

# Contrôle de fiabilité dans les réseaux IoT avec un mélange d'exponentielles comme modèle d'interférence.

Mamadou NGOM<sup>1</sup> Laurent CLAVIER<sup>1,2</sup> Malcolm EGAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, Centre for Digital Systems, F-59000 Lille, France

<sup>2</sup>Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 -IEMN -Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille, France,

<sup>3</sup>Univ Lyon, INSA Lyon, INRIA, CITI, 69621 Villeurbanne, France

Correspondence : Mamadou Ngom (email : mamadou.ngom@imt-nord-europe.fr)

**Résumé** – Dans un contexte de faible latence et de forte densité d'objets connectés, assurer une coordination globale du système n'est pas réaliste. Dans ces conditions, l'interférence peut varier de façon très significative d'un paquet à un autre. Nous proposons une méthode pour choisir un schéma de communication robuste dans ce type d'environnement. Pour cela, nous modélisons l'interférence par un mélange d'exponentielles. Pour fiabiliser l'estimation des paramètres du mélange, nous utilisons une méthode de *bootstrap*. Ceci nous permet de choisir les paramètres de la transmission afin d'assurer une probabilité de succès sur les paquets transmis.

**Abstract** – In a context of low latency and high density of connected objects, ensuring global system coordination is not realistic. Under these conditions, the interference can vary significantly from one packet to another. We propose a method to choose a robust communication scheme in this type of environment. For this purpose, we model the interference by a mixture of exponentials. To ensure the reliability of the estimation of the mixture parameters, we use a bootstrap method. This allows us to choose the parameters of the transmission in order to ensure a probability of success on the transmitted packets.

## 1 Introduction

L'un des objectifs des réseaux 5G est de supporter une faible latence malgré une forte densité d'appareils. Il est difficile de résoudre cette conjonction d'exigences. La faible latence et le grand nombre d'appareils rendent difficile, voire impossible, une coordination efficace entre l'ensemble des appareils du réseau. Cela limite les capacités à partager des informations précises sur l'état du canal. La conséquence d'une coordination imparfaite est le niveau d'interférence. Qui plus est, pour adresser un grand nombre d'objets, l'accès multiple non orthogonal est souhaitable mais amplifie cet effet négatif.

Sans savoir *a priori* le niveau d'interférence qui sera présent lors de la transmission d'un paquet, il est pourtant important de choisir le schéma de modulation et de codage le mieux adapté pour l'émetteur. Notre objectif est de garantir une probabilité de succès sur les prochains paquets qui seront transmis. Le rapport signal sur bruit plus interférence (SINR, *signal to interference plus noise ratio*) sera le critère utilisé pour garantir un succès. Pour garantir ce SINR au niveau du récepteur, une bonne connaissance de la distribution des interférences est indispensable.

Ce papier s'articule autour de deux contributions : (a) la modélisation des interférences et (b) l'estimation de la qualité minimale du lien à satisfaire pour garantir la probabilité de succès visée. Il est organisé comme suit : la section 2 décrit le système étudié et présente les hypothèses utilisées. L'état de l'art sur la modélisation des interférences est présenté dans la section 3.1. La section 3.2 présente le modèle de mélange exponentiel et l'estimation de ses paramètres. Un algorithme de *bootstrap* est proposé pour évaluer la qualité du lien et

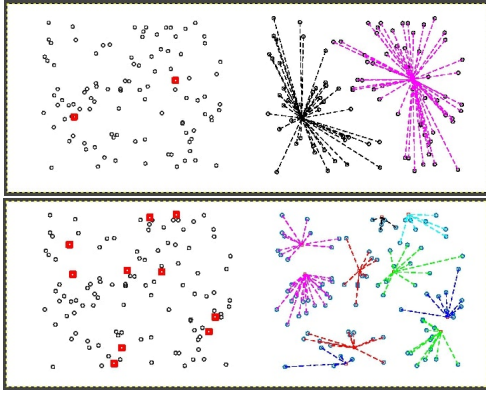
choisir le schéma de modulation et de codage permettant de garantir la bonne communication. La section 4 présente les résultats obtenus.

## 2 Système étudié

Dans de nombreuses applications des objets connectés, des communications à intervalles réguliers ne se justifient pas et des communications sporadiques, initiées quand un événement particulier se produit, sont plus appropriées. Garantir un degré de fiabilité dans un environnement radio dense en émetteurs est alors extrêmement difficile, d'autant plus dans un environnement où l'interférence est hautement variable et difficile à prédire. Qui plus est, si des contraintes de délais sont également imposées, il n'est pas envisageable de coordonner tous les émetteurs.

Plutôt que les réseaux en étoile de type LP-WAN souvent mis en œuvre aujourd'hui (haut de la Fig. 1), pour permettre les latences contrôlées il est plus approprié d'organiser un ensemble de sous-réseaux plus petits (bas de la Fig. 1). C'est une solution appelée "in-X" subnetworks [1] dans le cadre de l'industrie. Chaque sous réseau coordonne ses communications pour gérer les délais et les interférences. Cependant deux sous réseaux ne sont pas coordonnés entre eux. Comme ils accèdent aux mêmes ressources, ils génèrent une interférence entre sous réseaux.

Chaque sous réseau coordonne ses communications. Cependant il n'existe pas de coordination entre les différents réseaux qui utilisent pourtant les mêmes ressources. Un utilisateur (Signal utile sur la Fig. 2) va donc accéder en fonction de ses besoins à certains blocs de ressource.

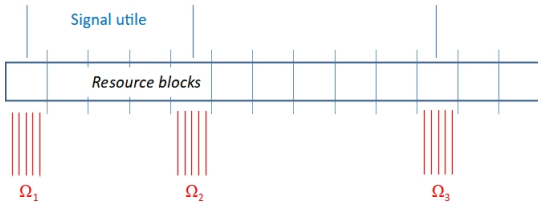


**FIGURE 1** : Configuration des réseaux. Les schémas de gauche représentent les objets (ronds noirs) et les points d'accès (carrés rouges). Les schémas de droites sont les mêmes où sont ajoutés les liens connectant un objet à son point d'accès. Haut : Massive Machine-Type Communications — seulement deux points d'accès sont présents ; bas : Ultra-reliable Low-Latency Communication — de plus petits sous-réseaux sont créés.

Certains utilisateurs d'autres sous-réseaux accéderont simultanément à ce même bloc de ressource, générant de l'interférence :

$$I = \sum_{i \in \Omega_k} l(d_i) \cdot Q_i, \quad (1)$$

où  $d_i$  est la distance entre l'interférént  $i$  et le récepteur étudié,  $l(d)$  est l'atténuation du canal, fonction de la distance ; un exemple classique de modèle est  $l_{\gamma, \epsilon}(d) = d^{-\gamma} \mathbb{1}_{d \geq \epsilon}(d)$ ,  $d \in \mathbb{R}^+$  où  $\gamma$  est le coefficient d'atténuation du canal ;  $\epsilon$  une zone sans interférént (aucun interférént ne peut être à une distance inférieure à  $\epsilon$  du récepteur :  $\mathbb{1}_{d \geq \epsilon}(d) = 1$  si  $d \geq \epsilon$  et 0 ailleurs) ;  $Q_i$  inclue les effets de propagation (multitrajets, *shadowing*) et les caractéristiques de la couche physique ;  $\Omega_k$  est l'ensemble des interférénts sur la ressource  $k$ .



**FIGURE 2** : Génération de l'interférence. L'utilisateur désiré accède à trois blocs de ressources différents. Des autres réseaux proviennent des signaux interférant. L'ensemble des interférénts est différent sur chaque bloc.

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- $\Omega_k$  est constant sur un bloc de ressource. Ce bloc correspond à la transmission d'un paquet. Cela signifie en particulier que la somme bruit plus interférence est un processus Gaussien sur un paquet même s'il a un comportement impulsif sur du long terme comme le montre l'état de l'art de la section 3.1.
- Sur deux blocs différents ;  $\Omega_k$  et  $\Omega_j$  sont indépendants. Cela signifie en particulier que la variance de l'interférence sera différente d'un paquet à l'autre.
- La transmission d'un paquet sera considérée comme un succès si la rapport signal (S) sur bruit (N) plus interférence est supérieur à un seuil ( $\tau$ ) :  $S/(I+N) > \tau$ .

Chaque émetteur vise alors à garantir un taux de succès (T) :

$$\mathbb{P}(S/(I+N) > \tau) \geq T. \quad (2)$$

## 3 Modélisation d'interférences

### 3.1 État de l'art

La spécification de la fonction de densité de probabilité du signal interférant est une question importante, par exemple lorsqu'il s'agit de calculer le maximum de vraisemblance pour concevoir un récepteur optimal. Il a été démontré que le terme d'interférence n'est pas modélisé de manière adéquate par une distribution gaussienne.

La première contribution majeure est celle de Middleton [13] qui a obtenu des expressions assez générales sous forme de séries en supposant des sources d'interférence distribuées selon un processus de Poisson. Ce modèle populaire reste cependant difficile à utiliser en raison des sommes infinies. Certaines approximations ont été proposées en considérant les termes prépondérants (mélange de gaussiennes [10],  $\epsilon$ -contaminé [2] quand seulement deux termes sont considérés). Dans des scénarios plus spécifiques, comme les communications à bande ultra-large, des distributions ont été proposées de façon empirique, justifiées par des simulations, des observations de la densité de probabilité estimée et/ou des gains en termes de taux d'erreur binaire : mélange Normal-Laplace [4], gaussienne généralisée [8], mélange cauchy-gaussien [12]. Une autre classe de modèles fréquemment utilisée est le modèle  $\alpha$ -stable, trouvant sa source dans la distribution spatiale des interférénts [15].

Dans le cadre de la puissance de l'interférence, une étude détaillée a été réalisée par [11]. Dans le cas d'interfénts distribués selon un processus ponctuel de Poisson homogène, dans un réseau à rayon infini et sans zone de garde, [15], la puissance interférente suit distribution  $\alpha$ -stable totalement asymétrique ( $\beta = 1$ ), le paramètre  $\alpha$  ne dépend que du coefficient d'atténuation du canal et la dispersion  $\delta$  des autres caractéristiques du réseau (densité d'interfénts, évanouissements du canal radio, couche physique). Deux travaux expérimentaux récents ont confirmé la nature impulsive de l'interférence : dans les bandes ISM [6] et dans les réseaux cellulaires 4G en contexte véhiculaire [3].

Pour traduire l'impulsivité du modèle nous proposons d'utiliser un mélange d'exponentiel. Le mélange a la capacité de représenter le comportement de la queue lourde obtenue théoriquement et expérimentalement (l'apparition rare de grandes valeurs). Ce choix permet une dérivation analytique plus facile et la possibilité de proposer des solutions pratiques pour la conception des liens de communication.

### 3.2 Modèle de mélange d'exponentielles (MME)

Pour modéliser l'interférence nous considérons que sur un bloc de ressource (voir Fig. 2) l'ensemble des interférénts  $\Omega_i$  est constant. L'interférence, résultante de la somme des contributions de ces interférénts, peut alors être modélisée par une distribution gaussienne. La puissance de l'interférence est alors modélisée par une loi exponentielle. La densité de

probabilité d'une loi exponentielle de paramètre  $a > 0$  est donnée par :

$$f(x; a) = a \exp(-ax), x \geq 0. \quad (3)$$

Comme l'ensemble des interférents  $\Omega_i$  varie d'un paquet transmis à l'autre, le paramètre de la loi exponentielle variera d'un paquet à l'autre. La distribution résultante sera en conséquence un mélange d'exponentielles (MME), dont la densité de probabilité peut être exprimée sous la forme :

$$f_Y(y) = \sum_{i=1}^N \pi_i f(y; a_i), \quad (4)$$

où les paramètres des composantes sont données par  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N)$  et les poids respectifs par  $\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \dots, \pi_N) \in \mathbb{R}_+^N$ , tel que  $\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$ . Ce modèle a été traité en détail dans [9].

Le mélange d'exponentielles s'adapte naturellement à la configuration des sous-réseaux "in-X". La politique d'accès, basée uniquement sur la connaissance d'un seul sous-réseau et ne tenant pas compte des autres, génère des groupes d'interférents qui seront modifiés à chaque transmission. Le mélange résultant pourra comporter un nombre limité de composantes, ces composantes dépendant en particulier de la proximité de l'activité des interférents les plus proches présents au moment de la transmission. Dans la suite nous limiterons les distributions à trois composantes.

### 3.3 L'algorithme Expectation - Maximization

Il est crucial dans la conception d'une liaison de communication sans fil de pouvoir estimer les paramètres de la distribution d'interférence. Un modèle EMM peut être considéré comme un modèle de variables latentes [5] dont les paramètres  $\boldsymbol{\pi}$ ,  $\mathbf{a}$  peuvent être estimés à l'aide de l'algorithme Expectation - Maximization (EM) [14], dont le pseudo-code adapté à notre contexte est présenté dans l'algorithme 1.

---

#### Algorithm 1 EM POUR MME

---

**Initialize :**  $a_i^0, \pi_i^0, i = 1, \dots, N, p = 0$

**while** not converged **do**

E-step :

$$\varphi_i(\pi^p, a^p, y_j) = \frac{\pi_i^p a_i^p \exp(-a_i^p y_j)}{\sum_{k=1}^N \pi_k^p a_k^p \exp(-a_k^p y_j)}$$

M-step :

$$\pi_i^{p+1} = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_i(a^p, \pi^p, y_j)}{n}$$

$$a_i^{p+1} = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_i(\pi^p, a^p, y_j)}{\sum_{j=1}^n y_j \varphi_i(\pi^p, a^p, y_j)}$$

$p \rightarrow p + 1$

**end while**

**return**  $a^{p-1}, \pi^{p-1}$

---

### 3.4 Estimation de quantiles : Bootstrap

Pour garantir la bonne réception des paquets transmis, nous devons vérifier (2). Nous supposons connue  $S$  (l'atténuation

du canal et la puissance d'émission sont supposées connues) et  $N$ , le niveau de bruit du récepteur. Pour connaître la qualité de lien, il nous reste donc à déterminer  $I$ , la puissance de l'interférence. Or celle-ci n'est pas prédictible d'un paquet à un autre. Nous devons donc choisir un schéma de modulation et de codage qui nous assurera un taux de succès cible  $T$  et pour cela nous recherchons le seuil  $\tau$  qui nous permettra de fixer le schéma de transmission qui doit assurer un bon fonctionnement au seuil obtenu.

Vérifier (2) revient en fait à déterminer le seuil  $x_T$  tel que  $\mathbb{P}(I \leq x_T) = T$ . Si nous connaissons les paramètres du MME, le seuil cible  $x_T$  peut être obtenu en résolvant  $\sum_{\ell=1}^R \pi_\ell \exp(-a_\ell x_T) = 1 - T$ . Toutefois, les estimations des paramètres  $\mathbf{a}$ ,  $\boldsymbol{\pi}$  sont inexactes et il est souhaitable d'évaluer l'intervalle de confiance et de conforter son estimation pour une meilleure garantie de performance.

Notons  $1 - \alpha$  le niveau de confiance souhaité,  $x_T$  le vrai seuil (inconnu) et  $\hat{x}_T$  le seuil estimé. Nous souhaitons assurer que  $\mathbb{P}(x_T - \hat{x}_T > z) \leq 1 - \alpha$ . La solution  $z$  correspond à l'excès qui devrait être incorporé dans l'estimation de  $x_T$ . En d'autres termes, le seuil approprié est donné par  $\tau' = \hat{x}_T + z$ . Nous pouvons considérer  $\hat{x}_T$  comme une estimation du seuil souhaité. Un intervalle de confiance peut être estimé par des méthodes de bootstrap [7].

Le bootstrap est basé sur le prélèvement de plusieurs échantillons avec remise à partir d'un échantillon unique. Ces échantillons répétés sont appelés des ré-échantillonnages ( $K$ ). La solution mise en œuvre est présentée dans l'algorithme 2.

---

#### Algorithm 2 Bootstrap

---

**Initialize :**  $D = A$  set of samples of the EMM.

Find  $\hat{x}_T$  such that :

$$\sum_{l=1}^R \pi_l \exp(-a_l \hat{x}_T) = 1 - T.$$

**for**  $i = 1$  **to**  $p \in \mathbb{N}$  **do**

Draw  $p$  sets of samples ( $K_1, K_2 \dots K_p$ ) from  $D$ . This yields new estimates :  $\hat{x}_T^1, \hat{x}_T^2 \dots \hat{x}_T^p$ .

$$\Delta^i = \hat{x}_T^i - \hat{x}_T.$$

**end for**

Select the smallest  $z$  such that :

$$\mathbb{P}(\Delta^i > z) \leq 1 - \alpha \iff \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbb{I}_{\{\Delta^i > z\}} \leq 1 - \alpha.$$

**return**  $\tau' = \hat{x}_T + z$ .

---

## 4 Résultats et conclusion

La procédure proposée est la suivante :

- Le point d'accès écoute l'environnement pendant une durée  $T_D$  donnée ce qui lui permet de récolter  $n_D$  échantillons de puissance de bruit.
- Il estime  $\mathbf{a}$  et  $\boldsymbol{\pi}$  (algorithme 1), calcule le seuil  $\hat{x}_T$  et améliore l'estimation par la procédure de *bootstrap* (algorithme 2).
- Il transmet à l'émetteur le seuil  $x_T$  (seule transmission nécessaire dans le lien descendant).

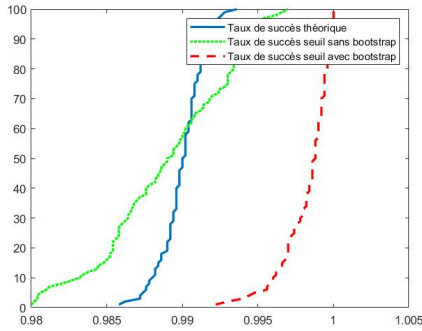


FIGURE 3 : Taux de succès (théorique, avec et sans bootstrap) de la transmission d'un paquet ( $n_D = 500$  et  $n_K = 100$ )

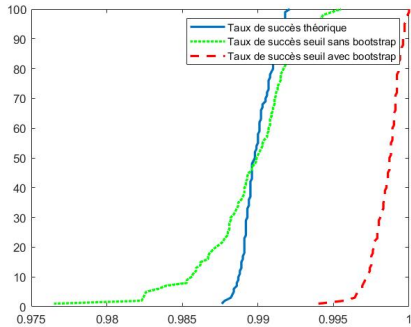


FIGURE 4 : Taux de succès (théorique, avec et sans bootstrap) de la transmission d'un paquet ( $n_D = 1000$  et  $n_K = 100$ )

- L'émetteur choisit son schéma de modulation et de codage qui lui permettra de garantir le SINR cible et donc la qualité de service requise.

Dans les simulations nous utilisons  $n_D = 500$  ou  $1000$  comme le nombre d'échantillons de  $D$  et  $n_K = 100$  comme le nombre d'échantillons de chaque ré-échantillonnage  $K_i, \forall i = 1 \dots p \in \mathbb{N}$ , pour le bootstrap. On choisit une probabilité de succès  $T = 0.99$ . Pour calculer la probabilité de succès représentée sur la Fig. 3, nous déterminons sur 1000 réalisations le nombre de paquets où la puissance interférente est inférieure respectivement à  $x_T$  (supposant connus les paramètres de la distribution de l'interférence),  $\hat{x}_T$  (le seuil estimé sans bootstrap) et  $\tau'$  (le seuil estimé avec le bootstrap). Ce qui représente en quelque sorte le taux de succès de la transmission du paquet.

La méthode proposée permet d'atteindre les objectifs posés : la probabilité de succès est bien supérieure à la probabilité cible, ce qui n'est pas le cas avec les paramètres estimés et ne le serait pas non plus avec les paramètres théoriques. L'incertitude due à des distributions d'interférence très variables est donc bien prise en compte par la méthode de bootstrap qui semble donc tout à fait pertinente dans le cadre d'une interférence impulsive.

La méthode proposée permet avec un échange d'information réduit de tenir compte des propriétés statistiques de l'interférence et de garantir une probabilité de succès cible. C'est un élément crucial dans des communications requérant de la fiabilité dans des délais maîtrisés. Qui plus est, le point d'accès est en écoute permanente et peut régulièrement réviser les paramètres du modèle et le seuil transmis à l'émetteur pour prendre en compte l'évolution temporel de l'environnement. Il demeure beaucoup de pistes d'optimisation du système proposé et il est important pour les perspectives de ce travail de

lier le gain de fiabilité à la perte de débit utile.

**Remerciements** Ce travail a été effectué dans le cadre du projet Beyond5G, financé par le gouvernement dans le cadre du plan de Relance "France Relance" et du Programme d'investissements d'avenir.

## Références

- [1] Ramoni ADEOGUN, Gilberto BERARDINELLI, Preben E MORGENSEN, Ignacio RODRIGUEZ et Mohammad RAZZAGHPOUR : Towards 6g in-x subnetworks with sub-millisecond communication cycles and extreme reliability. *IEEE Access*, 8:110172–110188, 2020.
- [2] O. ALHUSSEIN, I. AHMED, J. LIANG et S. MUHAIDAT : Unified analysis of diversity reception in the presence of impulsive noise. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2):1408–1417, février 2017.
- [3] Mahin K. ATIQ, Udo SCHILCHER, Xhemal PENGILI, Martin HAENGGI et Christian BETTSTETTER : Burstiness of interference pikes in wireless networks. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 4:293–309, 2023.
- [4] N.C. BEAULIEU et S. NIRANJAYAN : UWB receiver designs based on a gaussian-laplacian noise-plus-MAI model. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 58(3):997–1006, mars 2010.
- [5] George CASELLA, Christian P ROBERT et Martin T WELLS : Mixture models, latent variables and partitioned importance sampling. *Statistical Methodology*, 1(1-2):1–18, 2004.
- [6] Laurent CLAVIER, Troels PEDERSEN, Ignacio LARRAD, Mads LAURIDSEN et Malcolm EGAN : Experimental evidence for heavy tailed interference in the iot. *IEEE Communications Letters*, 25(3):692–695, 2020.
- [7] Anthony Christopher DAVISON et David Victor HINKLEY : *Bootstrap methods and their application*. Numéro 1. Cambridge university press, 1997.
- [8] J. FIORINA : A simple IR-UWB receiver adapted to Multi-User Interferences. In *IEEE Global Telecommunications Conf., GLOBECOM 2006*, pages 1–4, novembre 2006.
- [9] Marie-Anne GRUET, Anne PHILIPPE et Christian P ROBERT : Mcmc control spreadsheets for exponential mixture estimation. *Journal of Computational and graphical Statistics*, 8(2):298–317, 1999.
- [10] N. GUNEY, H. DELIÇ et M. KOCA : Robust detection of ultra-wideband signals in non-gaussian noise. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(4):1724–1730, juin 2006.
- [11] M. HAENGGI et R.K. GANTI : Interference in large wireless networks. *Foundations and Trends in Networking*, 3(2):127–248, 2009.
- [12] Z. MEI, M. JOHNSTON, S. Le GOFF et L. CHEN : Performance analysis of ldpc-coded diversity combining on rayleigh fading channels with impulsive noise. *IEEE Transactions on Communications*, 65(6):2345–2356, June 2017.
- [13] D. MIDDLETON : Statistical-physical models of electromagnetic interference. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 19(3):106–127, 1977.
- [14] Yueyang TENG et Tie ZHANG : The em algorithm for generalized exponential mixture model. In *2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, pages 1–4. IEEE, 2010.
- [15] M.Z. WIN, P.C. PINTO et L.A. SHEPP : A mathematical theory of network interference and its applications. *Proc. IEEE*, 97(2): 205–230, février 2009.