

Détecteur pour l'accès aléatoire massif entre machines avec connaissance statistique du canal en lien ascendant

Diane DUCHEMIN¹, Lélio CHETOT¹, Jean-Marie GORCE¹, Claire GOURSAUD¹

¹Univ Lyon, Inria, INSA Lyon, CITI, F-69621 Villeurbanne, France

{diane.duchemin, lelio.chetot, jean-marie.gorce, claire.goursaud}@insa-lyon.fr

Résumé – Cet article se focalise sur les communications aléatoires en lien montant d'un sous-ensemble de noeuds disséminés dans une cellule. Sous les contraintes de communications massives pour machines dans les réseaux sans fil à faible consommation énergétique ainsi que les communications ultra fiables et à faible latence, nous supposons une coordination hautement restreinte avec le récepteur et un accès multiple non-orthogonal. Nous proposons ensuite un détecteur optimal des utilisateurs actifs dans le cadre de transmissions de données avec, à la réception, une connaissance du canal limitée à sa statistique. Cet algorithme implémente un détecteur à maximum de vraisemblance. Sa formulation et ses performances sont données pour différents nombres d'antennes à la station de base et longueurs de codes.

Abstract – This paper focuses on random uplink transmissions of a subset of nodes disseminated in a cell. Under the constraints of massive Machine Type Communication (mMTC) in cellular Low Power Wide Area Networks (LPWAN) and Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC), we assume a highly restricted coordination with the receiver and the usage of coded Non Orthogonal Multiple Access (NOMA). We then target direct data transmission and propose an optimal detector of the active users with channel state information at the receiver limited to statistical knowledge. This algorithm implements a Maximum Likelihood (ML) detector. We give the formulation of the optimal detector and we evaluate its performance, with different codelengths and for various number of base station antennas.

1 Introduction

L'attrait récent pour les communications de l'Internet des Objets (IoT) a amené la communauté de chercheurs à s'intéresser à des compromis et des objectifs qui diffèrent de ceux des communications dans les réseaux cellulaires classiques [1, 2]. Par exemple, l'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que l'impact des accès massifs ou des petits paquets font partie des sujets de prédilections [3, 4].

Dans cet article, nous nous focalisons sur la détection de transmissions simultanées de paquets courts, dans le contexte d'accès aléatoire massif. L'objectif est principalement de réduire la latence des communications concurrentes du lien ascendant entre un point d'accès et un ensemble de noeuds (par exemple des demandes d'accès au réseau). De plus, nous voulons que les paquets soient transmis sans mécanisme d'accord des 2 parties, trop coûteux en termes d'utilisation des ressources, tout en assurant la fiabilité de la détection. Plus précisément, nous ciblons la détection d'utilisateurs multiples, dans un modèle de coordination restreinte, avec accès aléatoire direct et massif, sans connaissance explicite du canal de transmission. Nos travaux se situent dans la lignée de ceux de Bockelmann et al. [4], portant notamment sur la transmission directe avec les accès dits "one(two)-stage(s)", et ceux du 3GPP avec la trans-

mission "précoce" de données pendant la procédure d'accès aléatoire pour les standards Cat-M et NB-IoT [5]. Cependant, comme nous ne considérons pas la possibilité de transmettre une séquence pilote pour l'estimation du canal, nous faisons l'hypothèse que les demandes d'accès au réseau ont lieu sous une coordination restreinte. En effet, toute précédente communication introduirait une surcharge protocolaire et ne serait par ailleurs pas pertinente dans les cas de demande d'accès (les utilisateurs devraient être préalablement identifiés pour permettre l'estimation de leurs canaux). Du fait que les accès simultanés puissent être particulièrement nombreux, nous supposons l'emploi de codage pour accès multiples non orthogonaux (NOMA) pour permettre le partage des ressources, par le biais de codes Gaussiens [6]. Cependant, la non coordination –en termes de connaissance du canal, comme discuté dans la section 2– n'est en général pas considérée [7, 8, 9].

Dans cet article, nous proposons un détecteur d'utilisateurs multiples pour le codage NOMA, avec au récepteur une connaissance du canal limitée à sa statistique. Dans la section 2, nous décrivons la modélisation employée et en déduisons la règle de détection optimale associée dans la section 3. La section 4 présente les résultats numériques. La section 5 conclut l'article.

2 Description du Modèle

La Table 1 liste les notations mathématiques ainsi que les principales variables utilisées dans cet article.

Ces travaux ont été financés partiellement par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) sous le projet n° ANR-16-CE25-0002 - EPHYL, et par le laboratoire commun Inria-Nokia Bell Labs sous l'action de recherche Network Information Theory.

TABLE 1 – List of mathematical notations

Notation	Description
$\ \cdot\ _p$	Norme p
$ \cdot $	Module
s	Scalaire complexe quelconque
\mathbf{v}	Vecteur complexe quelconque
\mathbf{M}	Matrix complexe quelconque
\cdot^t	Transposée
\cdot^H	Transposée hermitienne
Φ	Ensemble de tous les nœuds
ϕ	Cardinal de Φ
$\underline{\Omega}$	Sous-ensemble de nœuds
Ω	Sous-ensemble quelconque de Φ
N	Cardinal de Ω
A	Nombre d'antennes de la station de base
M	Longueur de code
\mathbf{y}	Vecteur du signal reçu
\mathbf{z}	Vecteur de bruit
\mathbf{c}_n	Vecteur du code de l'utilisateur n
\mathbf{x}_n	Vecteur du message de l'utilisateur n
\mathbf{h}_a	Vecteur du canal pour l'antenne a

Le cadre général est le suivant : un ensemble de nœuds Φ est déployé dans la cellule couverte par un point d'accès auquel nous nous référerons par la suite par le terme "station de base". Nous considérons le trafic en lien montant, supposé sporadique (i.e. un sous-ensemble de nœuds $\underline{\Omega} \subset \Phi$ est actif à un temps donné). De plus, une transmission se réalise sous les hypothèses d'une coordination restreinte entre les nœuds et la station de base et l'absence de coordination entre les nœuds. Une coordination limitée autorise d'une part l'allocation du dictionnaire de codes, la synchronisation des transmissions entre les nœuds et la station de base, et d'autre part, un contrôle de puissance tel que, en moyenne, la puissance reçue de tous les nœuds est identique. Par exemple, un signal balise peut être utilisé à cet effet. Par la suite, le terme "non-coordonné" fera référence à la connaissance du canal.

2.1 Connaissance parfaite du canal

Chaque nœud $n \in \Phi$ peut transmettre son propre code \mathbf{c}_n qui aura été préalablement alloué ou aléatoirement sélectionné selon une procédure connue de la station de base et des nœuds. En reprenant [8, 9], l'expression du signal reçu à la station de base est :

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \cdots & y_{1,M} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{A,1} & \cdots & y_{A,M} \end{bmatrix} = \sum_{n \in \underline{\Omega}} \sqrt{\rho} \mathbf{h}_n \mathbf{c}_n^t + \mathbf{Z} \quad (1)$$

où $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{A \times M}$ est le signal reçu de longueur M sur les A antennes, ρ est la puissance du signal reçu. Pour chaque nœud actif n , $\mathbf{c}_n \in \mathbb{C}^M$ est son code et, supposant un évanouissement

plat par bloc de Rayleigh, indépendamment et identiquement distribué sur chaque antenne, $\mathbf{h}_n \in \mathbb{C}^A$ est la réponse impulsionnelle du canal associée au nœud n . $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{A \times M}$ représente un bruit blanc additif Gaussien. La vectorisation de (1) donne :

$$\mathbf{y} = \sum_{n \in \underline{\Omega}} \sqrt{\rho} \mathbf{H}_n \cdot \mathbf{c}_n + \mathbf{z} \quad (2)$$

où $\mathbf{H}_n = \mathbf{I}_M \otimes \mathbf{h}_n$, avec \mathbf{I}_M étant la matrice identité de taille $M \times M$ et \otimes le produit de Kronecker. Nous avons alors $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{AM}$ et $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{AM}$.

2.2 Connaissance statistique du canal

Pour définir un détecteur adapté aux communications non-coordonnées, nous modifions le modèle précédent en considérant que le canal n'est plus connu à la station de base. En effet, cette hypothèse n'est pas pertinente en l'absence de coordination puisqu'elle requerrait une phase antérieure durant laquelle les nœuds seraient identifiés afin d'en déduire leur réponse impulsionnelle de canal. Par conséquent, la statistique du canal, et non ses réalisations, sera la seule connaissance préalable que la station de base possèdera. Les codes restent donc connus. Dans ce contexte, le signal reçu peut être reformulé comme suit :

$$\mathbf{y} = \sum_{n \in \underline{\Omega}} \sqrt{\rho} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_n & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_n & 0 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \mathbf{c}_n \end{bmatrix} \mathbf{h}_n + \mathbf{z} \quad (3)$$

$$= \sum_{n \in \underline{\Omega}} \sqrt{\rho} (\mathbf{I}_A \otimes \mathbf{c}_n) \mathbf{h}_n + \mathbf{z} \quad (4)$$

Dans cette nouvelle expression, les éléments de \mathbf{y} sont réordonnés comparé à l'éq. (1) tels que $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^t, \dots, \mathbf{y}_A^t]^t$ (nous avons vectorisé la transposée de la matrice \mathbf{Y} présentées dans (1)). Les vecteurs \mathbf{c}_n and \mathbf{z} conservent leur forme : $\mathbf{c}_n \in \mathbb{C}^M$ est l'un des codes, $\mathbf{z} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \mathbf{I}_{AM})$ et $\mathbf{h}_n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \mathbf{I}_A) \forall n \in \underline{\Omega}$.

3 Détecteur optimal

Nous voulons minimiser l'erreur de détection i.e. $P[\underline{\Omega} \neq \hat{\Omega}]$ où $\hat{\Omega}$ est le sous-ensemble détecté et $\underline{\Omega}$ est le vrai sous-ensemble de nœuds actifs. Ainsi, avec Ψ l'ensemble de tous les sous-ensembles de nœuds possibles Ω , nous avons :

$$\begin{aligned} \hat{\Omega} &= \arg \max_{\Omega \in \Psi} p(\Omega | \mathbf{y}) \\ &\stackrel{(i)}{=} \arg \max_{\Omega \in \Psi} p(\mathbf{y} | \Omega) \end{aligned} \quad (5)$$

où (i) est valide sous l'hypothèse d'une distribution uniforme des sous-ensembles sur Ψ .

Soit \mathbf{C}_{Ω} , la matrice des codes des utilisateurs de Ω :

$$\mathbf{C}_{\Omega} = [\mathbf{c}_1; \cdots; \mathbf{c}_n; \cdots \mathbf{c}_N] \quad (6)$$

avec $n \in \Omega$. Sa décomposition en valeur singulière (SVD) est donnée par $\mathbf{C}_{\Omega} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}$, où $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ sont des matrices unitaires, et $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ est la matrice contenant les

valeurs singulières notées λ_i . Notez que $i \in [1; M]$ et $\lambda_i = 0$ est possible dans le cas $M > N$. Soit $\mathbf{y}_a \in \mathbb{C}^M$ le signal reçu sur l'antenne a et $\sigma_\Omega \in \mathbb{C}^{M \times M}$ la matrice définie par :

$$\sigma_\Omega = \rho \mathbf{C}_\Omega \mathbf{C}_\Omega^H + \mathbf{I}_M \quad (7)$$

et

$$\tilde{\mathbf{y}}_a = \text{diag} \left(\sqrt{\frac{\rho |\lambda_1|^2}{1 + \rho |\lambda_1|^2}}, \dots, \sqrt{\frac{\rho |\lambda_M|^2}{1 + \rho |\lambda_M|^2}} \right) \mathbf{V}^H \mathbf{y}_a \quad (8)$$

Proposition 1. *Le détecteur optimal multi-utilisateurs avec connaissance statistique du canal est donné par :*

$$\hat{\Omega} = \arg \max_{\Omega \in \Psi} \prod_{a=1}^A \frac{1}{(2\pi)^M |\sigma_\Omega|} \exp \left(-\frac{1}{2} (\|\mathbf{y}_a\|_2^2 - \|\tilde{\mathbf{y}}_a\|_2^2) \right) \quad (9)$$

Démonstration. A partir de l'éq.(3), sachant Ω , nous avons :

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \left[\mathbf{I}_A \otimes \mathbf{c}_1 \quad \dots \quad \mathbf{I}_A \otimes \mathbf{c}_n \quad \dots \quad \mathbf{I}_A \otimes \mathbf{c}_N \right] \mathbf{h} + \mathbf{z} \quad (10)$$

où $\mathbf{h} = [h_1^t \dots h_n^t \dots h_N^t]^t$, $n \in \Omega$. Comme \mathbf{h}_n et \mathbf{z} sont Gaussiens, nous avons $\mathbf{y} \sim \mathcal{CN}(0, \Sigma)$ et

$$p(\mathbf{y}|\Omega) = \frac{1}{(2\pi)^{AM} |\Sigma|} \exp \left(-\frac{1}{2} \mathbf{y}^H \Sigma^{-1} \mathbf{y} \right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Sigma &= \mathbb{E} \left[\mathbf{y} \cdot \mathbf{y}^H \right] = \mathbf{I}_A \otimes (\rho \mathbf{V} \Lambda \Lambda^H \mathbf{V}^H + \mathbf{I}_M) \\ &= \mathbf{I}_A \otimes (\rho \mathbf{V} \text{diag}(|\lambda_1|^2, \dots, |\lambda_M|^2) \mathbf{V}^H + \mathbf{I}_M) \end{aligned} \quad (12)$$

Ainsi, le déterminant $|\Sigma|$ et l'inverse de Σ sont respectivement :

$$|\Sigma| = \prod_{a=1}^A |\rho \mathbf{V} \Lambda \Lambda^H \mathbf{V}^H + \mathbf{I}_M| \quad (13)$$

$$\Sigma^{-1} = \mathbf{I}_A \otimes (\mathbf{I}_M - \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}^H) \quad (14)$$

où \mathbf{D} est une matrice diagonale avec les éléments $d_{i,i} = \frac{\rho |\lambda_i|^2}{1 + \rho |\lambda_i|^2}$, $i \in [1, M]$ sur sa diagonale.

Par conséquent, on peut exprimer l'éq.(11) comme le produit de fonction de densité de probabilité du signal reçu sur chaque antenne a :

$$\begin{aligned} p(\mathbf{y}|\Omega) &= \prod_{a=1}^A \frac{1}{(2\pi)^M |\sigma_\Omega|} \exp \left(-\frac{1}{2} \mathbf{y}_a^H (\mathbf{I}_M - \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}^H) \mathbf{y}_a \right) \\ &= \prod_{a=1}^A \frac{1}{(2\pi)^M |\sigma_\Omega|} \exp \left(-\frac{1}{2} (\|\mathbf{y}_a\|_2^2 - \|\tilde{\mathbf{y}}_a\|_2^2) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

□

Ce résultat montre que le détecteur optimal consiste à trouver l'ensemble de codes minimisant la distance cordale quadratique $\|\mathbf{y}_a\|_2^2 - \|\tilde{\mathbf{y}}_a\|_2^2$ entre le sous espace couvert par les colonnes de \mathbf{C}_Ω et le signal observé \mathbf{Y} (voir [10] pour plus de détails). En effet, lorsqu'on regarde (8), il apparaît que $\tilde{\mathbf{y}}_a$ est la projection de \mathbf{y}_a sur le sous-espace couvert par les lignes de \mathbf{V} , qui ne sont rien de plus que les vecteurs singuliers associés au sous-espace du sous-ensemble de codes considéré.

4 Résultats numériques

4.1 Cadre de simulation

Dans cette section, nous présentons des résultats numériques pour la détection multi-utilisateurs. Ces résultats ont été obtenus à partir de l'implémentation du détecteur (9) et sont évalués en termes de taux d'erreur de sous-ensemble de codes (en anglais Codeset Error Rate – CER), i.e. le taux de sous-ensemble détectés tels que $\hat{\Omega} \neq \underline{\Omega}$.

Les résultats sont produits à l'aide de simulations de Monte-Carlo. Elles ont été réalisées pour les paramètres suivants : $\phi = \{10, 20\}$, $M \in \{4, 8, 16\}$ et $A \in \{4, 8\}$. La taille du sous-ensemble de noeuds actifs est distribuée uniformément sur $[1, \phi]$. Deux versions du détecteur sont utilisées. La première est l'implémentation exacte du ML (9), réalisant la recherche exhaustive du sous-ensemble. La deuxième considère N comme connu et réalise une recherche ciblée basée sur le cardinal du sous-ensemble actif. Le détecteur It-ML est également considéré avec les mêmes caractéristiques de décodage. Pour chaque couple de longueur de code possible M et de nombre d'antennes A , un nouveau dictionnaire est généré.

Le CER de l'algorithme Itératif-ML (It-ML) [9] est également donné comme référence puisqu'il prend en compte une connaissance parfaite du canal. Cet algorithme est une approximation du maximum de vraisemblance du fait d'une détection itérative réalisée par accumulation de la détection des noeuds (un de plus à chaque itération). Il considère les noeuds détectés à l'itération précédente comme étant connus pour la prochaine itération.

L'identification des noeuds est réalisée, quelle que soit la stratégie de détection adoptée, avec des codes Gaussiens dont voici une brève description de leur génération. Pour chaque noeud, son code d'identification est un vecteur aléatoire complexe tiré suivant une loi Gaussienne centrée de matrice de covariance \mathbf{I}_M .

4.2 Analyse des résultats

Les résultats de la détection multi-utilisateurs sont donnés dans la Fig. 1.

Les courbes en trait plein (resp. en tiret) représentent les cas où $N = 10$ (resp. $N = 20$). Comme attendu, l'augmentation du rapport signal à bruit (SNR), du nombre d'antennes A et/ou de la longueur de code M améliore la fiabilité. Cependant, augmenter le nombre de degrés de liberté via M a un effet plus important sur les performances que A . La comparaison avec le décodage It-ML et le ML pour une stratégie de recherche ciblée démontre le coût de la coordination fortement restreinte des noeuds avec la station de base, via la perte significative en terme de CER.

Nous comparons maintenant l'effet d'une recherche exhaustive à une recherche ciblée. Nous observons que pour une longueur de code faible $M \in \{4, 8\}$, l'information du nombre d'utilisateur actifs aide peu à la détection du bon sous-ensemble actif. À l'inverse, pour $M = 16$ une réduction considérable du

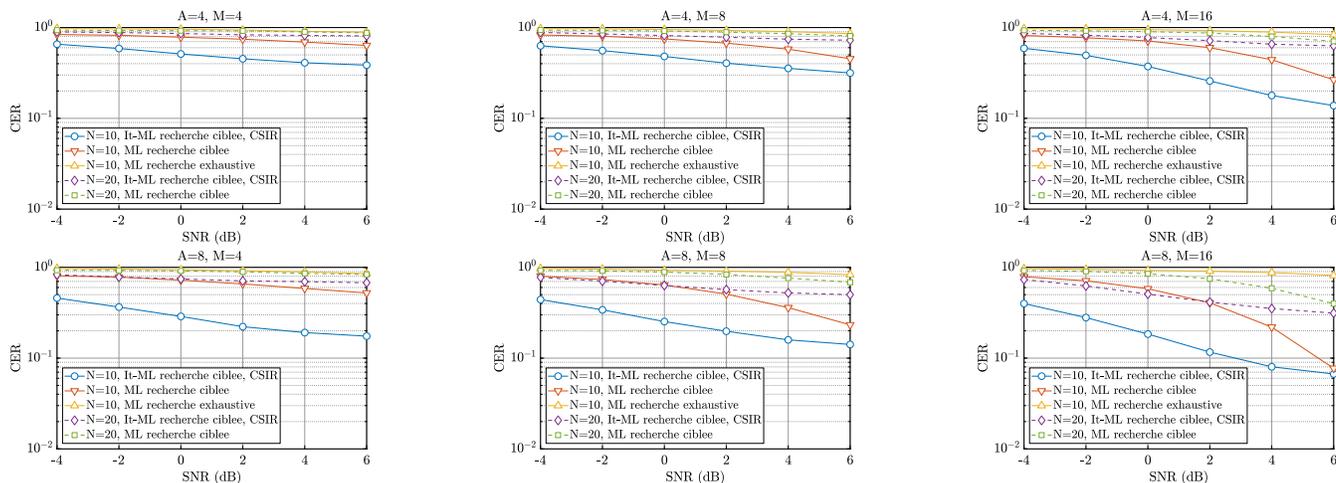


FIGURE 1 – CER de la détection multi-utilisateurs

CER est obtenue. Par conséquent, la connaissance de N n'est pas compensée par l'augmentation de M . De plus, en prenant en compte la complexité du détecteur optimal (9) et la latence introduite par la longueur de code, l'estimation du nombre de noeuds actifs apporterait un gain de performance notable tout en réduisant les besoins en puissance de calcul.

5 Conclusion

Cet article propose un détecteur optimal multi-utilisateurs pour accès aléatoire avec codage NOMA, dans le cadre d'une connaissance statistique du canal à la réception. La définition du détecteur optimal et les résultats de ses performances sont donnés pour le cas général avec de multiples utilisateurs et une station de base à antennes multiples. Par ailleurs, le détecteur développé montre que la distance cordale est une métrique valable pour la détection d'ensembles de codes. L'article fournit de plus une vision globale aussi bien de l'impact des différents paramètres du système (par exemple : SNR, longueur des codes, nombre d'antennes) et leurs compromis pertinents pour l'URLLC, que des différentes stratégies de détection (ciblée / exhaustive). Du fait de la perte de performance due à la restriction de la connaissance du canal à sa seule statistique, il semble intéressant de développer de nouveaux algorithmes, éventuellement sous optimaux, et permettant par exemple de combiner une diminution de la complexité du calcul de détection avec une estimation du nombre d'utilisateurs actifs. De plus, élargir le modèle et le détecteur en intégrant une transmission de données est crucial pour répondre aux besoins du contexte de communications massives entre machines.

Références

- [1] J. SACHS et al. « Adaptive 5G Low-Latency Communication for Tactile Internet Services ». In : *Proceedings of the IEEE* 107.2 (fév. 2019), p. 325–349.
- [2] G. DURISI, T. KOCH et P. POPOVSKI. « Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets ». In : *Proceedings of the IEEE* 104.9 (2016), p. 1711–1726.
- [3] C. GOURSAUD et J. M. GORCE. « Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges ». In : *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things* 1.1 (oct. 2015), p. 150597. URL : <http://eudl.eu/doi/10.4108/eai.26-10-2015.150597>.
- [4] C. BOCKELMANN et al. « Towards Massive Connectivity Support for Scalable mMTC Communications in 5G Networks ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 28969–28992.
- [5] 3GPP. *Further NB-IoT enhancements (RP-171428)*. 2017.
- [6] A.K. FLETCHER, S. RANGAN et V.K. GOYAL. « On-Off Random Access Channels : A Compressed Sensing Framework ». <https://arxiv.org/pdf/0903.1022v2.pdf>. 2009.
- [7] M. ALAM et Q. ZHANG. « A Survey : Non-Orthogonal Multiple Access with Compressed Sensing Multiuser Detection for mMTC ». Oct. 2018. URL : <http://arxiv.org/abs/1810.05422>.
- [8] R. XIE et al. « Many Access for Small Packets Based on Precoding and Sparsity-Aware Recovery ». In : *IEEE Trans. on Communications* 64.11 (nov. 2016), p. 4680–4694. ISSN : 0090-6778. DOI : 10.1109/TCOMM.2016.2605094.
- [9] D. DUCHEMIN, J.-M. GORCE et C. GOURSAUD. « Low complexity Detector for massive uplink random access with NOMA in IoT LPWA networks ». In : *to appear in 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Marrakech, Morocco)*. 2019.
- [10] J. H. CONWAY, R. H. HARDIN et N. J. A. SLOANE. « Packing Lines, Planes, etc. : Packings in Grassmannian Space ». In : (31 juil. 2002). URL : <http://arxiv.org/abs/math/0208004> (visité le 11/02/2019).