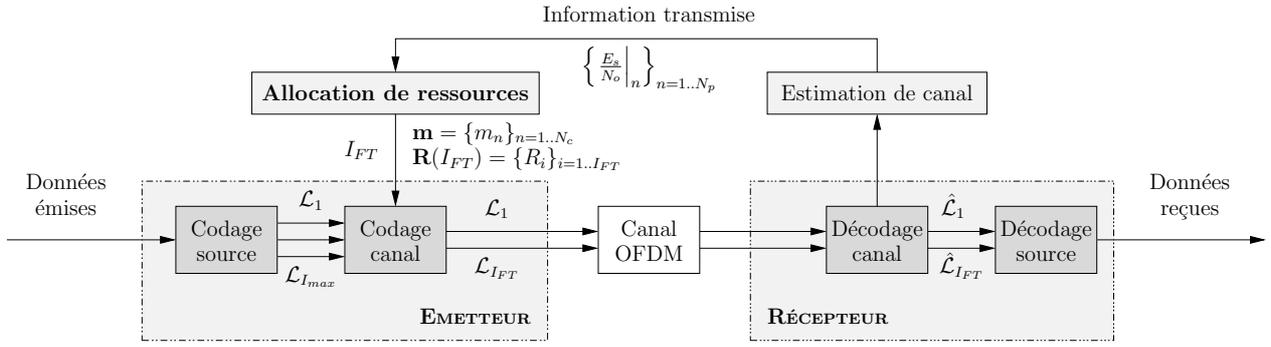


FIG. 1 – Synoptique de la transmission pilotée par l'algorithme FT-OFDM.

## 2.1 Codage/décodage de source

Le processus d'encodage scalable permet de représenter un flot binaire de données multimedia sous forme d'unités de transmission, de longueur  $N$ . Chacune d'elles est composée de  $I_{max}$  classes, notées  $\{\mathcal{L}_i\}_{i=1..I_{max}}$ , de longueurs respectives  $N_i$ . Cette structure est hiérarchisée en classes d'importance décroissante ayant une influence inégale sur la qualité perçue de la donnée reconstruite. Du point de vue du codage de source, cette importance, conjuguée au nombre de classes décodées, induit  $I_{max}$  qualités de reconstruction pour la donnée. Du point de vue du codage de canal, elle représente la sensibilité aux erreurs de transmission et se traduit par une QoS par classe, qui s'exprime d'après [5] sous forme de taux d'erreurs binaires  $\{B_i\}_{i=1..I_{max}}$  à satisfaire par classe.

## 2.2 Modèle de transmission

À l'émetteur, les données sources sont protégées par des codes convolutifs poinçonnés<sup>3</sup> du type *Rate Compatible Punctured Convolutional* (RCPC). À partir d'un code convolutif de rendement  $R_l = \frac{1}{N_1}$ , le poinçonnage génère aisément un ensemble  $\mathcal{R}$  de différents rendements de code  $R_l : R_l = \frac{P}{P+l}$ , avec  $1 \leq l \leq (P-1)N_1$ , où  $P$  est la période de poinçonnage. Les données ainsi codées sont ensuite modulées sous forme de symboles de taille  $m$  pris dans  $\mathcal{M}$ , en suivant l'une des constellations disponibles parmi la MDP-2 et les MAQ- $2^{2m}$  à énergie symbole constante  $E_s$ .

Les données sont transmises sur un canal OFDM, sélectif en fréquence. Une longueur suffisante du préfixe cyclique le ramène à  $N_c$  porteuses caractérisées par les *Rapports Signal sur Bruit (RSB)*  $\left\{ \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right\}_{n=1..N_c}$ . On notera  $T$  le temps de cohérence du canal. Le nombre maximum de symboles transmis par trame codée,  $S_{max}$ , est choisi égal à  $TN_c$  et est défini par la couche physique. Enfin, on suppose que la synchronisation est réalisée sans erreur.

Au récepteur, un décodeur de Viterbi à entrées souples (rapports de vraisemblance pour chaque bit reçu) est utilisé pour décoder le flux binaire reçu. Parallèlement, une estimation du canal (supposée sans erreurs) informe l'émetteur via un canal de retour sur les conditions du canal (les RSBs). On considère enfin que les en-têtes des trames ne sont pas erronées.

<sup>3</sup>On peut bien entendu étendre à d'autres codes correcteurs compatibles en débit, sans perte de généralité.

## 3 Position du problème

La politique d'allocation de ressources considérée vise à déterminer les paramètres du système les plus adaptés, compte tenu des conditions du canal, pour transmettre la donnée multimedia en respectant les contraintes de QoS et de débit. Ces paramètres sont les suivants : le nombre de classes à transmettre  $I_{FT}$ , les rendements de code appliqués à chaque classe  $\mathbf{R} = \{R_i\}_{i=1..I_{FT}}$  et les modulations  $\mathbf{m} = \{m_n\}_{n=1..N_c}$  allouées à chaque porteuse. Les contraintes, quant à elles, se traduisent pour la QoS par des taux d'erreur binaire par classe  $B_i$  ( $i = 1..I_{max}$ ) à ne pas dépasser et, pour les contraintes système par le débit symboles  $S_{max}$  sur la couche physique. La connaissance du canal de transmission est prise en compte au travers du vecteur des RSBs par porteuse  $\mathbf{RSB} = \left\{ \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right\}_{n=1..N_c}$  supposé connu.

Notre stratégie fonde le choix des paramètres adaptés parmi  $\mathcal{P}$  sur la maximisation de la quantité de données source émises, autrement dit le nombre de classes  $I_{FT}$ , et résulte donc du problème d'optimisation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} (I_{FT}^*, \mathbf{R}^*, \mathbf{m}^*) = \arg \max_{(I, \mathbf{R}, \mathbf{m}) \in \mathcal{P}} \sum_{i=1}^I N_i, \quad (1a) \\ \forall i \in [1, I], TEB^{(i)}(\mathbf{RSB}, \mathbf{R}, \mathbf{m}) \leq B_i \quad (1b) \\ S_{TU} = \sum_{i=1}^I S_i(\mathbf{R}, \mathbf{m}) \leq S_{max} \quad (1c) \end{array} \right.$$

où  $TEB^{(i)}$  représente le TEB appliqué à la classe  $i$ ,  $S_{TU}$  est le nombre de symboles utilisés pour transmettre les classes codées  $\mathcal{L}_1$  à  $\mathcal{L}_{I_{FT}}$  et  $S_i$  est l'efficacité spectrale *i.e.* le nombre de symboles transmis pour la  $i$ -ème classe. On supposera évidemment que la classe  $C_i$  n'est transmise que si les  $(i-1)$  classes précédentes le sont.

## 4 Algorithme FT pour l'OFDM

Dans [4], nous nous sommes intéressés au problème de l'allocation des ressources dans le cas Rayleigh, pour lequel les conditions du canal se traduisent par une unique valeur  $\frac{E_s}{N_o}$  du RSB. Une solution algorithmique FT-BBAG itérative a été proposée ; elle traite les données classe par classe, en commençant par la classe *la plus importante* ( $\mathcal{L}_1$ ). Pour cette classe, l'algorithme sélectionne parmi les rendements

de code et les modulations qui satisfont la QoS (1b) le couple qui minimise l'efficacité spectrale  $S_1$ . Il traite ensuite la seconde classe de la même façon et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les données source aient été émises ( $I_{FT} = I_{max}$ ) ou que la contrainte de débit  $S_{max}$  (1c) ait été atteinte.

Étendre l'algorithme FT au contexte OFDM nécessite de spécifier en plus une politique d'allocation des porteuses adaptée. Cette dernière prend en compte l'état du canal exprimé ici par des RSBs par porteuse  $\left\{ \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right\}_{n=1..N_c}$ . Cette diversité des RSBs nous empêche d'appliquer directement l'algorithme FT-BBAG, qui requiert une seule valeur de RSB et un canal plat. On se propose d'adapter l'algorithme de la manière suivante :

- exploiter l'allocation des ordres de modulation afin de convertir le canal en un canal équivalent le moins sélectif en fréquence possible.
- appliquer l'algorithme FT-BBAG [4] sur le canal équivalent.

#### 4.1 Allocation des ordres de modulation

On cherche à allouer les modulations  $m_n$  sur chaque porteuse pour convertir le canal OFDM en un canal équivalent le moins sélectif en fréquence possible. Pour une modulation de référence MDP-2, on définit le canal *Équivalent MDP-2* de la  $n^{\text{ième}}$  sous-porteuse par son RSB équivalent :

$$\frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq} = \mathcal{P}_e^{(MDP-2)^{-1}} \left( \mathcal{P}_e^{(m_n)} \left( \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right) \right), \quad (2)$$

où  $\mathcal{P}_e^{(MDP-2)}$  est la probabilité d'erreur binaire pour la modulation MDP-2 et  $\mathcal{P}_e^{(m_n)}$  celle pour la modulation  $m_n$ .

La platitude du canal pouvant être évaluée au travers du critère suivant :

$$\mathcal{F} \left( \left\{ \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right\}_{n=1..N_c} \right) = \max_{n=1..N_c} \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq} - \min_{n=1..N_c} \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq}, \quad (3)$$

et sous l'hypothèse que le canal équivalent MDP-2 ne soit pas plus mauvais que le canal initial dans le pire cas, le jeu de modulations le plus adapté à la platification du canal répond donc au problème d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} \mathbf{m}^* = \arg \min_{\mathbf{m} \in \mathcal{M}^{N_c}} \mathcal{F} \left( \left\{ \frac{E_s}{N_o} \Big|_n \right\}_{n=1..N_c} \right) \\ \text{tel que : } \forall n = 1..N_c, \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq} \geq \min_{n=1..N_c} \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq} \end{cases} \quad (4)$$

Ce problème revient à faire tendre les RSBs équivalents du canal vers la valeur palier  $\min_{n=1..N_c} \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq}$ . La solution au problème d'optimisation consiste alors à choisir la modulation  $m_n$  allouée à la porteuse  $n$  indépendamment des autres, et ce, telle que son RSB équivalent (2) soit le plus proche du palier tout en restant supérieur<sup>4</sup>. Le canal MDP-2 résultant sera finalement ordonné par ordre décroissant des RSBs équivalents sur chaque porteuse.

<sup>4</sup>Remarquons que la modulation la plus performante (binaire MDP-2) est associée à la porteuse moins bonne.

## 4.2 Allocation des ressources restantes

Étant donné le canal MDP-2 équivalent obtenu, l'algorithme FT-BBAG peut être dérivé pour déterminer le nombre de classes à transmettre  $I_{FT}$  et les rendements associés  $\{R_i\}_{i=1..I_{FT}}$  en prenant en compte la pluralité des RSBs équivalents. Les classes de données sont traitées de manière successive en démarrant par la plus importante  $\mathcal{L}_1$ . Pour chaque classe  $i$ , le rendement de code approprié, de manière analogue à l'algorithme FT-BBAG, est choisi parmi  $\mathcal{R}$  pour minimiser l'efficacité spectrale  $S_i$  et vérifier la QoS de la classe  $i$  exprimée sous la forme d'un TEB à satisfaire (1b). Étant données l'allocation des modulations et l'introduction d'un canal équivalent MDP-2, la contrainte de TEB peut maintenant être évaluée sur ce canal en ne considérant que le sous-ensemble des RSB  $\left\{ \frac{E_b}{N_o} \Big|_n \right\}_{n \in \mathcal{N}_i}^{eq}$  associés aux  $\mathcal{N}_i$  sous-porteuses qui transmettront la classe  $i$  codée avec  $R_i$ . Une condition suffisante pour vérifier cette contrainte consiste finalement à envisager le pire cas, celui de la sous-porteuse de RSB équivalent le plus petit. La QoS se réduit donc à :

$$TEB^i \left( \min_{n \in \mathcal{N}_i} \frac{E_b}{N_o} \Big|_n^{eq}, R_i, MDP-2 \right) \leq B_i$$

L'algorithme s'arrête lorsque toutes les classes ont été traitées ou lorsque la contrainte de débit  $S_{max}$  est atteinte.

## 5 Applications : transmission de parole MPEG-4

### 5.1 Protocole expérimental

#### 5.1.1 Paramètres

Dans le cadre d'une application audio, nous considérons le codeur de parole scalable MPEG-4 CELP. Ce codeur conçu sur un modèle de parole source/filtre génère pour un signal échantillonné à 8 kHz un flux binaire scalable structuré en trames de 4 classes. Chaque trame contient  $N=240$  bits, dont 120 pour la 1<sup>ère</sup> classe et 40 pour les 3 restantes. Les qualités de service QoS évaluées expérimentalement sont :  $B_1 = 3.10^{-3}$ ,  $B_2 = 4,6.10^{-3}$ ,  $B_3 = 8.10^{-3}$ ,  $B_4 = 9.10^{-3}$ .

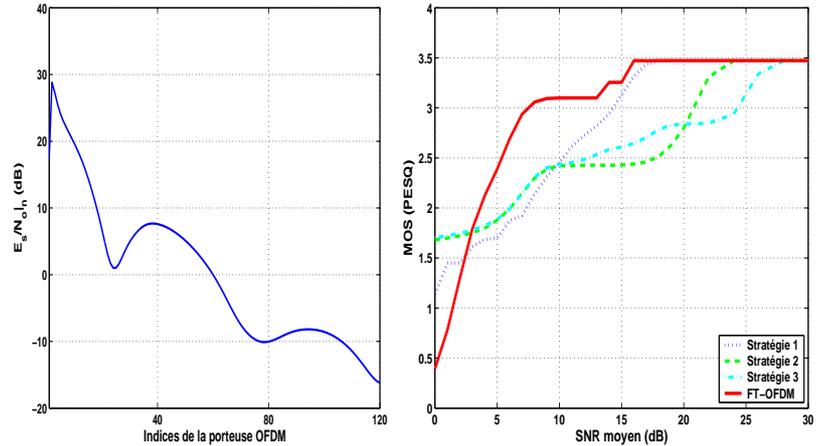
Les codes RCPC générés à partir d'un code convolutif de rendement  $\frac{1}{3}$  et de polynômes générateurs  $G_1 = [133]_8$ ,  $G_2 = [145]_8$  et  $G_3 = [175]_8$ . Pour une période de poinçonnage  $P = 8$ , les codes poinçonnés associés sont :  $\mathcal{R} = \left\{ \frac{8}{9}, \frac{8}{10}, \frac{8}{12}, \frac{8}{14}, \frac{8}{16}, \frac{8}{18}, \frac{8}{20}, \frac{8}{22}, \frac{8}{24} \right\}$ . Les modulations  $\mathcal{M}$  utilisées sont : MDP-2, MAQ-4, MAQ-16, MAQ-64.

Le canal OFDM dispose de  $N_c=120$  porteuses et d'un temps de cohérence  $T=3$ , induisant  $S_{max} = TN_c=360$ .

#### 5.1.2 Evaluation des performances

Les performances de notre algorithme en terme de qualité perçue de la donnée reçue sont évaluées au travers d'une mesure objective de la qualité fournie par l'outil *Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)* [6]. Cet algorithme compare le signal reçu et le signal original sans

Stratégie	1	2	3
Classe $\mathcal{L}_1$	$R_1 = 8/24$ MAQ-16	$R_1 = 8/18$ MAQ-4	$R_1 = 8/16$ MAQ-4
Classe $\mathcal{L}_2$	$R_2 = 8/24$ MAQ-16	$R_2 = 8/12$ MAQ-16	$R_2 = 8/22$ MAQ-16
Classe $\mathcal{L}_3$	$R_3 = 8/24$ MAQ-16	$R_3 = 8/12$ MAQ-16	$R_3 = 8/16$ MAQ-16
Classe $\mathcal{L}_4$	$R_4 = 8/24$ MAQ-16	$R_4 = 8/12$ MAQ-16	$R_4 = 8/9$ MAQ-16



(a) Stratégies de transmission de l'Etat de l'Art

(b) Réponse en fréquence du canal ADSL

(c) Qualité perçue obtenue pour différentes stratégies de transmission

FIG. 2 – Evaluation des performances de l'algorithme FT-OFDM

compression et attribue une note *Mean Opinion Score* (*MOS*) entre 0 et 4, traduisant la distorsion introduite par le codec CELP et les opérations liées à la transmission. Les performances de notre algorithme seront comparées à 3 stratégies d'allocation de l'État de l'Art, dont les caractéristiques sont résumées table 2(a) : comme les paramètres de transmission varient en fonction du RSB moyen pour notre méthode, elle n'est donc pas référencée dans cette table. De plus, contrairement à notre solution, ces stratégies n'autorisent pas l'adaptation du débit source.

## 5.2 Résultats

Le canal OFDM choisi pour étudier les performances de notre algorithme est un canal ADSL dont la réponse en fréquence est donnée figure 2(c).

La figure 2(c) montre les performances obtenues pour ce canal par les 3 stratégies de transmission retenues et l'algorithme FT-OFDM, en fonction du RSB moyen du canal. Chaque mesure de MOS est une moyenne, estimée par une simulation de Monte-Carlo, de la qualité de transmission d'un signal de parole d'une dizaine de secondes. En premier lieu, l'allure de la courbe de performance de FT-OFDM laisse entrevoir la garantie des QoS pour un RSB moyen jusqu'à 13 dB alors que la meilleure des autres stratégies (1) atteint cette même qualité 2 dB plus loin. La sélectivité en fréquence du canal ADSL influence fortement les performances qu'affichent les techniques de transmission de l'État de l'Art. En dessous de 13 dB, les QoS (en terme de TEB par classe) ne sont pas garanties, et l'algorithme FT-OFDM enclenche une configuration de transmission par défaut (correspondant à la configuration pour un RSB moyen de 13 dB). Cette configuration par défaut continue à offrir des meilleurs résultats que les autres stratégies de transmission jusqu'à des RSBs de 5 dB et se dégrade au delà ( $RSB \leq 5$  dB).

## 6 Conclusions

Dans ce papier, nous avons proposé une solution au problème de transmission de données scalable sur un système

OFDM. Cette transmission flexible FT-OFDM nous permet de n'envoyer que les classes vérifiant une qualité de service exprimée sous forme de TEB par classe : cette troncature est rendue possible à l'entrée du codage de canal par la scalabilité des données. L'algorithme proposé s'adapte à la sélectivité en fréquence du canal par le choix des modulations, puis maximise la quantité de données émises en choisissant les rendements de code et l'allocation des porteuses pour garantir la QoS. Les résultats obtenus montrent enfin l'efficacité de l'algorithme pour atteindre une qualité perçue de la donnée reçue élevée et stable, notamment pour des RSBs de 4 à 13 dB pour un canal ADSL de dynamique 55 dB. Cela laisse présager la robustesse de la stratégie à la dynamique du canal, facteur récurrent dans les applications xDSL fortement contraints par l'environnement du canal (urbain, suburbain..).

## Références

- [1] S. Hakansson, "M-Pipe," <http://www.ist-mpipe.org/>.
- [2] G. Cheung and A. Zakhor, "Bit allocation for joint source/channel coding of scalable video," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no. 3, pp. 340–356, March 2000.
- [3] C. Lamy-Bergot, N. Chautru, and C. Bergeron, "Unequal error protection for H. 263+ bitstreams over a wireless IP network," in *ICASSP*, vol. 5, Toulouse, France, Mai 2006, pp. 377–380.
- [4] H. Houas, C. Baras, and I. Fijalkow, "Resources allocation optimization for scalable multimedia data subject to quality of service constraints," in *SPAWC*, Juillet 2006.
- [5] D. Dardari, M. Martini, M. Mazzotti, and M. Chiani, "Layered video transmission on adaptive OFDM wireless systems," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 4, no. 10, pp. 1557–1567, 2004.
- [6] IUT-T Recommendation P. 862, *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) : An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*, 2001.