



**HAL**  
open science

# Taux de réception en LoRaWAN et temporalité des arrivées : pouvez-vous parler moins fort et répéter ?

Martin Heusse, Christelle Caillouet, Andrzej Duda

## ► To cite this version:

Martin Heusse, Christelle Caillouet, Andrzej Duda. Taux de réception en LoRaWAN et temporalité des arrivées : pouvez-vous parler moins fort et répéter ?. CORES 2022 – 7ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, May 2022, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, France. hal-03657345

**HAL Id: hal-03657345**

**<https://hal.science/hal-03657345v1>**

Submitted on 2 May 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Taux de réception en LoRaWAN et temporalité des arrivées : pouvez-vous parler moins fort et répéter ?

Martin Heusse<sup>1</sup>, Christelle Caillouet<sup>2</sup> et Andrzej Duda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, Grenoble, France

<sup>2</sup> Université Côte d'Azur, I3S, CNRS, Inria, Sophia Antipolis, France

---

Cet article présente un modèle de l'accès Aloha dans LoRaWAN qui prend en compte la temporalité des arrivées des trames. Nous en tirons trois premières observations concernant l'amélioration du taux de réception. D'abord, bien que cela augmente la charge présentée, répéter les trames est le plus souvent bénéfique; ensuite, ne pas se restreindre à SF7 pour les nœuds proches permet d'augmenter la portée de la cellule; enfin, dans ce modèle, réduire la puissance de réception peut avoir un impact positif sur la capacité du réseau.

**Mots-clés :** Aloha, LPWAN, LoRaWAN

---

## 1 Introduction

La plus grande partie des modèles de LoRaWAN ne prennent pas en compte les moments d'arrivée des interférences [GR17, HSAL<sup>+</sup>18]. À l'inverse, le modèle présenté ci-dessous distingue les interférences pré-existantes au moment de la réception d'une trame, des interférences qui suivent. Les premières peuvent nuire à la synchronisation du récepteur alors que les secondes s'y superposent pour brouiller la réception. L'étude des performances obtenues avec ce modèle plutôt conservateur permet de faire trois observations qui sont présentées à sa suite. D'abord, on retrouve le résultat parfois oublié qu'il est (presque) toujours bénéfique de répéter les trames envoyées, même si à première vue le surcroît de trafic augmente les collisions. La seconde observation est qu'à partir du moment où la densité de nœuds n'est pas faible — et que les collisions causent des pertes avec une intensité similaire à l'atténuation —, alors l'ajout d'un SF6, modulation moins robuste, permet d'augmenter la portée de la cellule. La dernière observation est qu'avec ce modèle, la capacité du réseau augmente avec la distance ou en diminuant la puissance de transmission des nœuds, une tendance rarement rencontrée.

## 2 Modèle de la réception LoRaWAN

Ce modèle se concentre uniquement sur les transmissions LoRaWAN sans acquittement. L'accès est Aloha (*unslotted*), et on suppose que les arrivées suivent un processus de Poisson. Deux conditions décident de la réception d'une trame : d'une part, il faut que la puissance reçue soit suffisante pour dominer le bruit thermique et d'autre part, en cas de collision, il faut avoir assez de marge de puissance vis à vis des trames concurrentes.

En supposant que le canal radio est multitrajet [CHT21, AHTD19], le gain en puissance suit alors une loi exponentielle et la condition pour surmonter le bruit thermique est vérifiée avec une probabilité  $H = e^{-g_j}$  [GR17], où  $g_j = \frac{\mathcal{N} q_j}{P_t g(d)}$ , avec  $\mathcal{N}$  la puissance du bruit thermique dans la bande,  $P_t$  la puissance de transmission,  $q_j$  la sensibilité pour le SF $j$  et  $g(d)$  l'atténuation moyenne à la distance  $d$ , qui suit typiquement le modèle Okumura-Hata (possiblement avec une mise à l'échelle de  $d$  pour rendre compte des phénomènes de masquage [SLN17]).

Pour ce qui est d'avoir une marge suffisante par rapport aux interférences, ce modèle distingue 2 cas, illustrés en figure 1.

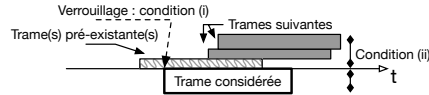


FIGURE 1: La présence d'une transmission antérieure peut gêner la synchronisation sur une nouvelle trame

- (i) Toute trame qui précède la transmission considérée pourra empêcher sa réception, car les puces SX1301<sup>†</sup> ne sont pas capables de se verrouiller sur une transmission de même SF et même fréquence qu'une réception en cours. On supposera donc que si une trame trouve le canal occupé par des transmissions dont la puissance cumulée est comparable à la sensibilité du récepteur, c'est à dire au moins  $\alpha q_j$ , alors elle est perdue. Avec ce modèle, on sous-estime le taux de réception, car si le récepteur n'est verrouillé sur aucune trame pré-existante, alors elles ne sont pas gênantes.
- (ii) La réception d'une trame considérée est réussie si la somme des puissances des trames en interférence, y compris de celles qui précèdent, est inférieure à la sienne par un facteur  $\xi$ .

Sachant que la densité de probabilité de la somme de  $N$  variable aléatoire  $\exp(1)$  est  $f_{\Sigma}(N, x) = \frac{e^{-x} x^{N-1}}{(N-1)!}$ , la probabilité de rencontrer une puissance inférieure à  $\alpha q_j$  lorsque  $N$  trames sont présentes, pour vérifier la condition (i), est celle d'avoir une somme de  $N$  gains  $\exp(1)$  inférieure à  $\alpha g_j$  ( $\alpha = 0.5$ , dans la suite) :

$$p_L(N) = \int_0^{\alpha g_j} f_{\Sigma}(N, x) dx = \frac{\gamma(N, \alpha g_j)}{(N-1)!}. \quad (1)$$

Quand cette condition est vérifiée, on peut faire l'hypothèse simplificatrice (conservatrice également pour le taux de réception) que la puissance des interférences pré-existantes au moment du début la réception d'une trame vaut  $\alpha q_j$  pour toute la durée de la réception (alors qu'elle peut être inférieure et diminuer quand les transmissions correspondantes prennent fin). Avec cette simplification, si  $N$  trames viennent se sur-ajouter, elles se superposent toutes et la probabilité de vérifier la condition (ii) est la probabilité de dominer d'un facteur  $\xi$  à la fois la somme des puissances des interférences et le bruit thermique ( $\xi = 1$ , dans la suite) :

$$\begin{aligned} p_i(N, \alpha) &= \int_{\alpha g_j}^{\infty} f_{\Sigma}(N, x - \alpha g_j) \int_{\max(g_j, \xi x)}^{\infty} e^{-y} dy dx \\ &= \frac{1}{(N-1)!} \left[ e^{-g_j} \gamma \left( N, \left( \frac{1}{\xi} - \alpha \right) g_j \right) + \frac{e^{-\xi \alpha g_j}}{(\xi + 1)^N} \Gamma \left( N, (\xi + 1) \left( \frac{1}{\xi} - \alpha \right) g_j \right) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

où  $\gamma(N, x)$  et  $\Gamma(N, x)$  sont les fonctions gamma incomplètes, inférieure et supérieure.

Comme les arrivées suivent un processus de Poisson, les probabilités de rencontrer  $N$  trames durant la durée de transmission d'une trame  $\tau_j$  avec une intensité de génération  $\lambda$  sont connues (avec  $v_j = \lambda \tau_j$ ) et la probabilité de verrouillage en présence d'au moins une trame précédente est :

$$P_L(v_j) = \sum_{N=0}^{\infty} \frac{(v_j)^N}{N!} e^{-v_j} p_L(N+1). \quad (3)$$

D'où on tire  $P_{1+}$ , le taux de réception en présence d'une ou plus trame(s) précédente(s), qui est :

$$P_{1+}(v_j) = P_L(v_j) P_i(v_j), \text{ avec : } P_i(v_j) = e^{-g_j - v_j} + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(v_j)^N}{N!} e^{-v_j} p_i(N, \alpha). \quad (4)$$

À l'inverse, si aucune trame n'est présente en amont d'une réception, la probabilité de succès est :

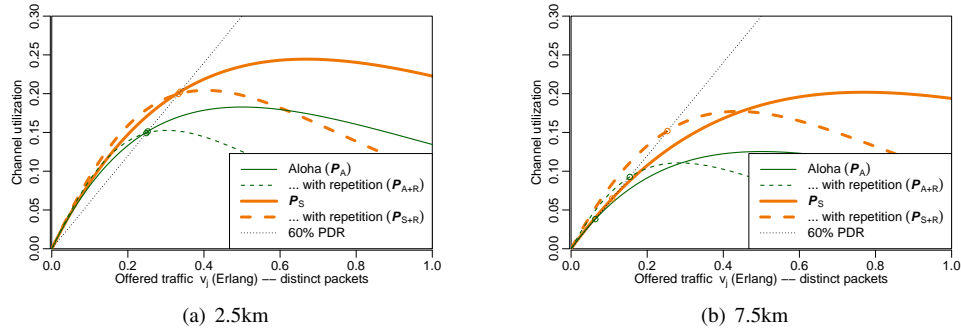
$$P_0(v_j) = e^{-g_j - v_j} + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(v_j)^N}{N!} e^{-v_j} p_i(N, 0). \quad (5)$$

Finalement la probabilité de réception d'une trame dépend des probabilités d'être dans une situation ou l'autre (la probabilité de n'avoir aucune trame en amont d'une transmission est  $e^{-v_j}$ ) :

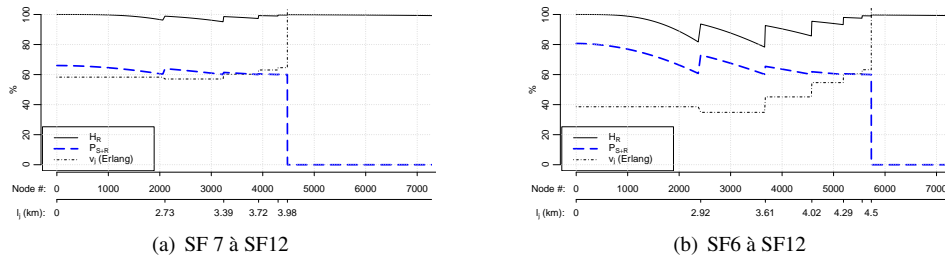
$$P_S(v_j) = e^{-v_j} P_0(v_j) + (1 - e^{-v_j}) P_{1+}(v_j). \quad (6)$$

<sup>†</sup>. Ça n'est pas le cas avec les puces SX1302. Source : Semtech.

## Taux de réception en LoRaWAN et temporalité des arrivées : pouvez-vous parler moins fort et répéter ?



**FIGURE 2:** Utilisation du canal (après dé-duplication), avec et sans répétition, SF12. La charge en abscisse ne tient pas compte des répétitions. La charge limite (et l'utilisation) pour laquelle un taux de succès de 60% reste respecté augmente de 134% avec une répétition (cercles au point d'intersection avec la droite des 60%); l'augmentation est de 141% pour le modèle Aloha simple ( $P_A = H e^{-2v_j}$ ), plus pessimiste que  $P_S$ , en particulier pour des nœuds éloignés.



**FIGURE 3:** Attribution des SF en fonction de la distance, avec et sans SF6, le nombre de nœuds servis à SF12 est infini et le taux de réception est nul.

### 3 Pouvez-vous répéter s'il vous plaît ?

Avec l'accès Aloha, il est raisonnable au premier abord de penser que transmettre plus souvent augmente le trafic, donc augmente les collisions, ce qui diminue la capacité du réseau. En réalité, répéter est presque toujours bénéfique; quand ça ne l'est pas, la différence est marginale. Avec  $R - 1$  répétition(s), le taux de réception des données devient :

$$P_{S+R}(v_j) = 1 - (1 - P_S(R v_j))^R.$$

Considérons la figure 2 : pour un taux de succès visé de 60%, par exemple, répéter est très marginalement contre-productif si tous les nœuds sont proches de la passerelle (figure 2(a)), mais extrêmement bénéfique à 7,5 km, pour SF 12 — sachant que, pour ce SF et à cette distance, 32% des paquets sont perdus du fait seulement de l'atténuation et du bruit thermique pour le modèle considéré.

Pour des charges faibles (et un taux de succès important), dupliquer est toujours bénéfique comme le montre les positions relatives des courbes avec et sans répétition. À l'inverse, il existe toujours une limite de charge au delà de laquelle dupliquer devient contre-productif; cette limite est toujours pour un taux de perte important (de l'ordre de 40% ou plus) et elle recule quand la distance augmente.

### 4 L'ajout de SF6 permet d'améliorer la portée

Dans une cellule LoRaWAN, l'attribution des SF aux différents nœuds doit respecter l'équilibre entre les pertes dues à l'atténuation et la charge présentée, sachant que le passage à un SF supérieur joue sur ces deux aspects dans des directions opposées. Dans une cellule relativement dense, par exemple avec 90 nœuds au  $\text{km}^2$ , il est bien meilleur d'ajouter SF6 à la liste des SF utilisés (SF est un paramètre LoRa normalisé, mais pas dans LoRaWAN) que d'ajouter un hypothétique SF13. la figure 3 illustre ce cas. Pour attribuer les SFs on détermine par dichotomie à quel moment le taux de livraison passe sous 60% avec le premier SF, puis on passe au suivant etc. Pour les deux figures, on utilise systématiquement une répétition et  $H_R = 1 - (1 - H)^2$ .

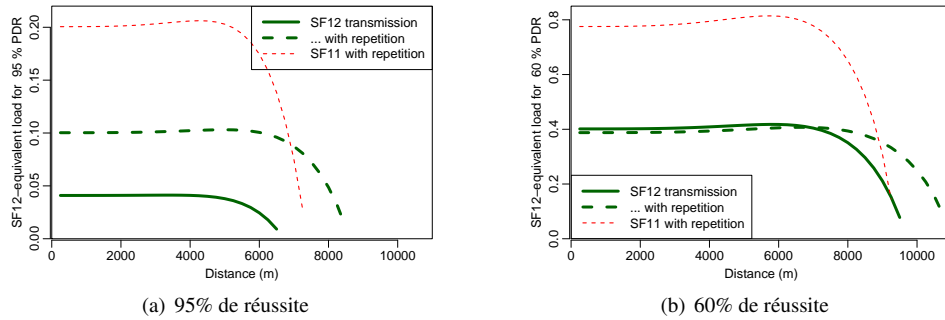


FIGURE 4: Limite de charge pour le taux de réception indiqué, en fonction de la distance

Bien que la couverture par SF6 soit limitée, son utilisation permet de décharger les SF supérieurs, pour finalement couvrir près de 30% de nœuds en plus.

## 5 La capacité du réseau augmente avec la distance

Pour le modèle présenté plus haut, il est notable que la charge pour laquelle un taux de réception donné reste atteignable augmente avec la distance, alors même que plus de trames sont perdues dans le cas d'un trafic faible. On considère ici comme dans la section 3 un ensemble de nœuds tous à la même distance. Cela est dû au fait qu'à une plus grande distance, le récepteur peut rester disponible pour la réception d'une trame alors que le canal est occupé, mais à un niveau de puissance reçue suffisamment faible pour l'ignorer. En figure 4, on observe clairement cette augmentation, avant que la limite de portée de la modulation utilisée ne devienne prééminente. Incidemment, il apparaît clairement que pour une utilisation énergétique voisine, il est préférable de répéter au facteur d'étalement  $X$  plutôt que d'utiliser le SF  $X+1$ .

## 6 Conclusion

La modélisation de LoRaWAN en prenant en compte la temporalité des arrivées réserve des surprises, avec en particulier une augmentation de la capacité quand les pertes dues à l'atténuation augmentent. Ce modèle confirme également le bien fondé d'un certain niveau de redondance en deçà duquel la réception est soit extrêmement peu fiable, soit le trafic très faible. La portée du travail présenté se limite à la passerelle SX1301. Sa remplaçante n'a pas la même limitation : elle permet le verrouillage sur un SF et un canal déjà occupé, ce qui demande de reprendre le modèle et semble augmenter considérablement la capacité [AHD21].

## 7 Remerciements

Ce travail a été en partie financé par les projets ANR : PERSYVAL-Lab avec le contrat ANR-11-LABX-0025-01 et DiNS avec le contrat ANR-19-CE25-0009-01

## Références

- [AHD21] T. Attia, M. Heusse, and A. Duda. Message in Message for Improved LoRaWAN Capacity. In *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, July 2021.
- [AHTD19] T. Attia, M. Heusse, B. Tourancheau, and A. Duda. Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, December 2019.
- [CHT21] U. Coutaud, M. Heusse, and B. Tourancheau. LoRa Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks. *Computers*, 10(4):44, April 2021.
- [GR17] O. Georgiou and U. Raza. Low Power Wide Area Network Analysis : Can LoRa Scale ? *IEEE Wireless Communications Letters*, 6(2), April 2017.
- [HSAL<sup>+</sup>18] A. Hoeller, R. D. Souza, O. L. Alcaraz López, H. Alves, M. de Noronha Neto, and G. Brante. Analysis and Performance Optimization of LoRa Networks With Time and Antenna Diversity. *IEEE Access*, 6, 2018.
- [SLN17] Q. Song, X. Lagrange, and L. Nuaymi. Evaluation of Macro Diversity Gain in Long Range ALOHA Networks. *IEEE Comm. Letters*, 21(11):2472–2475, 2017.