

# Maximisation Perceptuelle de la Qualité de Transmission JPWL via un Canal MIMO Réaliste

J. ABOT<sup>1</sup>, M. NAUGE<sup>2</sup>, C. PERRINE<sup>1</sup>, M.-C. LARABI<sup>2</sup>, C. BERGERON<sup>3</sup>, C. OLIVIER<sup>1</sup>, Y. POUSSET<sup>1</sup>

Laboratoire XLIM-SIC, équipes <sup>1</sup>SYSCOM et <sup>2</sup>ICONES, CNRS UMR 6172, Labex Sigma-Lim, Université de Poitiers

<sup>3</sup>THALES Communications, EDS/SPM - Paris, France

<sup>1,2</sup>abot, nauge, perrine, larabi, pousset, olivier@sic.univ-poitiers.fr - <sup>3</sup>cyril.bergeron@fr.thalesgroup.com

**Résumé** - Cette étude propose une approche globale pour la transmission d'images JPWL (ISO/IEC 15444-11) à travers un canal sans fil réaliste capable d'assurer la meilleure Qualité de Service. Afin d'exploiter la diversité du canal, nous considérons un schéma MIMO-OFDM en boucle fermée (CL-MIMO-OFDM) avec différentes solutions de précodage. En particulier, la haute flexibilité du précodeur QoS permet de prendre en compte la scalabilité du codeur JPWL conjointement avec l'état instantané du canal MIMO. Cette stratégie améliore la qualité visuelle des images reçues. Le monitoring de la qualité est opéré par une métrique à référence réduite basée sur la saillance des objets et les points d'intérêt liés à la perception humaine. Ce processus est effectué en association avec un décodeur JPWL robuste afin de déterminer la configuration optimale de décodage en termes de PSNR. Le schéma proposé fournit de très bons résultats et ses performances sont mesurées par le biais d'un canal réaliste.

**Abstract** - This paper proposes a global approach of JPWL (ISO/IEC 15444-11) image transmission over a realistic wireless channel able to ensure the best Quality of Service. In order to exploit the channel diversity, we consider a Closed-Loop MIMO-OFDM scheme with different precoder designs. In particular, the high flexibility of QoS precoder allows taking into account the scalability of JPWL jointly with the instantaneous MIMO channel status. This increases the visual quality of received images. The quality monitoring is made by a reduced-reference metric based on objects' saliency and interest points, both linked to human perception. It is performed in association with a robust JPWL decoder to determine the optimal decoding configuration in terms of PSNR. The proposed scheme provides very good results and its performance is shown through a realistic wireless channel.

## 1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, les transmissions d'images à travers des canaux sans fils sont apparues comme un service multimédia très populaire, en particulier avec le développement des terminaux mobiles (smartphones,...). Cela implique des transmissions d'images avec une augmentation continue de la qualité, de la résolution et de la quantité d'information à l'instar de la technologie Haute Définition. De plus, le canal de transmission sans fil varie au cours du temps d'une manière imprévisible à cause de la mobilité de l'environnement et des utilisateurs. La nature instable et la bande passante limitée des liens sans fil représentent le problème central qui doit être pris en compte afin de garantir des services multimédias de haute qualité.

Il est maintenant prouvé que l'usage des systèmes multi-antennaires MIMO (Multiple Input Multiple Output) dans un environnement riche en multi-trajets améliore significativement la fiabilité et/ou le débit de transmission, en comparaison des systèmes SISO (Single Input Single Output) [1]. Ainsi, dans cette étude, nous nous concentrons sur la transmission d'images à travers un système MIMO en boucle fermée (CL-MIMO). Ce type de schéma exploite l'information sur l'état du canal (CSI pour Channel State Information) du côté de l'émetteur afin d'ajuster la puissance d'émission sur chaque antenne. Ce type de stratégie est connu sous le nom d'Allocation Inégale de Puissance (UPA pour Unequal Power Allocation), et prend en compte l'état instantané du canal et l'importance du flux de données correspondant. Nous utilisons également une modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex), qui représente un moyen efficace de remédier à la sélectivité fréquentielle liée au phénomène de multi-trajets. Le contenu à transmettre est codé par le biais du standard JPWL spécifié dans [2].

Différents schémas de transmission dans la littérature ont montré les bénéfices des stratégies UEP (Unequal Error Protection) [3] ou des stratégies UPA [4-5] pour transmettre des images. Toutefois, la majeure partie des schémas de transmission de la littérature n'est pas développé par rapport au contenu à transmettre. Ces schémas essaient de s'adapter au contenu pour assurer la QoS (Quality of Service). De

plus, ils n'utilisent pas de canaux réalistes pour tester leurs performances mais des canaux simplistes comme les modèles statistiques Gaussien ou de Rayleigh. Finalement, la QoS est seulement considérée du point de vue de la transmission (SNR, TEB, TPP) et ne reflète pas le jugement de l'utilisateur final ou de la Qualité de son Expérience (QoE).

Dans ce travail, nous proposons un nouveau schéma pour des transmissions JPWL à travers un canal MIMO en utilisant des solutions de précodage et un monitoring pour le décodage des couches de qualité. La 1<sup>ère</sup> contribution de ce travail est de fournir une allocation de la puissance qui minimise la distorsion de l'image reçue vis-à-vis des conditions sur le canal de transmission. Pour cela, on exploite la haute flexibilité du précodeur QoS [6] pour ajuster finement l'allocation de puissance en considérant l'importance des flux binaires codés JPWL et l'état du canal. La solution de précodage proposée est comparée à deux autres solutions de précodage : Maximum-SNR [7] et Water Filling [6] (WF). La 2<sup>ème</sup> contribution consiste à utiliser un canal MIMO réaliste variant dans le temps afin d'adapter la qualité des images reçues par les différentes solutions de précodage. Pour réaliser cela, nous utilisons un canal de transmission basé sur un modèle déterministe issu d'un simulateur 3D à tracé de rayons [8]. La topologie de la scène utilisée fournit différentes conditions de transmission alternant entre des configurations LOS (Line Of Sight) et NLOS (Non LOS). La 3<sup>ème</sup> contribution de ce papier consiste à utiliser la perception humaine afin d'assurer la meilleure configuration de décodage. La Qualité de l'Expérience (QoE) de l'utilisateur final est estimée par une métrique à référence réduite basée sur la saillance visuelle des objets et l'analyse des points d'intérêt dans l'image [9].

Dans la section 2, nous décrivons les contributions de l'étude au travers de trois points majeurs : le décodeur robuste JPWL, la stratégie d'allocation de puissance et le décodage optimal basé sur la perception. La section 3 est dédiée aux résultats de simulation suivie d'une discussion des résultats obtenus. L'étude se termine par quelques conclusions et des perspectives.

## 2 Travail proposé

## 2.1 Schéma global

Nous proposons un schéma global qui prend en compte un contenu hiérarchisé à transmettre (fig. 1). Nous combinons le codec JPWL avec des solutions de précodage. JPWL génère  $b$  codestreams classés dans un ordre d'importance décroissante. D'un autre côté, les solutions de précodage décomposent le canal MIMO en sous-canaux SISO hiérarchisés, parallèles et indépendants, classés dans l'ordre décroissant des valeurs de SNR. La stratégie de transmission d'images adoptée dans ce papier assigne chaque codestream JPWL au sous-canal SISO correspondant fournissant une stratégie UPA sans redondance supplémentaire. La robustesse de ce schéma est assurée par la correspondance entre les couches de qualité JPWL hiérarchisées et la hiérarchie des sous-canaux SISO (MIMO SC dans la fig. 1).

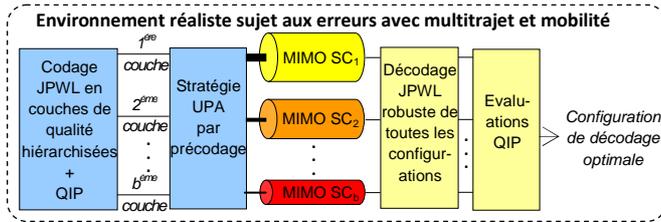


Fig. 1 : Schéma propose basé sur le contenu à transmettre

La stratégie UPA est appliquée afin de garantir une réception partielle ou totale de l'image en fonction de l'état du canal. Durant le processus de codage JPWL, une quantité négligeable de données (22 octets), représentant la référence réduite de la métrique QIP (pour Quality by Interest Points), est extraite de l'image originale et est intégrée au flux. Cette métrique est conjointement utilisée avec un décodeur JPWL robuste dans le but de fournir la meilleure configuration de décodage.

## 2.2 Stratégie UPA

Les solutions de précodage calculent les coefficients en fonction de l'état instantané du canal et du critère à maximiser comme mentionné précédemment. Ainsi, cette stratégie est adaptée aux variations du canal et la qualité de l'image reçue dépend du critère maximisé. Les précodateurs Max-SNR et WF optimisent respectivement le SNR reçu et la capacité du canal. Par conséquent, ces précodateurs ne prennent pas réellement en compte l'importance et la hiérarchie des couches de qualité JPWL. Toutefois, le précodateur QdS, qui permet une grande flexibilité dans le processus d'allocation de la puissance, peut être adapté conjointement à l'état du canal et à l'importance des couches de qualité JPWL transmises à travers les  $b$  sous-canaux SISO. Dans cette étude, nous utilisons une approche empirique afin de configurer le précodateur QdS pour minimiser la distorsion de l'image reçue quelles que soient les conditions sur le canal.

## 2.3 Décodeur JPWL robuste

Du côté du récepteur, le décodeur JPWL devrait corriger les codestreams JPWL reçus et reconstruire les frames JPEG 2000. Ainsi, le décodeur JPWL utilise les blocs d'informations EPB (Error Protection Block) pour corriger les erreurs. Mais pour prévenir les erreurs résiduelles qui pourraient apparaître après décodage RS (Reed-Solomon), une implémentation robuste de JPWL est proposée. Elle est basée sur le stockage à chaque étape de l'image partiellement décodée. La procédure est décrite ci-dessous :

- Le codestream JPWL d'entrée est analysé et indexé jusqu'au  $N^{\text{ème}}$  paquet du codestream JPEG 2000 ;
- Ce codestream indexé est transmis au décodeur JPWL afin d'utiliser les données de redondance ajoutées dans les blocs EPB, et reconstruire un flux JPEG 2000 de base ;
- Ensuite, pour chaque paquet JPEG 2000, le paquet est décodé :

- Si aucun problème n'est détecté, le décodage partiel de l'image est stocké et le paquet suivant est traité ;
- Si un problème est détecté, le processus de décodage global est interrompu et l'image partiellement décodée est fournie en tant que sortie du décodeur.

## 2.4 Stratégie de décodage avec QIP

Nous utilisons une métrique de qualité en mesure de transcrire la qualité perçue d'une image. Toutefois, dans un contexte de transmission, l'image originale n'est pas disponible au niveau du récepteur. Par conséquent, les comparaisons de pixel appliquées dans le cas des métriques à référence complète (comme le PSNR) sont impossibles et les métriques sans références supposent que les dégradations sont connues et facilement mesurables. Aussi, la meilleure stratégie dans notre cas, est d'utiliser une métrique à référence réduite. Cette stratégie permet d'exploiter une petite portion de la référence afin de mesurer la qualité de l'image reçue.

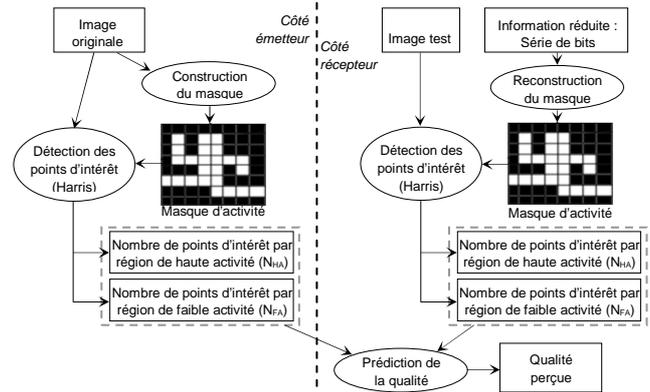


Fig. 2 : Organigramme de la métrique à référence réduite QIP

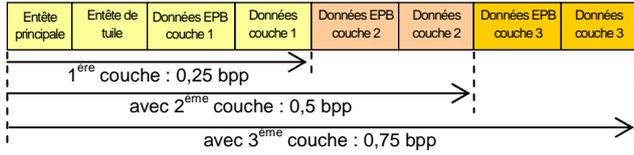
La métrique QIP [9] est basée sur l'analyse des points d'intérêt afin de prédire une variation dans l'image, en fonction de la saillance des objets. Comme décrit dans la fig. 2, la métrique décompose l'image originale en  $12 \times 12$  partitions égales sur lesquelles un détecteur de points d'intérêt de Harris est appliqué. Chaque partition est classée en termes de saillance (HA : Haute Activité ou FA : Faible Activité) et son nombre de points d'intérêt est ajouté au nombre final ( $N_{HA}$  ou  $N_{FA}$ ). Ainsi, la référence réduite à ajouter à l'image transmise est composée de 2 entiers ( $N_{HA}$  et  $N_{FA}$ ) sur 4 octets, et 18 octets représentant le masque d'activité ( $12 \times 12$  bits), soit 22 octets au total. La même procédure est reproduite du côté du récepteur en exploitant le masque d'activité reçu. La qualité perçue est calculée en comparant les nombres de points d'intérêt calculés et reçus. QIP est utilisée dans le travail présenté comme un sélectionneur de couche de qualité capable de détecter une réduction de la qualité perçue pendant le décodage d'une nouvelle couche de qualité JPWL. Nous décodons toutes les  $b$  configurations possibles avec le décodeur robuste JPWL. Chaque configuration est évaluée par QIP qui assigne un score entre 0 (très mauvaise qualité) et 1 (excellente qualité). Nous retenons la configuration présentant le meilleur score QIP ce qui correspond à la meilleure QoE.

## 3 Résultats de simulation

Nous considérons la transmission d'un codestream JPWL à travers un système MIMO  $3 \times 3$  conduisant à considérer 3 sous-canaux SISO différents. Ainsi, la stratégie adapte la transmission de 1 à 3 couches de qualité JPWL. En réception, les 22 octets de la référence réduite QIP sont considérés sans erreur.

### 3.1 Configuration JPWL

Nous considérons un débit source équivalent sur chaque sous-canal virtuel. Les contraintes de débit de la source correspondent au diagramme ci-dessous :



**Fig. 3 : Répartition des couches de qualité JPWL et des données EPB avec les bitrates correspondant**

Les valeurs de débit source (fig. 3) offrent un bon compromis entre une qualité de base acceptable et un gain en qualité suffisant lors de l'ajout d'une couche de qualité supérieure. Afin de limiter les erreurs de transmission, nous utilisons les outils de JPWL : marqueurs de resynchronisation, protection prédéfinie des entêtes, code RS(38,32) sur les données utiles.

Grâce à l'UPA, nous pouvons réduire la redondance des Codes Correcteurs d'Erreur (CCE). Ainsi nous utilisons des CCE à haut rendement dans une stratégie EEP (Equal Error Protection) afin de pallier aux erreurs résiduelles. Pour les simulations, nous considérons deux configurations. La 1<sup>ère</sup> n'utilise pas les codes RS(38,32) de manière à faire ressortir l'impact de la métrique QIP dans le processus de décodage. La 2<sup>ème</sup> configuration met en œuvre une stratégie EEP qui prend en compte des codes RS(38,32). Cette configuration est utilisée afin de comparer les performances globales de la stratégie UPA proposée par les différents précodeurs.

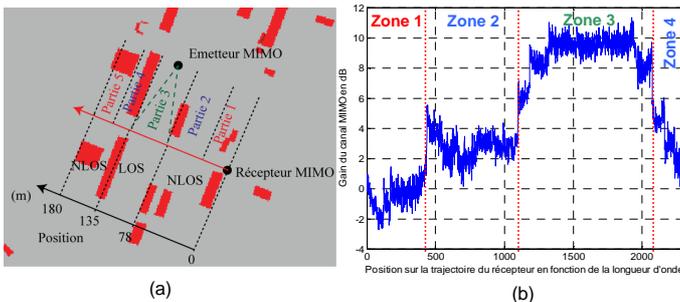
Nous utilisons l'image « Caps » pour les simulations. Le tableau ci-dessous (Tab. 1) résume les scores PSNR et QIP correspondant aux configurations mentionnées ci-dessus :

**Tab. 1 : Caractéristiques de l'image utilisée pour les simulations**

	1 <sup>ère</sup> couche		Avec 2 <sup>ème</sup> couche		Avec 3 <sup>ème</sup> couche	
	PSNR (dB)	QIP	PSNR (dB)	QIP	PSNR (dB)	QIP
Pas de CCE	31,18	0,905	34,85	0,975	37,14	0,976
EEP	30,33	0,857	33,86	0,956	36,08	0,993

### 3.2 Environnement réaliste sujets aux erreurs

Nous utilisons un canal de transmission réaliste pour les simulations comme l'illustre la fig. 4 :



**Fig. 4 : (a) Topologie de l'environnement de transmission et (b) évolution du gain du canal MIMO**

Les réponses impulsionnelles sont fournies par un simulateur de canal basé sur des tracés de rayons 3D [9]. La scène utilisée est l'environnement suburbain présentée en fig. 4-(a) où les bâtiments sont représentés en rouge. L'émetteur MIMO est fixe et le récepteur MIMO se déplace sur une distance de 180m à une vitesse donnée. La qualité de la transmission alterne successivement entre mauvaises (NLOS dans la zone 1), moyennes (NLOS dans les zones 2 et 4) ou bonnes (LOS dans la zone 3). L'évolution du gain du canal MIMO est présentée sur la fig. 4-(b).

### 3.3 Configuration du précodeur QdS

Le précodeur applique une décomposition en valeurs propres sur la matrice de canal ce qui conduit à considérer une matrice de canal virtuel  $H_v$  diagonale dont les termes  $\sigma_i^2$  (valeurs propres) représentent les SNR des sous-canaux SISO. Après l'étape de précodage, le SNR

d'un sous-canal  $i$  devient égale à  $\sigma_i^2 f_i^2$  au lieu de  $\sigma_i^2$  où les  $f_i^2$  sont les coefficients de précodage calculés en fonction de l'état du canal et du critère à maximiser décrit précédemment. Nous considérons une configuration moyenne du précodeur QdS sur chaque portion du canal réaliste, basée sur le contenu à transmettre. Ainsi, nous fixons directement les valeurs des  $f_i^2$  comme indiqués dans le tableau ci-dessous (tab. 2) :

**Tab. 2 : Configurations considérées pour le précodeur QdS**

Etat du canal	Mauvais	Moyen	Bon
Zone de transmission	Zone 1	Zones 2 et 4	Zone 3
Valeur des $f_i^2$	[1 0 0]	[0,4 0,6 0]	[0,05 0,15 0,8]

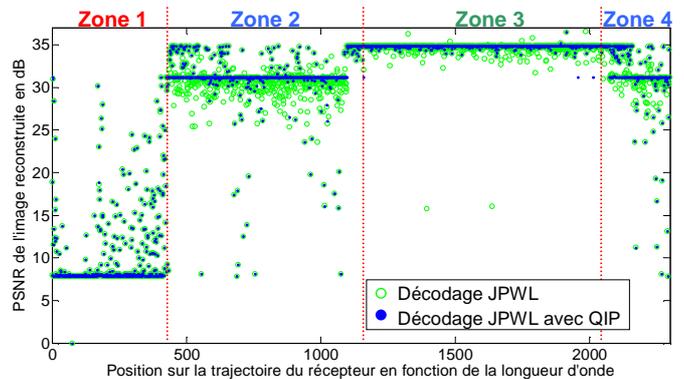
Ce paramétrage a été défini afin d'assurer la meilleure qualité visuelle. Ce système garantit la transmission correcte de la 1<sup>ère</sup> couche de qualité dans de mauvaises conditions (zone 1). On ajoute la 2<sup>ème</sup> couche de qualité lorsque les conditions deviennent moyennes (zones 2 et 4). Enfin, nous transmettons toutes les couches de qualité lorsque les conditions sont bonnes (zone 3).

### 3.4 Chaîne de transmission

La chaîne de transmission inclut les paramètres spécifiques du standard 802.11n [10]. Nous n'utilisons pas les CCE prévus par ce standard, mais nous utilisons les CCE fournis par JPWL. Nous utilisons une modulation MAQ-4, diverses solutions de précodage et un détecteur à Maximum de Vraisemblance. La mobilité dans la scène est fixée à 5 m/s. Le CSI est connu du côté de l'émetteur et du côté du récepteur. Nous effectuons une estimation du canal tous les 300 symboles OFDM, ce qui permet de réduire l'effet Doppler. Le système atteint un débit global de 24Mbits/s.

### 3.5 Bénéfices liés à la métrique QIP

L'intérêt de QIP sur le processus de décodage est particulièrement important dans des configurations défavorables. Ainsi, nous illustrons l'efficacité de QIP avec une configuration EPA (Equal Power Allocation) et par l'absence de CCE sur les données utiles (tab. 1).



**Fig. 5 : Variation du PSNR en fonction du mode de décodage pour l'image « caps » ; configuration EPA**

La fig. 5 illustre l'effet de la métrique QIP sur le processus de décodage. Chaque point représente le PSNR d'une image décodée le long de la trajectoire. Nous comparons deux modes de décodage : le décodage robuste conventionnel proposé par JPWL et le décodage robuste JPWL associé avec QIP. Nous pouvons noter que le premier est sous-optimal car le décodeur peut décoder des couches de qualité présentant des erreurs, ce qui diminue la qualité visuelle globale telle que l'on peut le voir sur la fig. 6.

QIP est capable de détecter une variation du nombre de points d'intérêt, ce qui indique une distorsion de l'image due aux erreurs de transmission. Ainsi, cette métrique est capable de fournir, de manière réaliste, la configuration de décodage fournissant le minimum d'erreurs visuelles.



(a) 2 couches de qualité avec JPWL (erreurs/distorsions sur la 2<sup>ème</sup> couche)



(b) Seulement 1 couche de qualité avec JPWL et QIP

**Fig. 6 : Amélioration de la qualité en utilisant QIP ; (a) PSNR = 23,26dB - QIP = 0,135 ; (b) PSNR = 31,18dB - QIP =0,905**

Nous résumons les performances de QIP par des résultats statistiques dans le tableau 3 :

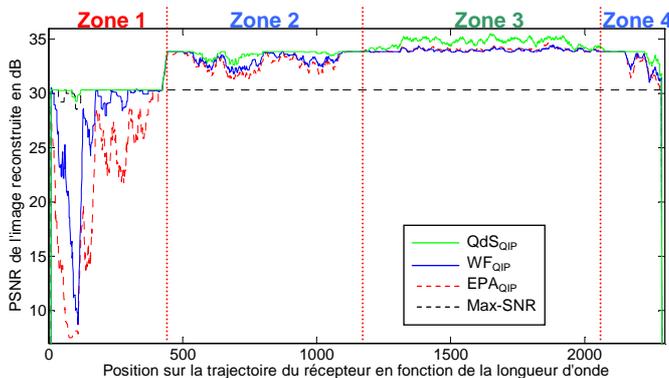
**Tab. 3 : Résultats statistiques sur les performances de QIP**

Stratégie de décodage	Mauvaises conditions		Conditions moyennes		Bonnes conditions	
	Classique	Avec QIP	Classique	Avec QIP	Classique	Avec QIP
Maximisation du PSNR	98,39 %	99,77 %	52,37 %	89,28 %	64,82 %	98,57 %
Meilleure stratégie	0,23 %	1,61 %	10,72 %	47,63 %	1,43 %	35,18 %
PSNR moyen	10,82 dB	10,82 dB	30,64 dB	31,09 dB	34,66dB	34,82 dB

Ce tableau montre la contribution de QIP sur le processus de décodage. Par exemple, pour des conditions moyennes de transmission, QIP fournit le meilleur score en termes de PSNR dans 89,28% des cas et améliore les résultats dans 47,63% des cas. L'absence de stratégie de décodage conduit, la plupart du temps, à décoder trop de couches de qualité ayant pour conséquence une mauvaise qualité visuelle.

### 3.6 Performances du schéma global

Nous comparons les performances du schéma global en utilisant conjointement différentes solutions de précodage (Max-SNR, WF, QdS), une stratégie EEP (cf. tab. 1) afin de réduire les erreurs résiduelles, et QIP. Afin de rendre les courbes plus lisibles, nous les moyennons à l'aide d'une fenêtre glissante contenant 20 valeurs :



**Fig. 7 : Variation du PSNR en fonction des précodateurs**

Nous observons la variation du PSNR des images reconstruites (ordonnée) en fonction de la position sur la trajectoire du récepteur (abscisse) pour les différentes solutions de précodage. Pour de mauvaises conditions (zone 1), il n'est pas possible de transmettre 2 couches de qualité avec une bonne qualité visuelle. Ainsi, la stratégie la plus efficace consiste à mettre toute la puissance sur le 1<sup>er</sup> sous-canal (précodateur QdS et Max-SNR) afin de garantir la 1<sup>ème</sup> couche de qualité. Il n'est donc pas possible d'obtenir de meilleurs résultats sur cette zone. WF maximise la capacité du canal MIMO. Ainsi, il alloue la puissance sur le 2<sup>ème</sup> sous-canal, ce qui réduit les performances en termes de qualité visuelle. Avec des conditions moyennes (zone 2 et 4), WF alloue de la puissance sur tous les sous-canaux alors que QdS alloue la puissance afin d'assurer seulement 2 couches de qualité sans erreur. Ceci s'explique par le fait que la 3<sup>ème</sup> couche de qualité n'est

jamais décodable sans erreur. Max-SNR transmet seulement la 1<sup>ème</sup> couche de qualité ce qui explique que le PSNR obtenu ne dépasse jamais la valeur correspondant à la 1<sup>ème</sup> couche de qualité. Finalement, lorsque que les conditions de transmission sont bonnes (zone 3), le comportement du précodateur WF tend vers une stratégie EPA, ce qui ne permet pas d'assurer la transmission de la 3<sup>ème</sup> couche de qualité sans erreur. Le précodateur QdS tire avantage des hautes valeurs de SNR sur les sous-canaux 1 et 2 pour fournir un maximum de puissance au 3<sup>ème</sup> sous-canal. Ceci permet de réduire drastiquement le TEB sur la 3<sup>ème</sup> couche de qualité ce qui explique la meilleure qualité fournie par cette solution de précodage. Ainsi, nous pouvons voir que la prise en compte du contenu améliore la qualité globale des images reçues quelles que soient les conditions sur le canal.

## 4 Conclusion et perspectives

Dans ce papier, nous avons proposé un schéma global qui prend en compte le contenu pour assurer la QoS. Pour ce faire, nous tirons parti du canal de transmission en exploitant la diversité spatiale offerte par le canal MIMO et sa décomposition en sous-canaux virtuels SISO. Ces derniers sont adaptés pour la transmission d'une image codée en couches de qualité par le codeur JPWL. Nous avons aussi proposé une stratégie de décodage qui prend en compte une métrique à référence réduite nommée QIP, basée sur la perception humaine, et un décodeur robuste JPWL. Cette stratégie de décodage peut résoudre les cas où une couche de qualité additionnelle peut produire des distorsions dues aux erreurs résiduelles. Ceci assure la meilleure configuration de décodage. Nous avons montré que prendre en compte le contenu permet de réaliser un gain significatif en qualité et en robustesse.

En perspectives, nous pouvons considérer l'optimisation du paramétrage du précodateur QdS par un algorithme adaptatif prenant en compte l'état instantané du canal MIMO. Nous pouvons aussi considérer l'adéquation de cette stratégie avec une stratégie UEP classique ce qui conduirait à une robustesse accrue.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet CAIMAN (ANR-08-VERS-002).

## Références

- [1] I.Telatar, "Capacity of multi-antennas Gaussian channels", Eur. Trans. Telecomm. ETT, vol.10, no.6, pp. 585-595, Nov. 1999.
- [2] ISO/IEC 15444-11:2007, "JPEG2000 image coding system - part 11: Wireless JPEG2000", May 2007.
- [3] H. Houas, I. Fijalkow, C. Barras, "Resources allocation for the transmission of scalable images on OFDM systems", IEEE ICC'09, Jun 2009, Dresden, Germany.
- [4] M.F. Sabir, A.C. Bovik, R.W. Heath, Jr., "Unequal Power Allocation for JPEG Transmission Over MIMO Systems", IEEE Transactions on image processing, vol. 19, No. 2, Feb 2010.
- [5] U. Sethakaset, S. Sumei, "Robust JPEG2000 Image Transmission over Closed-Loop MIMO-OFDM with Limited Feedback", IEEE PIMRC 2008, Cannes, France.
- [6] H. Sampath, P. Stoica, A. Paulraj, "Generalized Linear Precoder and Decoder Design for MIMO Channels Using the Weighted MMSE Criterion", IEEE Trans. Commun., Vol. 49, No. 12, pp. 2198-2206, Dec. 2001.
- [7] P. Stoica, G. Ganesan, "Maximum-SNR spatial-temporal formatting designs for MIMO channels", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 50, No. 12, pp. 3036-3042, Dec. 2002.
- [8] Y. Chartois, Y. Pousset, R. Vauzelle, "A SISO and MIMO radio channel characterization with a 3D ray tracing propagation model in urban environment", ECPS'05, March 2005, Brest, France.
- [9] M. Nauge, M.-C. Larabi and C. Fernandez, "A reduced-reference metric based on the interest points in color images", PCS'2010, pp. 610-613, Japan.
- [10] IEEE Standard for Information Technology-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment: Enhancements for Higher Throughput (802.11n), 2009.