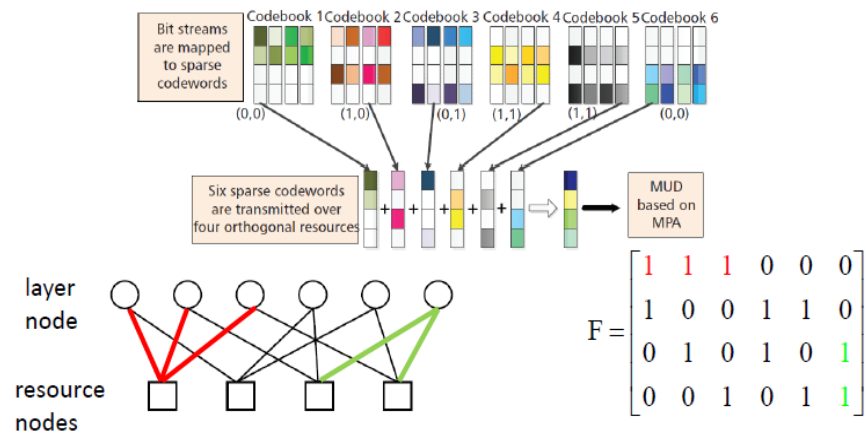




UNE INTRODUCTION AU SCMA



Contents

1. Accès multiple non orthogonal par répartition de code parcimonieux	3
1.1 Sparse code multiple access	3
1.1.1 Principes généraux	3
1.1.2 Définitions de l'émetteur SCMA	3
1.1.3 Modèle formel pour le schéma SCMA.....	5
1.2 Définition des dictionnaires en SCMA.	6
1.3 Représentation par graphe bipartite et décodage itératif associé.	7
2. Schéma SCMA sur canal Gaussien et de Rayleigh.	12
3. Documents de références	15

1. ACCES MULTIPLE NON ORTHOGONAL PAR REPARTITION DE CODE PARCIMONIEUX

1.1 Sparse code multiple access

1.1.1 Principes généraux

SCMA (Sparse Code Multiple Access) est une technique d'accès non orthogonal secondaire permettant de surcharger un système d'accès primaire du type TDMA ou FDMA (OFDMA/SC-FDMA). Cette technique d'accès non orthogonale multi-utilisateurs peut être vue comme un système de modulation conjointe des utilisateurs employant des constellations multidimensionnelles (centralisée pour le mode descendant et distribuée pour le lien montant) par étalement avec contrainte de parcimonie. On peut également le voir comme un système multi-utilisateurs où chaque utilisateur est répété, modulé et superposé en temps/fréquence avec d'autres utilisateurs avec des contraintes de parcimonie sur la superposition.

Ainsi de manière à éviter de se limiter à un système d'accès par contention simple et afin de résoudre les superpositions en temps/fréquence des utilisateurs, une contrainte de parcimonie et d'étalement non orthogonale partiel de la ressource d'un utilisateur est imposée. Cela permet de pouvoir résoudre/détecter les différents utilisateurs avec une complexité maîtrisée car on peut alors hériter des techniques de décodage sur les graphes de type message passing [REF 1]-[REF4].

Au niveau émetteur, les paramètres du système sont le nombre de slots disponibles, le nombre d'utilisateurs et le taux de répétition de ces derniers, permettant de définir la charge du système. Egalement, les performances du schéma SCMA dépendent des modulations employées. Cela passe par la définition de dictionnaires/ « codebooks » qui permettent de gérer l'accès, l'étalement et la mise en forme des données utilisateurs. Nous ferons donc une synthèse des paramètres du SCMA dans la sous-section 2.2.

Au niveau récepteur, la contrainte de parcimonie imposée aux dictionnaires permet de réaliser une détection itérative multi-utilisateurs sous le formalisme des méthodes par passage de message (Message passing). Ce décodage s'appuie sur une représentation sur un graphe associé à la « modulation » SCMA et sur son décodage par algorithme BP (Belief Propagation) sur ce graphe. Ce point sera discuté aux sous sections 2.3 et 2.4.

1.1.2 Définitions de l'émetteur SCMA

Le principe bloc générique du SCMA est donné à la Figure 1.

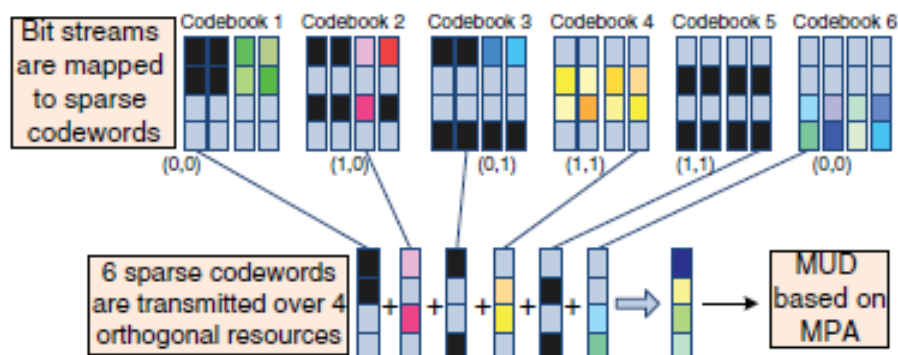


Figure 1 : Principe générique du SCMA

Le principe de non orthogonalité permet à N utilisateurs d'accéder à K ressources de manière simultanée. Le ratio $\eta = N/K$ appelé facteur de (sur)charge détermine l'efficacité du système, et est typiquement supérieur à 1. Dans le cadre du SCMA, on impose d'une part une contrainte de parcimonie, ie. chaque utilisateur ne peut accéder simultanément qu'à un nombre limité de ces ressources. Si de plus on impose une régularité du schéma d'accès, ie. chaque utilisateur ne peut accéder exactement qu'à d_v ressources, il en résulte que seulement $d_c = \eta d_v$ utilisateurs ne peuvent interférer sur une ressource. On parle alors de schéma d'accès régulier de paramètres (d_v, d_c) . d_v peut être interprété comme un paramètre de répétition du symbole d'un utilisateur sur un étalement maximum de K slots temporel/fréquentiel. On remarque également que $\eta = d_c/d_v$.

Concrètement, on associe à chaque utilisateur un dictionnaire complexe parcimonieux de dimension K et de taille M , où M est la taille de l'alphabet des symboles émis par chaque utilisateur sur les ressources sur lesquelles il est autorisé à communiquer. Ainsi, pour chaque utilisateur, on associe à un symbole M -aire émis de $\log_2(M)$ bits un vecteur de taille K avec exactement d_v positions non nulles dont la valeur est donnée par l'index du dictionnaire correspondant au label binaire du symbole émis. On a pour chaque utilisateur M vecteurs K dimensionnels possibles. Pour l'ensemble des utilisateurs, on a donc la somme de toutes les contributions ce qui correspond à un vecteur de dimension K dont chaque position peut prendre M^{d_c} valeurs différentes. Ces valeurs par positions ne sont pas indépendantes, on obtient donc M^N vecteurs distincts de dimension K pour coder $\log_2(M) \cdot N$ bits au total.

Dans l'exemple de la Figure 1, on a $N = 6$, $K = 4$ et comme on considère un schéma d'accès NOMA régulier $(d_v, d_c) = (2,3)$. L'efficacité est alors de 1,5. Chaque utilisateur se voit attribuer un dictionnaire de taille $K \times M$ avec $M = 4$. Ainsi pour chaque utilisateur, 2 bits codant un symbole à émettre sélectionnent une colonne de chaque dictionnaire qui sera envoyée sur le canal. En liaison descendante, on envoie la somme de toutes les contributions. En liaison montante, chaque colonne est préalablement multipliée par le gain de canal associé à chaque ressource. Cette étape définit ce que l'on appelle le codage SCMA qui est par nature non linéaire.

L'architecture d'un émetteur SCMA est alors donnée Figure 2 dans un contexte de communication codée. Les bits de chaque utilisateur sont codés par un code de canal puis chaque groupe de $\log_2(M)$ bits sélectionnent le vecteur à émettre. Le modèle de la communication dépend alors du cas de liaison considéré, montante ou descendante.

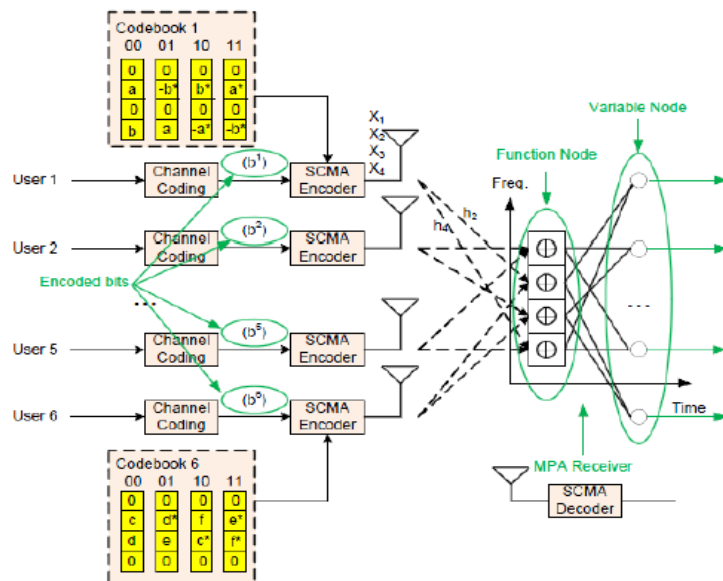


Figure 2 : Principe de l'encodeur SCMA dans un contexte de communication codée.

1.1.3 Modèle formel pour le schéma SCMA

Nous allons maintenant dériver de manière plus formelle le modèle de l'encodage SCMA. Pour l'utilisateur $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ et $m = \log_2(M)$, le codage SCMA est défini par une application non linéaire bijective

$$g_n: \mathbb{F}_2^m \rightarrow \chi_n \subset \mathbb{C}^K$$

$$s_n \mapsto \mathbf{x}_n = g_n(s_n)$$

Où s_n correspond à la représentation binaire du symbole M -aire à émettre pour l'utilisateur n pour le mot de code SCMA à l'instant k . Cette dernière dépendance est omise dans les notations pour faciliter l'exposition de nos propos, mais reste implicite. \mathbb{F}_2 représente le corps de Galois binaire, \mathbb{C} le corps des complexes et χ_n définit l'espace des vecteurs de \mathbb{C}^K admissibles pour l'utilisateur n , de cardinalité $|\chi_n| = M$. Le vecteur \mathbf{x}_n est un vecteur K -dimensionnel parcimonieux ne comportant que d_v coordonnées non nulles telles que $d_v < K$. La fonction définit donc une fonction de mapping multidimensionnelle, correspondant à une généralisation du mapping traditionnel où $K = 1$. L'expansion de dimension (vue en temps ou fréquence) peut être vue comme une opération d'étalement, d'où la vision commune du SCMA comme une modulation par étalement avec contrainte de parcimonie.

Si on considère une transmission de tous les utilisateurs sur un canal Gaussien avec évanouissements, le modèle au récepteur devient alors

$$\mathbf{y} = \sum_{n=1}^N \text{diag}(\mathbf{h}_n) \mathbf{x}_n + \mathbf{b}$$

Les vecteurs \mathbf{y} et \mathbf{b} sont des vecteurs K -dimensionnels avec \mathbf{b} un vecteur de bruit Gaussien complexe centré de matrice de covariance $N_0 \mathbf{I}_K$, soit $\mathbf{b} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, N_0 \mathbf{I}_K)$. $\mathbf{h}_n = [h_{1,n} \ h_{2,n} \dots \ h_{K,n}]^T$ est le vecteur de canal associé à l'utilisateur n sur les K slots d'accès supposés orthogonaux. La notation $\text{diag}(\mathbf{h}_n)$ fait référence à la matrice diagonale de taille $K \times K$ dont les éléments diagonaux sont donnés par \mathbf{h}_n et telle que

$$\text{diag}(\mathbf{h}_n) = \begin{bmatrix} h_{1,n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{2,n} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & h_{K,n} \end{bmatrix}$$

Ce schéma permet de modéliser facilement une instanciation du codage SCMA sur des schémas d'accès avec un accès aux ressources qui sont supposées orthogonales en temps (type TDMA) ou en fréquence (OFDMA). Le modèle générique précédent s'applique pour une liaison montante. Pour un schéma d'accès descendant, on a $\mathbf{h}_n = \mathbf{h}, \forall n$.

Pour illustrer le codage/mapping SCMA, reprenons l'exemple de la Figure 1. On a $N = 6, K = 4$. Un dictionnaire (défini plus avant dans la suite dans le Tableau 1) possible pour l'utilisateur 1 est la matrice de codage non linéaire de taille $K \times M$ suivante :

$$\mathbf{CB}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1815 - 0.1318i & -0.6351 - 0.4615i & 0.6351 + 0.4615i & 0.1815 + 0.1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & 0.7851 \end{bmatrix}.$$

Les colonnes de cette matrice définissent le vecteur de dimension K envoyé par l'utilisateur 1 sur les K ressources de canal. On a donc un utilisateur « étalé » sur K ressources, mais dont deux seulement sont réellement utilisées. Si on considère les colonnes indexées par un codage binaire naturel et le symbole émis pour le mot de code SCMA courant est '00' alors le symbole émis par l'utilisateur 1 sera

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1815 - 0.1318i \\ 0 \\ 0.7851 \end{bmatrix}.$$

Ainsi on interprète ce vecteur comme la transmission de deux symboles 4-aire sur 2 slots fréquentiels temporels. C'est équivalent à une répétition du symbole '00' avec diversité de modulation et on parle d'étalement car on 'occupe' au total 4 slots.

Si on suppose de plus que le canal de type évanouissement constant sur chaque ressource, une réalisation possible du canal est donnée par $\mathbf{h}_1 = [h_{1,1} \ h_{2,1} \dots \ h_{K,1}]^T = [2.5303 + 0.5129i \ 1.9583 - 0.0446i \ -0.9545 + 0.5054i \ 2.1460 - 0.1449i]^T$ et donc on obtient

$$\text{diag}(\mathbf{h}_1) = \begin{bmatrix} 2.5303 + 0.5129i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9583 - 0.0446i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.9545 + 0.5054i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.1460 - 0.1449i \end{bmatrix}.$$

Le vecteur reçu pour l'utilisateur 1 est donc

$$\mathbf{z}_1 = \text{diag}(\mathbf{h}_1) \mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.3613 - 0.2500i \\ 0 \\ 1.6848 - 0.1138i \end{bmatrix}.$$

En opérant ainsi avec tous les utilisateurs, on aura $\mathbf{y} = \sum_{n=1}^N \mathbf{z}_n + \mathbf{b}$. Ceci correspond bien à un système d'accès non orthogonale car les utilisateurs se superposent sur les slots alloués. Ainsi, d'après le Tableau 1, pour le slot 2 (deuxième coordonnée des vecteurs colonnes), les utilisateurs {1, 3, 6} interfèrent. Les fonctions de codage des utilisateurs 3 et 6 sont alors données par

$$\text{CB}_3 = \begin{bmatrix} -0.6351 + 0.4615i & 0.1815 - 0.1318i & -0.1815 + 0.1318i & 0.6351 - 0.4615i \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{CB}_6 = \begin{bmatrix} 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Si les utilisateurs 3 et 6 envoient pour le mot de code SCMA courant '01' et '11' respectivement, les vecteurs émis seront

$$\mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} 0.1815 - 0.1318i \\ 0.4873 - 0.6156i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{x}_6 = \begin{bmatrix} -0.7851 \\ -0.1392 + 0.1759i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

1.2 Définition des dictionnaires en SCMA.

Pour chaque utilisateur, on peut définir un dictionnaire associé qui est une matrice de taille $K \times M$. L'ensemble du dictionnaire pour tous les utilisateurs peut donc se représenter par un tableau parcimonieux multidimensionnel à données dans \mathbb{C} , noté \mathcal{C} , de taille $K \times M \times N$. $\mathcal{C}(k, m, n)$ sera alors le symbole associé avec le label binaire de $\log_2(M)$ bits associé à la colonne m émis par l'utilisateur n sur la ressource k . Sauf définition explicite, on supposera que les labels binaires (mapping) des symboles suivent l'énumération binaire naturelle.

Nous avons implémenté en simulation un certain nombre de méthodes de construction des dictionnaires pour le SCMA [REF 1], [REF 8]-[REF 13] pour le cas d'exemple de paramètres $N = 6$, $K = 4$ et

également $N = 15$, $K = 6$. Nous ne comparerons en simulation que quelques-uns parmi ces derniers mais ils sont disponibles dans le simulateur fourni.

Si nous prenons par exemple un des dictionnaires de référence dans la littérature issu de [REF1], on obtient alors les dictionnaires suivant par chacun des 6 utilisateurs :

SCMA Codebook index	SCMA codebook for each layer
CB_1	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1815 - 0.1318i & -0.6351 - 0.4615i & 0.6351 + 0.4615i & 0.1815 + 0.1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \end{bmatrix}$
CB_2	$\begin{bmatrix} 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1815 - 0.1318i & -0.6351 - 0.4615i & 0.6351 + 0.4615i & 0.1815 + 0.1318i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
CB_3	$\begin{bmatrix} -0.6351 + 0.4615i & 0.1815 - 0.1318i & -0.1815 + 0.1318i & 0.6351 - 0.4615i \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
CB_4	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ -0.0055 - 0.2242i & -0.0193 - 0.7848i & 0.0193 + 0.7848i & 0.0055 + 0.2242i \end{bmatrix}$
CB_5	$\begin{bmatrix} -0.0055 - 0.2242i & -0.0193 - 0.7848i & 0.0193 + 0.7848i & 0.0055 + 0.2242i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.6351 + 0.4615i & 0.1815 - 0.1318i & -0.1815 + 0.1318i & 0.6351 - 0.4615i \end{bmatrix}$
CB_6	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7851 & -0.2243 & 0.2243 & -0.7851 \\ 0.1392 - 0.1759i & 0.4873 - 0.6156i & -0.4873 + 0.6156i & -0.1392 + 0.1759i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Tableau 1 : Exemple de dictionnaire issu de [REF1] issu de la présentation « 1st 5G Algorithm Innovation Competition-SCMA ».

Si on considère le premier utilisateur, on en déduit que ce dernier communique sur les blocs de ressource 2 et 4 avec une modulation d'ordre 4 dont les mappings sont donnés sur les lignes 2 et 4. De manière similaire l'utilisateur 4 communique sur les deux derniers blocs de ressource.

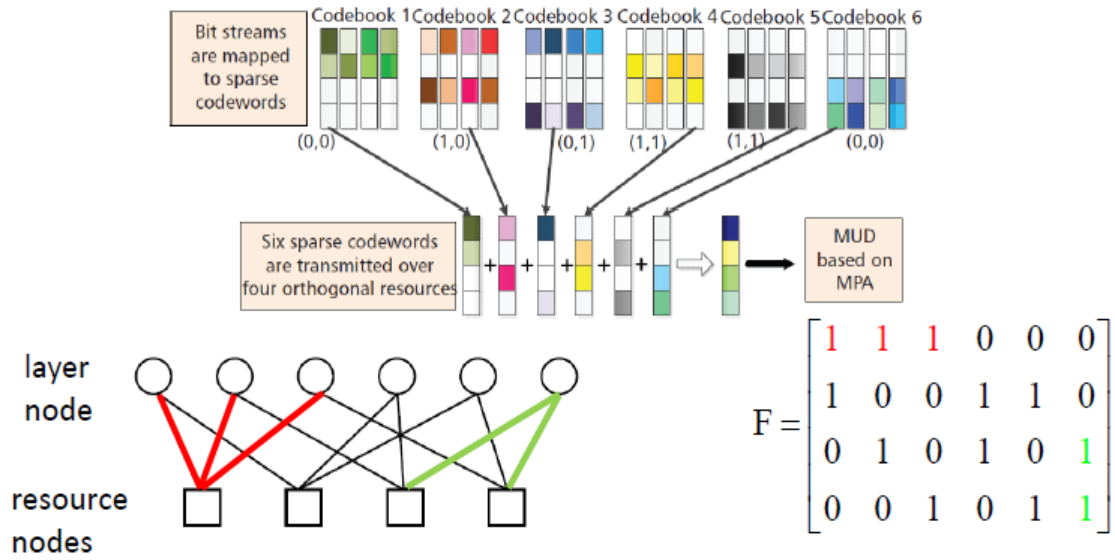
1.3 Représentation par graphe bipartite et décodage itératif associé.

Le décodage optimal d'un mot de code SCMA est donné par le critère MAP suivant:

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X}|\mathbf{y})$$

Où $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N]$ appartenant à $\chi = \chi_1 \times \chi_2 \times \dots \times \chi_N$. Si on suppose tous les codebooks de tailles équivalentes, on aura $|\chi| = M^N$, i.e. une complexité polynomiale en M et exponentielle en N .

On préfère alors privilégier une approche de décodage par propagation de croyances, souvent référencée comme décodage de type *message passing*. Ce type d'algorithme s'appuie sur une représentation bipartite du graphe d'interférence sous-jacent aux dictionnaires utilisés en SCMA. Ainsi on associe à notre mot de code SCMA une représentation en graphe comportant les nœuds de variables (*variable/layer node*), notés V_n , associés aux symboles des utilisateurs. Le deuxième type de nœuds, noté C_k , est appelé nœuds de contrainte (*function/resource node*) et est associé aux observations liées à la superposition des utilisateurs sur les blocs de ressource utilisés par le mot de code SCMA. Le principe générique est illustré avec la figure suivante :



On voit que le graphe bipartite associé comporte N nœuds de variables, K nœuds de contrainte et $N_e = Nd_v = Kd_c$ branches. On aura une branche entre le nœud de variable V_n et le nœud de contrainte C_k si l'utilisateur n communique sur le slot de ressource k . Si le graphe comporte le même nombre de branches par nœuds de variables et par nœuds de contrainte, le graphe sera dit régulier de paramètres (d_v, d_c) . C'est le cas le plus considéré. On peut alors associer à ce graphe une matrice d'adjacence F telle $F_{kn} = 1$ si une branche existe entre V_n et C_k . Les nœuds de variables sont donc associés aux colonnes et les nœuds de contrainte aux lignes. Quand le code SCMA est régulier, on a alors d_v '1' par colonne et d_c '1' par ligne. On a alors une analogie très forte avec les codes définis sur les graphes (codes LDPC). On peut d'ailleurs voir les codes SCMA comme des codes complexes de type LDGM (Low Density Generator Matrix) non systématiques vus comme « compresseur ».

Sur ce graphe, on peut alors réaliser un décodage de type message passing. Si on considère un décodeur dont les messages sont homogènes à des probabilités, on peut définir deux types de messages : les messages $P_{k \rightarrow n}$ qui représentent les messages des nœuds de contrainte k vers les nœuds de variable n et les messages $Q_{n \rightarrow k}$ qui représentent les messages des nœuds de variable n vers les nœuds de contrainte k . Ces messages sont de dimension M si on considère des dictionnaires de même dimension avec des constellations d'ordre M . Les messages transitant dans le graphe sont donc des vecteurs de probabilité proportionnels à une probabilité a posteriori conditionnelle $P(s_n | \cdot)$ de taille M , car le symbole s_n émis par l'utilisateur n pour le mot de code SCMA courant appartient à un ensemble de cardinalité M . Les messages transitant dans le graphe permettent donc de calculer localement la probabilité a posteriori d'un symbole s_n sachant les informations fournies par les nœuds adjacents, ces informations étant vues comme des informations a priori.

Ces messages sont mis à jour de manière itérative de la manière suivante :

1. Mise à jour des nœuds de contrainte

A l'itération $l = 1: l_{max}$, pour tout $m \in \{1, \dots, M\}$, pour tout $n \in \mathcal{N}_k$,

$$P_{k \rightarrow n}^l[m] = \sum_{\{m_p \in [1, \dots, M], p \in \mathcal{N}_{k \setminus n}\}} P(y_k | \mathcal{C}(k, m, n), \{\mathcal{C}(k, m_p, p), p \in \mathcal{N}_{k \setminus n}\}, \{\mathbf{h}_n, \mathbf{n}' = \mathbf{1}: N\}) \prod_{p \in \mathcal{N}_{k \setminus n}} Q_{p \rightarrow k}^{l-1}[m_p]$$

Où

- \mathcal{N}_k représente l'ensemble des indices des nœuds de variables (utilisateurs) incidents au nœud fonctionnel k ;

- $\mathcal{N}_{k \setminus n}$ représente l'ensemble des indices des nœuds de variables (utilisateurs) incidents au nœud fonctionnel k excepté le nœud associé à l'utilisateur courant n .
A la première itération, on suppose les $Q_{p \rightarrow k}^0[m]$ initialisées avec une probabilité discrète uniforme (ie. $1/M$). Cette étape correspond à une étape de marginalisation multidimensionnelle.

Si on considère le modèle de transmission précédent, on a alors

$$P(y_k | \mathcal{C}(k, m, n), \{\mathcal{C}(k, m, p), p \in \mathcal{N}_{k \setminus n}\}, \{\mathbf{h}_n, \mathbf{n}' = \mathbf{1}:N\}) \propto \exp \left(-\frac{1}{N_0} \left| y_k - h(n, k) \mathcal{C}(k, m, n) - \sum h(p, k) \mathcal{C}(k, m, p) \right|^2 \right)$$

Où $h(n, k)$ représente le gain du canal de l'utilisateur n sur la ressource k . La somme dans l'expression précédente est sur l'indice $p \in \mathcal{N}_{k \setminus n}$. L'ensemble des opérations est illustré Figure 4 :

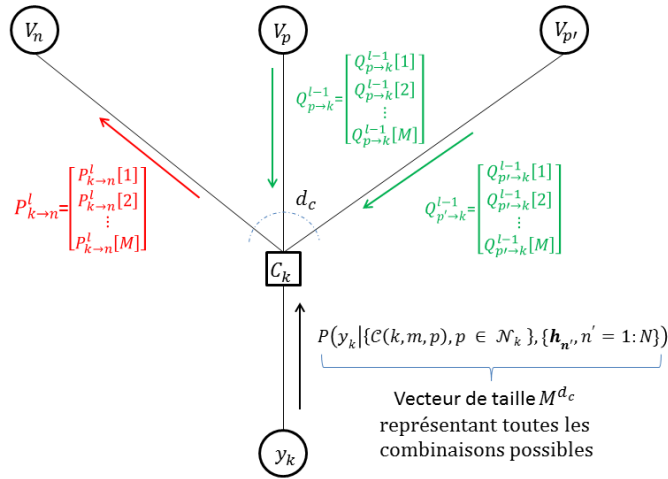


Figure 4: Mise à jour des nœuds de contraintes

2. Mise à jour des nœuds de variable

A l'itération $l = 1: l_{max}$, pour tout $m \in \{1, \dots, M\}$, on a

$$Q_{n \rightarrow k}^l[m] = \pi_n(m) \prod_{k' \in \mathcal{N}^{n \setminus k}} P_{k' \rightarrow n}^l[m]$$

Où $\mathcal{N}^{n \setminus k}$ est l'ensemble des indices des nœuds fonctionnels incidents au nœud de variable n privé de l'indice k et π_n est la distribution a priori des symboles de chaque utilisateur. On supposera cette densité uniforme. On peut également avoir à réaliser une étape de normalisation de ces messages si on implémente l'algorithme dans le domaine des probabilités. L'ensemble des opérations est illustré Figure 5.

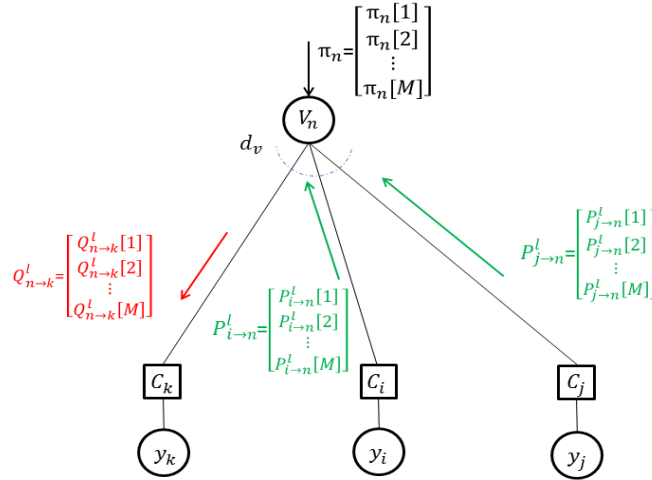


Figure 5: Mise à jour noeuds de variables.

3. Calcul des probabilités a posteriori et LLR

Après l_{max} itérations, pour tout $m \in \{1, \dots, M\}$, on a

$$\tilde{Q}_n^{l_{max}}[m] = \pi_n(m) \prod_{k \in \mathcal{N}^n} P_{k \rightarrow n}^{l_{max}}[m]$$

Où $\tilde{Q}_n^{l_{max}}$ est la probabilité a posteriori approximée du symbole de l'utilisateur n , \mathcal{N}^n est l'ensemble des indices des nœuds fonctionnels incidents au nœud de variable n . L'ensemble des opérations est illustré Figure 6 :

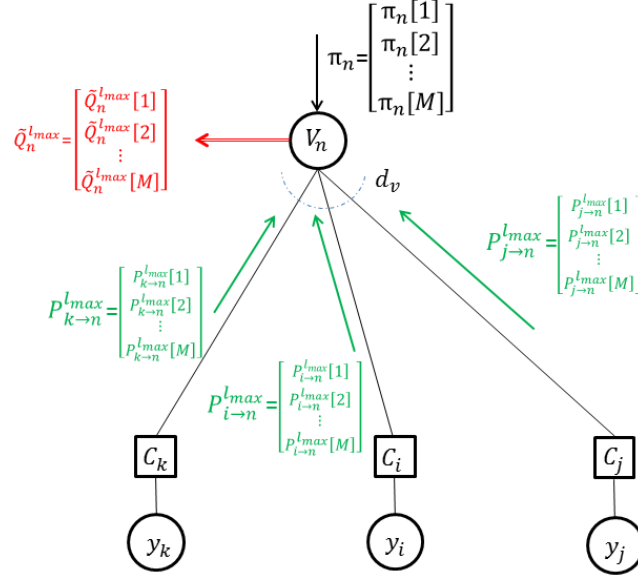


Figure 6: Calcul des probabilités a posteriori.

On obtient alors les log-rapports de probabilité par bit par marginalisation directe donnée par la formule suivante :

Pour tout $m \in \{1, \dots, \log_2(M)\}$,

$$LLR(b_{n,m}) = \log \left(\frac{\sum_{p \in \mathcal{S}_m^0} \tilde{Q}_n^{lmax}[p]}{\sum_{p \in \mathcal{S}_m^1} \tilde{Q}_n^{lmax}[p]} \right)$$

Où $b_{n,m}$ représente le m -ième bit associé au symbole s_n de l'utilisateur n , \mathcal{S}_m^i est l'ensemble des indices entiers tel que le m -ième bit de la représentation binaire de s_n est égale à $i = 0, 1$. Ainsi pour l'exemple du Tableau 1 et en utilisant un mapping binaire naturel, si on veut calculer le LLR associé au premier bit du premier utilisateur, il conviendra de calculer pour $s_n \in \{00', 01', 10', 11'\}$ associé à $p \in \{1, 2, 3, 4\}$,

$$LLR(b_{1,1}) = \log \left(\frac{\tilde{Q}_1^{lmax}[1] + \tilde{Q}_1^{lmax}[2]}{\tilde{Q}_1^{lmax}[3] + \tilde{Q}_1^{lmax}[4]} \right) \text{ et } LLR(b_{1,2}) = \log \left(\frac{\tilde{Q}_1^{lmax}[1] + \tilde{Q}_1^{lmax}[3]}{\tilde{Q}_1^{lmax}[2] + \tilde{Q}_1^{lmax}[4]} \right).$$

En appliquant cet algorithme, la complexité est ramenée à $O(KM^{d_c})$ contre $O(M^N)$ pour un décodage ML classique.

2. SCHEMA SCMA SUR CANAL GAUSSIEN ET DE RAYLEIGH.

On donne maintenant les résultats de simulation pour différents dictionnaires sur le canal Gaussien (sans diversité de canal) et de Rayleigh (maximum de diversité de canal) pour un dictionnaire régulier (2,3) avec 5 itérations de décodage.

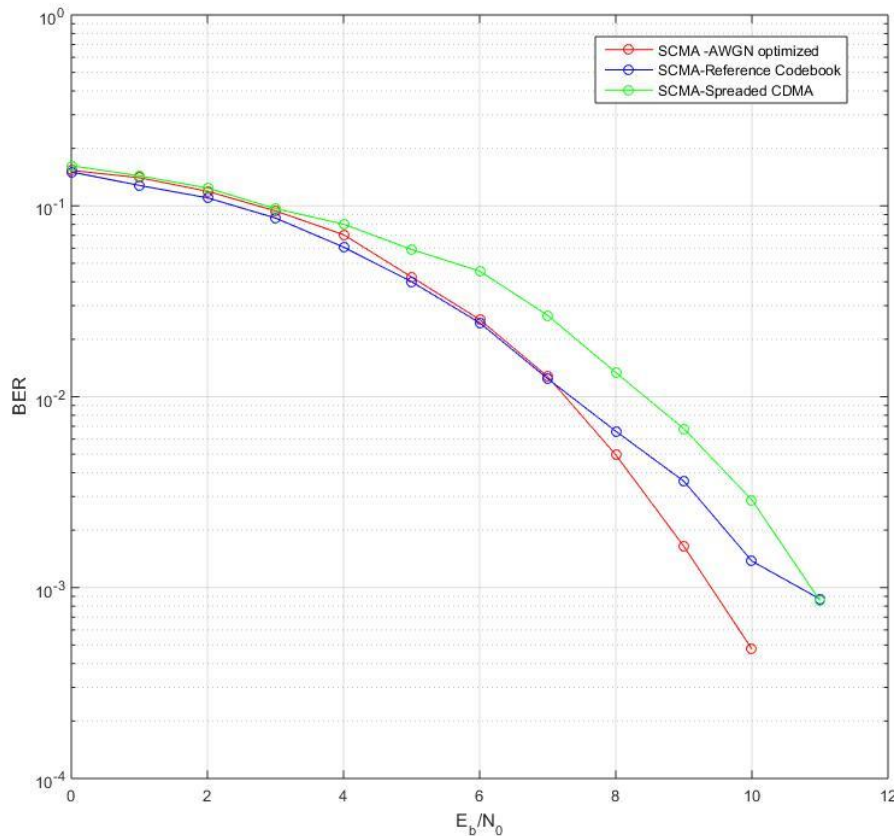


Figure 7: Performances sur canal Gaussien de trois dictionnaires différents

On remarque sur cette figure que les performances sur canal Gaussien peuvent varier beaucoup d'un dictionnaire à l'autre. La même chose peut être dite sur le cas d'un canal de Rayleigh (voir Figure 8). Cependant, les conclusions suivantes peuvent être données. Pour bénéficier de la diversité du canal, il faut absolument considérer des dictionnaires optimisés sur canal de Rayleigh. Ces derniers ont des performances qui peuvent varier assez fortement sur un cas d'usage donné. Il faut donc sélectionner soigneusement ces derniers. Le dictionnaire de référence [REF1] semble donner un bon compromis pour les deux canaux considérés.

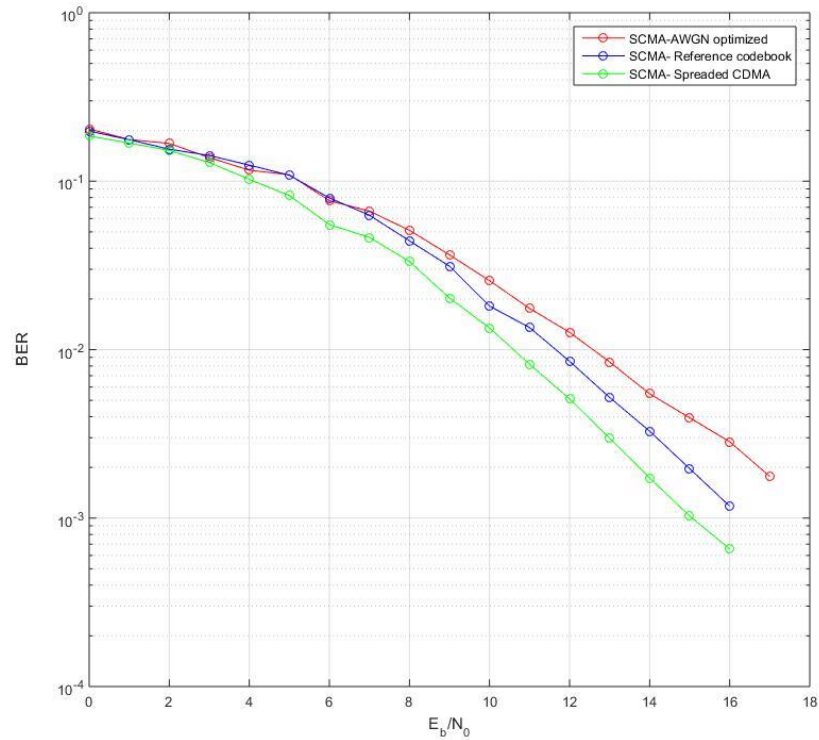


Figure 8 : Performances sur canal de Rayleigh de trois dictionnaires de référence.

On s'intéresse maintenant à la vitesse de convergence sur le dictionnaire de [REF1]. On remarque alors Figure 9 que l'on converge rapidement vers les performances du détecteur MAP, typiquement 5 itérations sur les cas testés. Ce comportement se vérifie dans la majorité des cas. Cependant, il faut rester vigilant car dans certains cas la convergence est plus lente vers les performances MAP, ce qui induit un compromis performance/latence/complexité, cette dernière étant proportionnelle au nombre d'itérations.

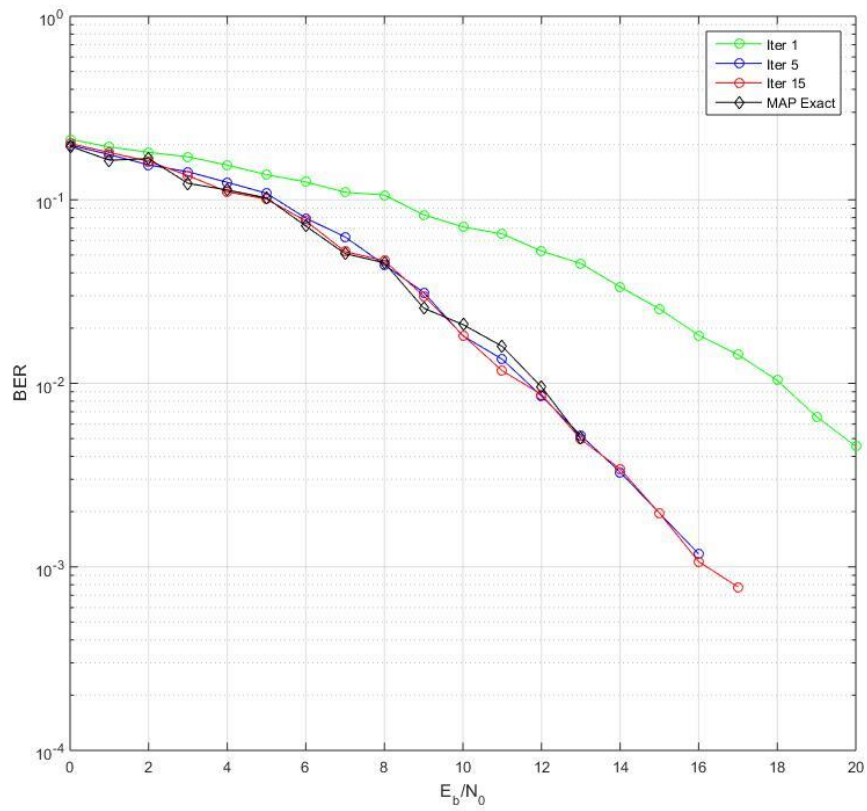


Figure 9 : Influence du nombre d'itérations sur les performances et convergence vers le détecteur MAP.

3. DOCUMENTS DE REFERENCES

- [REF1] H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," in Proc. IEEE 24th Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), London, U.K., Sep. 2013, pp. 332-336. 259.
- [REF2] H. Nikopour et al., "SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Austin, TX, USA, Dec. 2014, pp. 3940-3945.
- [REF3] K. Au, L. Zhang, H. Nikopour, E. Yi, A. Bayesteh, U. Vilaipornsawai, P. Zhu, "Uplink Contention Based SCMA for 5G Radio Access", International Workshop on Emerging Technologies for 5G Wireless Cellular Networks, with IEEE Globecom, Houston, Texas, USA. <https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1407/1407.5495v1.pdf>.
- [REF4] S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He, and Y. Chen, "Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Austin, TX, USA, Dec. 2014, pp. 4782-4787.
- [REF5] A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Taherzadeh, H. Baligh, and J. Ma, "Low complexity techniques for SCMA detection," in Proc. IEEE Globecom Workshops, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1-6.
- [REF6] Y. Du, B. Dong, Z. Chen, J. Fang, and L. Yang, "Shuffled multiuser detection schemes for uplink sparse code multiple access systems," IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 6, pp. 1231-1234, June 2016.
- [REF7] Y. Wu, S. Zhang, and Y. Chen, "Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems," in Proc. IEEE Int. Commun. Conf. (ICC), London, U.K., Jun. 2015, pp. 2918-2923.
- [REF8] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, and H. Baligh, "SCMA codebook design," in Proc. IEEE 80th Veh. Technol. Conf. (VTC Fall), Vancouver, BC, Canada, Sep. 2014, pp. 1-5.
- [REF9] J. Bao, Z. Ma, M. A. Mahamadu, Z. Zhu, and D. Chen, "Spherical codes for SCMA Codebook," in Proc. IEEE 83rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), May 2016, pp. 1-5.
- [REF10] D. Cai, P. Fan, X. Lei, Y. Liu, and D. Chen, "Multi-dimensional SCMA codebook design based on constellation rotation and interleaving," in Proc. IEEE 83rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), May 2016, pp. 1-5.
- [REF11] L. Yu, X. Lei, P. Fan, and D. Chen, "An optimized design of SCMA codebook based on star-QAM signaling constellations," in Proc. Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. (WCSP), Nanjing, China, Oct. 2015, pp. 1-5.
- [REF12] J. Bao, Z. Ma, Z. Ding, G. K. Karagiannidis and Z. Zhu, "On the Design of Multiuser Codebooks for Uplink SCMA Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 10, pp. 1920-1923, Oct. 2016.
- [REF13] J. Peng, W. Chen, B. Bai, X. Guo and C. Sun, "Joint Optimization of Constellation With Mapping Matrix for SCMA Codebook Design," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 24, no. 3, pp. 264-268, March 2017.