

Meilleures Performances Du Réseau 4G-LTE Par L'utilisation De Technique D'égalisation Turbo

ELarbi Abderraouf^{#1}, Mohamed Rida Lahcene^{#2}, Sid Ahmed Zegnoun^{#3},
Mohammed Sofiane Bendelhoum^{#4}, Kelthom Hammaoui^{#5}

^{#1,2,5} Department of Electrical Engineering, Tahri Mohammed University-Bechar, Algeria

¹elarbiabderraouf@yahoo.fr, ²lahceneredal@gmail.com, ⁵hammaouikelthom1@gmail.com

^{#3} Department of Electrical Engineering, University of Oran (USTO), Algeria

³sidahmedzegnoun@gmail.com

^{#4} Department of Electrical Engineering, University Center Nour Bachir of El-Bayadh, Algeria

⁴bendelhoum_med@yahoo.fr

Résumé— Dans les systèmes de communication radio-mobile, le fait de vouloir passer un flot important d'informations à travers un canal dont la bande est souvent limitée a tendance à créer de l'Interférence Entre Symboles (IES). Cette interférence peut dégrader très fortement le signal reçu. Il est donc nécessaire de concevoir des récepteurs permettant de combattre efficacement l'IES. Les différentes solutions proposées utilisent généralement des procédés d'égalisation et de codage de canal. Pour améliorer les performances du système, on introduit un récepteur qui réalise un traitement conjoint de l'égalisation et du décodage de canal permettant d'améliorer d'une façon significative la qualité de transmission. Ce récepteur est appelé turbo égaliseur (TE). Dans ce cadre de notre papier, nous intéressons principalement sur l'analyse par simulation pour améliorer les performances de transmission radio-mobile 4G-LTE, par l'utilisation de technique d'égalisation turbo. Pour ce faire, nous allons valider les notions théoriques par des simulations réalisées sur le logiciel Matlab.

Mots de clé— LTE, TE, IES

I. INTRODUCTION

Dans cette recherche, nous abordons le contexte des systèmes à décodage itératif au canal radio mobile. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mise en place de nouveaux services de radiocommunications mobiles à hauts débits. Le principal obstacle à la mise en œuvre de tels systèmes est constitué par la nature même du canal radio-mobile. En effet, le canal radio-mobile est un canal sélectif en fréquence et variable dans le temps. Plus on augmente les débits et plus on renforce ce caractère sélectif en fréquence qui se traduit par une forte IES en réception. À des hauts débits, la distorsion de canal est très importante et il est impossible de récupérer les données transmises avec un simple récepteur. Une structure de récepteur complexe est nécessaire qui utilise une égalisation coûteuse et des algorithmes d'estimation de canal. La technique OFDM peut simplifier le problème d'égalisation en changeant le canal sélectif en fréquence dans un canal plat. L'interférence inter-symbole (ISI) peut se produire dans le signal reçu en raison de l'évanouissement par trajets multiples. Pour supprimer l'ISI de nombreux types d'égaliseurs peuvent être utilisés. Un égaliseur compense les imperfections du canal, telles que les distorsions d'amplitude et de phase ainsi

que le retard de propagation. Cependant, la nature variable du canal avec la présence de "fadings" profonds, reste un obstacle majeur à l'augmentation des débits transmis.

II. PRINCIPALES STRUCTURES D'ÉGALISEURS

La fonction principale des égaliseurs est d'inverser, la réponse impulsionnelle estimée du canal de transmission sélectif en fréquence. Les architectures des égaliseurs employées en pratique sont nombreuses, on peut citer :

- Une première technique appelée détection suivant la séquence la plus vraisemblable « Maximum Likelihood Séquence Estimation (MLSE) » qui donne d'excellents résultats sous réserve que le canal soit connu ou bien estimé,
- Les égaliseurs linéaires « Linear Equalizer (LE) » : les performances de ces égaliseurs dégradent remarquablement lorsque les conditions de propagation se dégradent,
- Les égaliseurs à retour de décision « Décision Feedback Equalizer (DFE) » : employés pour les canaux sévèrement dégradés.

Pour l'optimisation des coefficients d'égaliseurs, il existe essentiellement deux critères :

1. Le premier critère consiste à forcer la réponse impulsionnelle du couple canal/égaliseur à zéro sauf à $t = 0$: cette approche d'égalisation est appelée forçage à zéro « Zéro forcing (ZF) ». Elle est extrêmement sensible au bruit.
2. Le deuxième critère consiste à adapter les coefficients de l'égaliseur par la minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre la séquence égalisée et la séquence estimée. Cette approche est appelée erreur quadratique moyenne minimale (EQMM) « Minimum Mean Square Error (MMSE) ».

III. EGALISEUR ANNULEUR D'INTERFERENCES (AI)

L'égaliseur annuleur d'interférences (AI) est relativement très peu utilisé [1][2], jusqu'à maintenant en égalisation. La structure de l'annuleur d'interférences est donnée à la figure-1, il est formé d'un filtre $C(z)$ adapté à la réponse en fréquence du canal et d'un filtre $W(z)$ permettant la reconstitution de l'interférence entre symboles présente à la sortie du filtre adapté (on note ici que le coefficient central du filtre $W(z)$ est nul, $w_0 = 0$).

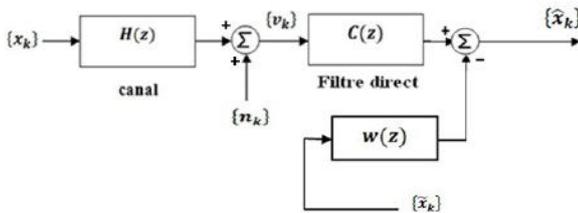


Fig.1 Egaliseur annuleur d'interférences (AI).

A partir de la définition de l'égaliseur AI, la sortie \hat{x}_k s'exprime :

$$\hat{x}_k = \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j v_{k-j} - \sum_{j=-\infty, w_0=0}^{\infty} w_j \tilde{x}_{k-j} \quad (1)$$

où $\{\tilde{x}_k\}$ est la séquence des symboles estimés. Les expressions optimales des filtres de l'égaliseur annuleur d'interférences sont données par [1] :

Dans le cas du canal non normalisé :

$$\alpha = T \int_{-1/2T}^{1/2T} |H(f)|^2 df$$

$$C_{opt}(f) = \frac{\beta H^*(f)}{\alpha} \quad (2)$$

$$w_{opt}(f) = \beta \left[\frac{H(f)H^*(f)}{\alpha} - 1 \right] \text{ avec}$$

$$\beta = \frac{\alpha \sigma_x^2}{\alpha \sigma_x^2 + \sigma_n^2} \quad (3)$$

L'erreur quadratique moyenne minimale de l'AI est donnée par [1] :

$$J_{min,AI} = \frac{\sigma_x^2 \sigma_n^2}{\alpha \sigma_x^2 + \sigma_n^2} \quad (4)$$

On suppose que $\tilde{x}_k = x_k$ ce qui nous conduit à la solution optimale sans contrainte. Dans ce cas, l'expression de la sortie égalisée est donnée par :

$$\hat{x}_k = \beta \left[x_k + \frac{1}{\alpha} \sum_{n=0}^L h_n^* n_{k+n} \right] \quad (5)$$

D'après l'équation(5), les interférences entre symboles sont totalement supprimées sans amplification du bruit.

IV. TURBO EGALISATION DANS LES CANAUX SELECTIFS EN FREQUENCE ET INVARIANTS

Les récepteurs de communication numérique sont composés de plusieurs fonctions disjointes, où chaque fonction réalise un traitement spécifique et se termine par une prise de décision. Ce concept présente une perte d'information et ne conduit pas aux performances optimales du récepteur. Il est possible de remédier à cet inconvénient en s'arrangeant pour que certaines fonctions élémentaires puissent bénéficier des traitements réalisés par d'autres fonctions. Dans cette partie, qui concerne la turbo égalisation des canaux invariants sélectifs en fréquence en présence du codage de canal, nous allons voir qu'un égaliseur utilise conjointement les données estimées par le décodeur et les signaux issus du canal de transmission pour essayer de s'affranchir de l'interférence entre symboles. Plusieurs auteurs ont proposé des solutions à base d'égaliseur annuleur d'interférences (AI), de détecteur à maximum de vraisemblance et de codage de canal pour traiter ce problème.

V. ETAT DE L'ART EN TURBO EGALISATION

La figure-2, montre une chaîne de communication avec un turbo égaliseur. Le schéma de principe de la turbo égalisation est représenté à la figure-3. Le traitement itératif est réalisé à l'aide de plusieurs modules identiques qui se transmettent une estimation des symboles émis. Cette estimation est améliorée au fil des itérations. La figure-4, détaille le contenu d'un des modules. Pour une modulation (8-PSK, 16QAM), ce module comporte un égaliseur suivi d'un désentrelaceur, d'un décodeur de canal et d'un entrelaceur.

A. L'égaliseur

L'égaliseur est chargé de réduire ou de supprimer l'interférence entre symboles générée par le canal sélectif en fréquence. Nous avons présenté précédemment plusieurs types des structures d'égaliseurs. A la première itération aucune information a priori n'est disponible. Une structure d'égaliseur à retour de décision (DFE) ou linéaire (LE) autodidacte est utilisée. En sortie de la première itération, une première estimation des symboles émis est disponible. Nous voulons utiliser cette information afin d'améliorer l'égalisation de l'itération suivante. L'égaliseur à maximum de probabilité a posteriori (MAP), l'annuleur d'interférences (AI), ou l'égaliseur à retour de décision (DFE) sont des structures appropriées à un tel traitement puisqu'elles permettent de supprimer les ISI en utilisant les symboles estimés du passé et du futur.

B. Entrelaceur/Désentrelaceur

La fonction d'entrelacement/désentrelacement est très importante en turbo égalisation. En effet, le décodeur de canal est construit sur la base que les données à son entrée sont blanches et décorréées de distribution gaussienne. Malheureusement, les données en entrée du décodeur sont toujours corrélées avec le bruit, cette corrélation est due à plusieurs facteurs ; parmi ces facteurs on note les paquets d'erreurs en sortie de l'égaliseur causés par l'atténuation du

SNR. Il est donc nécessaire de distribuer les paquets d'erreurs par l'entrelacement afin que le décodeur du canal traite des données blanches.

C. Décodeur

La fonction du décodage peut être réalisée par les algorithmes à maximum de probabilité a posteriori (MAP) ou SOVA « Soft Output Viterbi Algorithm », son rôle étant de supprimer les erreurs causées par le bruit AWGN.

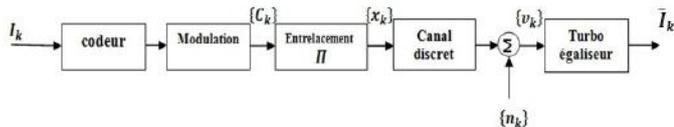


Fig.2 Chaîne de communication avec un turbo égaliseur.

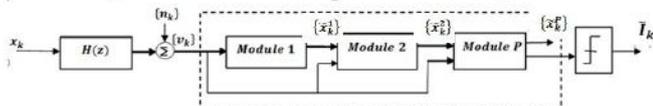


Fig.3 Schéma de principe de la turbo égalisation.

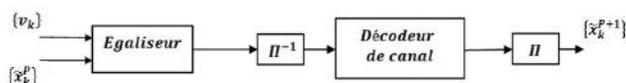


Fig.4 Schéma d'un module de turbo égalisation.

VI. TURBO EGALISEUR MAP – MAP.

La structure du turbo égaliseur maximisant la probabilité a posteriori a été proposée par Berrou [3]. La structure de ce turbo égaliseur est représentée sur la figure-5. Plusieurs auteurs ont essayé d'améliorer les performances de cette architecture par la modification de l'algorithme MAP du décodeur ou de l'égaliseur [4], ou par l'utilisation d'un turbo codeur à la place du codeur RSC [5]. D'autres ont utilisé un code non systématique pour remplacer le codeur RSC [6], etc.

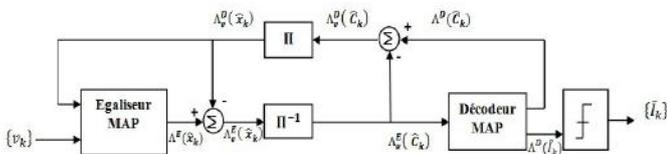


Fig.5 Principe de fonctionnement du turbo égaliseur MAP – MAP.

L'entrée de l'égaliseur MAP est la séquence reçue {vk}. L'égaliseur calcule le rapport de vraisemblance logarithmique des bits codés, dénotés par $\Lambda^E(\hat{x}_k)$, ces valeurs représentent la valeur a posteriori des bits codés. Le décodeur MAP reçoit comme entrée la partie extrinsèque de la sortie égalisée $\Lambda^E(\hat{x}_k)$, : cette valeur extrinsèque est donnée par :

$$\Lambda_e^E(\hat{x}_k) = \Lambda^E(\hat{x}_k) - \Lambda_e^D(\hat{x}_k) \quad (6)$$

où $\Lambda_e^D(\hat{x}_k)$ est la partie extrinsèque entrelacée de la sortie décodée. La sortie $\Lambda_e^E(\hat{x}_k)$ est désentrelacée avant d'être décodée.

Le décodeur MAP calcule le rapport de vraisemblance des bits codés dénotés $\Lambda^D(\hat{C}_k)$ et les bits d'information estimés

dénotés $\Lambda^D(\hat{I}_k)$. La partie extrinsèque de $\Lambda^D(\hat{C}_k)$, dénotés $\Lambda_e^D(\hat{C}_k)$, représente l'information supplémentaire du bit en cours obtenue par le décodeur. Cette information extrinsèque est obtenue par la relation :

$$\Lambda_e^D(\hat{C}_k) = \Lambda^D(\hat{C}_k) - \Lambda_e^E(\hat{C}_k) \quad (7)$$

où $\Lambda_e^D(\hat{C}_k)$ est entrelacée et ensuite injectée dans l'égaliseur MAP : elle lui sert d'information a priori. Nous notons ici que pour la première itération aucune information a priori n'est disponible: l'égaliseur suppose que les événements $\{x_k = 1\}$ et $\{x_k = -1\}$ sont équiprobables, c'est-à-dire que la valeur a priori est nulle pour la première itération.

VII. PERFORMANCES DU TURBO EGALISEUR

Dans cette section, nous analysons les performances du turbo égaliseur en termes de taux d'erreurs binaires (TEB) dans le canal de Proakis-B [7]. Les performances en terme de TEB sont évaluées par une méthode bien précisée, chaque valeur du TEB a été obtenue par la transmission de 1024×10^3 bits d'information. Afin de situer les performances de notre turbo égaliseur, nous comparons ses différentes courbes de TEB pour les trois fonctions d'itération. Le turbo égaliseur simulé est constitué d'un décodeur du codeur TCM à 8 états avec 3 bits à l'entrée et 4 bits à la sortie, et de polynôme générateur (11,02,04,10) en octal, pour un mapping de gray, et contient aussi sur un égaliseur AI.

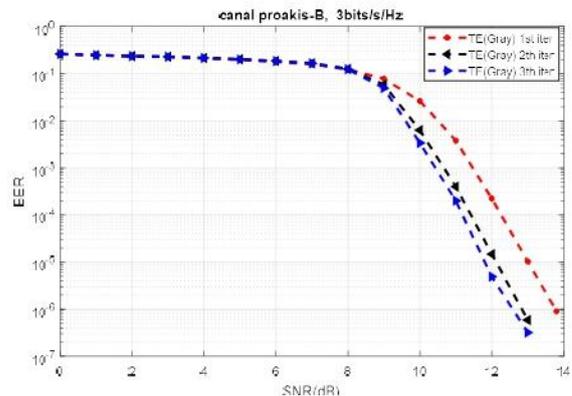


Fig.6 Comparaison des performances de system TE pour les trois itérations sur le canal du proakis-B.

A la figure-6, nous avons tracé le taux d'erreurs binaires (TEB) en fonction du rapport E_b/N_0 à la sortie du décodeur de canal pour les trois itérations du turbo égaliseur. Pour un canal de Proakis-B [7], Nous concluons d'après la figure de simulation que la fonction de l'itératif de TE (turbo égaliseur) a fonctionné d'une façon proportionnelle avec la qualité de performance de TE, c'est-à-dire que, plus nous augmentons le nombre d'itération de turbo-égaliseur, plus on enregistre une diminution sur les valeurs des BER. Nous signalons que l'utilisation du processus itératif (l'itération) de TE permet d'améliorer les performances du turbo égaliseur en terme de BER.

VIII. PERFORMANCES DU TURBO EGALISEUR PROPOSE POUR LA SIMULATION SUR LE SYSTEM LTE

Dans ce nouveau récepteur de system LTE, nous proposons d'utiliser un traitement itératif d'égalisation adaptative et de codage de canal conjoint. L'égalisation est réalisée par un annuleur d'interférences qui permet d'évincer totalement l'interférence entre symboles sous réserve de connaître les données émises, ce qui n'est bien entendu jamais le cas. Une solution consiste alors à obtenir une estimée de ces données en exploitant les informations provenant d'un traitement précédent incluant égalisation et décodage. Ainsi défini, le turbo-égaliseur [8][9][10] consiste en une succession de plusieurs traitements d'une même source d'informations afin de tirer profit du gain apporté par le décodeur de canal[11]. Pour une meilleure approximation du TEB, une simulation de la chaîne de transmission s'avère nécessaire. Dans cette section, des résultats des simulations du taux d'erreur binaire avec Turbo égaliseur sont illustrés. Le schéma de la chaîne de transmission de system LTE qui utilisé Turbo égaliseur est donné à la figure-7.

IX. PARAMÈTRES DE SIMULATION

Dans cette section, nous analysons les performances du turbo égaliseur sur un canal radio mobile EVA[12], corrélé et sélectif en fréquence. Les performances en termes de TEB sont évaluées par une méthode bien précise, chaque valeur du TEB a été obtenue par la transmission de 10^6 bits d'information. Le TE simulé est constitué d'un décodeur du codeur TCM à 8 états avec 2 bits à l'entrée et 3 bits à la sortie, et de polynôme générateur (11,02,04) en octal. Pour favoriser la convergence de l'égaliseur de la première itération, RLS appartenant au turbo égaliseur, on utilise une séquence d'apprentissage périodique qui représente 20% du flux de données, soit 25 symboles d'apprentissage pour 125 symboles émis. Les symboles d'apprentissage émis sont supposés connus du turbo égaliseur à la réception.

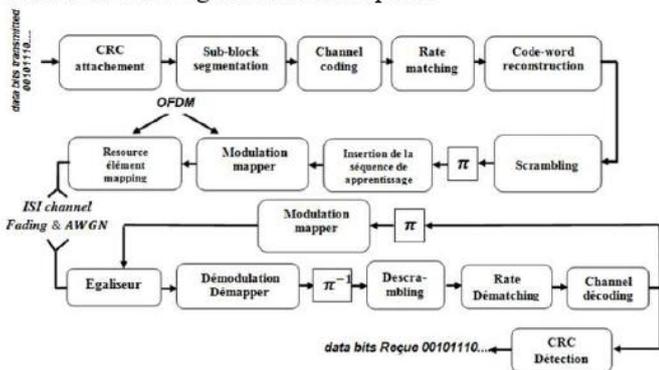


Fig.7 Spécifications de la couche physique en LTE

On voit sur les figures-8, que le principe de la turbo égalisation fonctionne bien lorsqu'en augmente le nombre d'itération, le TEB en sortie de l'égaliseur annuleur d'interférences est inférieur à celui d'un canal sans interférence entre symboles (ISI). Ceci démontre que

l'annuleur d'interférences supprime les ISI et fournit des données blanches au décodeur de canal TCM.

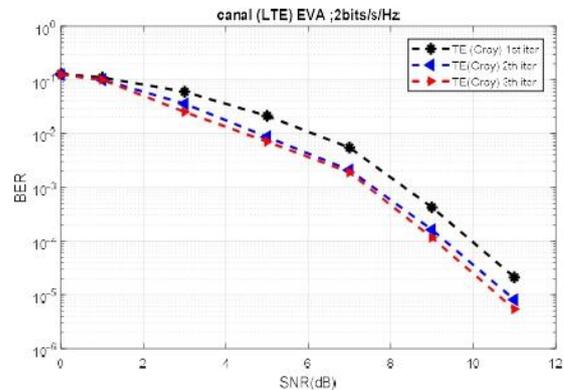


Fig.8 performance de TE (AI, décodeur-TCM) pour les différent processus d'itération

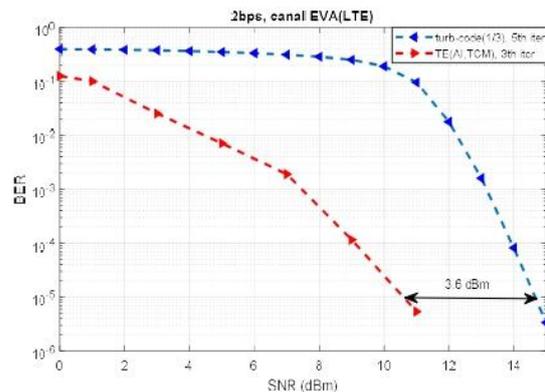


Fig.9 Comparaison des performances de transmission de système LTE qui utilisé un égaliseur simple ZF, et le system LTE qui utiliser l'égalisation turbo- (AI, décodeur-TCM), dans le canal EVA.

D'après la figure-9, on peut montrer que le turbo-égaliseur (AI, TCM) présente une meilleure performance en termes de BER, par rapport au system LTE qui utilise à la réception un égaliseur ZF et un décodage MAP de codeur de canal Turbo-code d'une façon séparé. L'utilisation de technique turbo-égaliseur nous permet de gagner un gain $G=3,6$ dB par rapport au system classique qui traités l'égalisation et le codage de canal par une manière disjointe.

X. CONCLUSION.

Lorsque la bande du canal est infinie (suffisamment large - canal idéal), aucun problème ne se pose et seul le bruit est la cause des erreurs de transmission. Par contre, lorsque la bande est limitée ou sélective, la qualité de la transmission peut être dégradée même en absence du bruit. Dans ce cas, l'interférence entre symboles IES est significative. Pour pallier ce problème, une égalisation doit être mise en œuvre pour corriger ces imperfections de toute la chaîne de communication. Dans cettarticle nous avons utilisé une structure d'égalisation qui est plus efficace et adaptée pour les canaux de LTE appelé turbo égalisateur, c'est un égaliseur

optimal. Ils peuvent être utilisés pour une réception disjointe. Ils constituent aussi des outils pour les traitements conjoints. D'après l'évaluation des performances de ce turbo égaliseur en termes de taux d'erreur binaire pour les différentes valeurs de SNR. Nous avons montré, à partir des différentes figures des simulations que la turbo égalisation permettait de réduire les effets de la sélectivité fréquentielle et temporelle des canaux de transmission de réseau LTE d'une façon significative.

Comme perspectives, on propose de :

- Associer le système étudié au canal multiple input multiple output (MIMO) et ainsi profiter de la diversité spatiale et fréquentielle (OFDM).
- Programmer le système étudié sur VHDL, et l'implémenter sur FPGA.

ACKNOWLEDGEMENT

We want to thank very much the members and the directors of LTIT Laboratory of University of Bechar for their great availability, their encouragements, and their precious advice. I would also like to thank the editor and anonymous reviewers for their comments and suggestions.

REFERENCES

- [1] C. Laot. "Egalisation autodidacte et turbo égalisation: Application aux canaux sélectifs en fréquences." Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Télécommunications, Brest. France.
- [2] M. L. Ammari. "Turbo détection de symboles turbo codés dans des canaux dispersifs corrélés". Thèse de doctorat. Université Laval. Canada, 2003.
- [3] C. Douillard, M. Jézéquel, C. Berrou, A. Picart, P. Didier et A. Glavieux. "Itérative correction of intersymbol interference". Turbo equalization. European Trans. On Telecom, pages 507-511, 1995.
- [4] S. Talakoub, L. Sabeti, B. Shahravaet M. Ahmadi. "A linear LOG-MAP algorithm for turbo decoding and turbo equalization". IEEE Trans. on Commun., pages 182—186, 2005.
- [5] C. Xiang, Y. Dongfeng et Y. Xiangming. "The improvement of turbo equalization through using turbo codes." IEEE Trans. on Commun., pages 124-127, 2005.
- [6] V. D. Trajkovic et P. B. Rapajic. "Turbo equalization using non systematic and recursive systematic convolutional codes". IEEE Trans. on Commun., pages 2125-2129, 2003.
- [7] Dean Pruitt "Back-channel Communication in the Settlement of Conflict," Institute for Conflict Analysis and Resolution, George Mason University, 3401 Fairfax Drive, MS 4D3, Arlington, Virginia 22201 USA, vol. 13(1), Jan 2008, pp. 37-54
- [8] ADAMU, Mohammed Jajere, QIANG, Li, ZAKARIYYA, Rabi Sale, et al. "An Efficient Turbo Decoding and Frequency Domain Turbo Equalization for LTE Based Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Systems". Sensors, 2021, vol. 21, no 16, p. 5351.
- [9] TANG, Wen-qi, XIN, Ji-rong, WAN, Jian, et al. "Multi-channels turbo equalization for M-ary orthogonal modulation signal". In : 2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). IEEE, 2017. p. 215-220.
- [10] AISSA, Ouardi et SEDDIK, Bouazza Boubakar. "Complexity Reduction of Turbo Equalization Using Cross-Entropy Stopping Criterion". Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), 2021, vol. 13, no 2, p. 31-34.
- [11] C. LAOT. "Récepteurs pour communications numériques sur canaux sélectifs en fréquences". Rapport de synthèse pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Université européenne de Bretagne (UeB) Technopôle de Brest - Iroise, Département Signal et Communications Lab-STICC UMR CNRS 3192, 5 Feb 2020.
- [12] E. Abderraouf, A. Bassou, M.R. Lahcene, "Higher performance and lower complexity turbo decoding scheme for 4G-LTE using unpunctured turbo trellis-coded modulation," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS), vol.18(1), April 2020, pp. 351~360.