



**HAL**  
open science

# Ajustement du niveau de redondance des transmissions LoRaWAN

Martin Heusse, Christelle Caillouet

► **To cite this version:**

Martin Heusse, Christelle Caillouet. Ajustement du niveau de redondance des transmissions LoRaWAN. CoRes 2023 - 8èmes Rencontres Francophones sur la Conception de protocoles, l'évaluation de performances et l'expérimentation de Réseaux de communication, May 2023, Cargese, France. hal-04090723

**HAL Id: hal-04090723**

**<https://hal.science/hal-04090723v1>**

Submitted on 5 May 2023

**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.



Open licence - etalab

# Ajustement du niveau de redondance des transmissions LoRaWAN

Martin Heusse<sup>1</sup>, Christelle Caillouet<sup>2</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 taux de délivrance des trames en LoRaWAN lorsque la passerelle est capable de diversité d'antenne en réception. A partir de ce modèle, nous étudions le niveau de redondance des transmissions afin de garantir une réception fiable des données sans néanmoins surcharger le canal. Nous montrons alors que la diversité d'antenne en réception combinée avec un niveau bien choisi de redondance des transmissions permet de garantir une utilisation maximale du canal tout en maintenant une bonne fiabilité de réception des données de l'application.

**Mots-clés :** Aloha, LPWAN, LoRaWAN

---

## 1 Introduction

Les réseaux LPWAN présentent la double difficulté d'utiliser un accès Aloha et de devoir faire face à des fluctuations importantes de la puissance reçue dues à la propagation multi-trajets. La problématique qui en découle est celle d'ajuster le niveau de redondance dans la transmission des données pour d'une part arriver à remonter les données de manière fiable, sans être excessivement conservateur et donc générer du trafic au point voir les collisions exploser.

Ce travail reprend un modèle présenté récemment [HCD22a, HCD22b], pour lequel les passerelles se verrouillent sur une seule transmission à la fois pour un SF donné. Les interférences pré-existantes condamnent donc une réception plus tardive, sauf si leur puissance cumulée est trop faible pour passer sous le seuil de détection du préambule. Dans cet article, nous étendons ce modèle pour inclure de la diversité en réception sur la passerelle : on suppose y disposer de deux antennes et deux récepteurs travaillant en parallèle. Ils sont soumis au même trafic mais « voient » des gains de canal aléatoires différents pour chaque transmission.

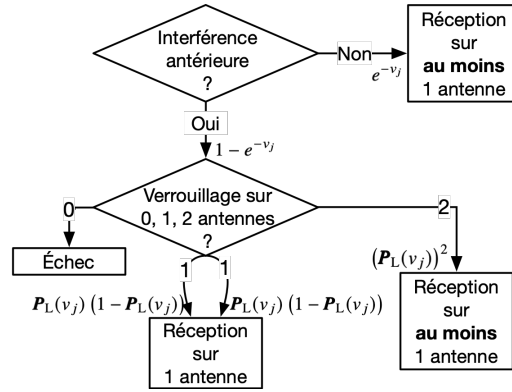
Le modèle permet ainsi de faire ressortir le fait que, si un code correcteur d'erreur est disponible, alors un taux de codage, qui définit le niveau de redondance, de l'ordre de  $\frac{1}{3}$  (qui correspond aussi au schéma de répétition utilisé par SigFox) conduit à pouvoir approcher l'utilisation maximale du canal sur une large plage de distances. Ce résultat complète les observations faites dans le cas de mécanismes de correction empiriques, pour lesquelles l'imperfection de la correction d'erreur n'était pas détachée de la structure fondamentale du problème [dSSHS<sup>+</sup>20].

## 2 Taux de réception avec diversité

La présence de deux antennes sur la passerelle complexifie légèrement le calcul de la probabilité de réception. En effet, les évanouissements multi-trajets sont différents sur chaque antenne et donc plusieurs cas de figure sont à considérer. Par exemple, on sait que sous condition de l'absence d'interférence antérieure, la probabilité  $\mathbf{P}_0$  de réception sans diversité [HCD22b] est :

$$\mathbf{P}_0(v_j) = e^{-g_j - v_j} + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(v_j)^N}{N! e^{v_j}} \mathbf{p}_i(N, 0). \quad (1)$$

où  $\mathbf{p}_i(N, \alpha)$  la probabilité de dominer à la fois la somme des puissances de  $N$  interférences ultérieures (venant s'ajouter à un niveau d'interférence antérieure décrit par  $\alpha$ ) et le bruit thermique qu'on domine avec



**FIGURE 1:** Probabilité de réception avec et sans interférence antérieure. En présence d’interférence au moment de l’arrivée d’une trame, le verrouillage peut se faire sur l’une ou l’autre antenne, ou les deux ; dans ce dernier cas comme en l’absence d’interférence, une seule réception réussie suffit.

la probabilité  $e^{-g_j}$  ( $v_j$  est la charge présentée pour le SF  $j$ ). Alors, avec 2 antennes en réception, dans les mêmes circonstances, la probabilité de réception réussie est :

$$\mathbf{P}_0^D(v_j) = e^{-v_j} \left( 1 - (1 - e^{-g_j})^2 \right) + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{(v_j)^N}{N! e^{v_j}} \left( 1 - (1 - p_i(N, 0))^2 \right). \quad (2)$$

En résumé, pour chaque sous-cas  $c$ , la probabilité de succès  $p_c$  sans diversité devient  $p_c^D = (1 - (1 - p_c)^2)$  avec diversité en réception.

Par manque de place, nous ne détaillons pas le reste du calcul, mais sa structure apparaît en figure 1.  $\mathbf{P}_0^D$  ci-dessus est la probabilité de succès du cas en haut à droite (conditionné par l’absence d’interférence antérieure avec la probabilité  $e^{-v_j}$ ). En présence d’interférence antérieure à l’arrivée d’une trame, quatre cas sont possibles : soit ces dernières empêchent le verrouillage sur les deux antennes et la réception échoue, soit il fonctionne uniquement sur l’antenne 1, soit uniquement sur la 2, soit enfin sur les deux. Ce dernier cas se présente avec la probabilité  $(\mathbf{P}_L(v_j))^2$ , où  $\mathbf{P}_L$  est la probabilité de détection du préambule d’une transmission, en présence d’interférence pré-existante. Pour la réception sur une seule antenne, la probabilité  $\mathbf{P}_{1+}$  s’applique [HCD22b], alors que c’est  $\mathbf{P}_{1+}^D$  (non explicitée ici) en bas à droite.

### 3 Code correcteur systématique parfait

Un code correcteur systématique inter-trame commence par transmettre une trame de données de l’application sans les modifier, puis génère des trames de redondance qui sont chacune des combinaisons logiques de plusieurs trames de données. De cette manière, une trame perdue peut être reconstruite en inversant les opérations effectuées pour produire les trames qui sont, elles, bien reçues.

Différents codes correcteurs d’erreur existent, et pour peu qu’on n’ait pas d’exigence de latence, on peut s’approcher aussi près qu’on veut du cas parfait pour lequel il suffit de recevoir *en moyenne* une fraction suffisamment grande des trames pour reconstruire toutes les données [CHT20, MKRP20]. Cette fraction est définie par le taux de codage  $C$  qui est le nombre de trames systématiques (de données fraîches) par trame émise :

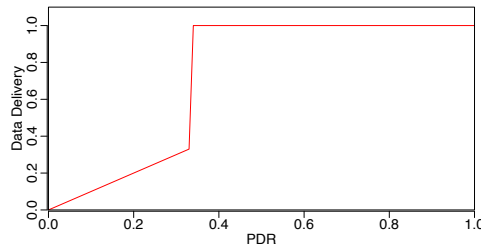
$$\begin{cases} DDR = PDR & \text{si } PDR < C \\ DDR = 1 & \text{sinon,} \end{cases}$$

où  $DDR$  est le taux de réception des données de l’application et  $PDR$  est le taux de réception. La Figure 2 illustre la relation entre  $PDR$  et  $DDR$  pour un taux de codage  $\frac{1}{3}$ .

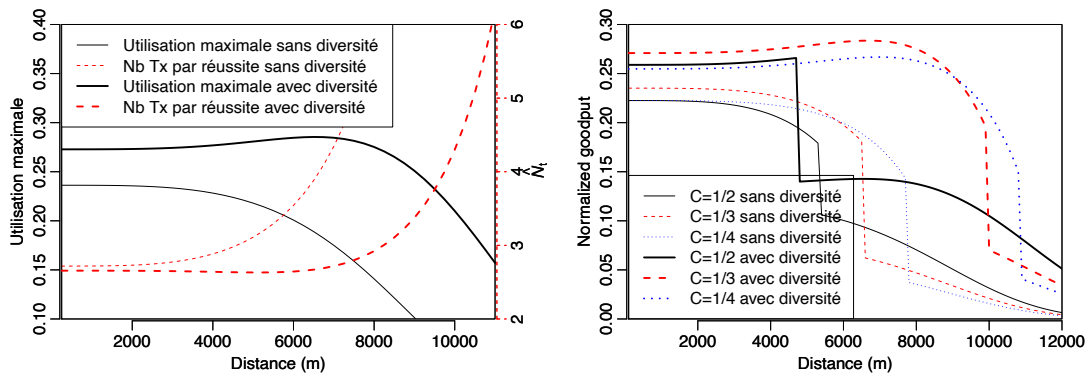
### 4 Le problème de la redondance sur un canal Aloha LoRaWAN

Étant donnée l’utilisation d’un code correcteur d’erreur (ou des répétitions, pour un résultat moins fiable), la question cruciale est de régler le taux de codage  $C$ . En effet, un taux de codage trop faible, c’est à dire la

## Ajustement du niveau de redondance des transmissions LoRaWAN



**FIGURE 2:** Taux de réception des données de l'application en fonction du taux de réception  $PDR$  pour un code correcteur d'erreur systématique parfait avec un taux de codage  $C = \frac{1}{3}$ .



(a) Utilisation maximale  $U_{\max}$  (en noir) et nombre de transmissions par réception réussie  $\hat{N}_t$  (échelle de droite) (b) Utilisation efficace du canal par des données de l'application pour différents taux de codage

**FIGURE 3:** Utilisation maximale et utilisation efficace du canal (pour différents taux de codage) en fonction de la distance,  $SF12$

transmission de trop nombreuses trames de redondance, causera une surcharge inutile du canal et donc plus de collisions. Ces transmissions augmentent tout aussi inutilement la consommation énergétique des nœuds (ou limite leur capacité de transmission quand ils atteignent leur limite autorisée de cycle d'activité).

À l'inverse, trop peu de redondance conduit à des pertes de données, inévitables dans un canal Aloha, qui plus est multi-trajets — à moins que, respectivement, la charge soit négligeable ou la marge de rapport signal sur bruit soit très confortable.

La figure 3(a) représente sur l'axe de gauche le taux d'utilisation maximal atteignable avec et sans macro-diversité, à  $SF12$ , en fonction de la distance entre les nœuds (supposés tous à la même distance). Ces courbes découlent d'une recherche numérique d'extremum pour le modèle présenté plus haut. Pour mémoire, avec un modèle Aloha, le taux à distance nulle est de 18,4%. La décroissance générale de la courbe avec l'augmentation de la distance traduit le fait qu'à faible distance, l'unique cause de perte sont les collisions ; par contre, vers la droite, à mesure que les nœuds s'éloignent, de plus en plus de trames sont perdues du fait de l'atténuation. À une distance infinie, le taux d'utilisation tend vers 0.

Notre modèle avec verrouillage conditionnel donne parfois une légère augmentation de la capacité avec la distance, particulièrement visible avec diversité sur la figure 3(a) (courbe noire en gras). À une distance intermédiaire, certaines transmissions pré-existantes sont ignorées par la passerelle (car reçues faiblement) qui reste donc disponible pour une réception ultérieure, ce qui n'arrive jamais à faible distance.

Au delà de cette curiosité, les courbes en pointillés rouges dépendent de l'échelle à droite représentant le nombre de transmissions  $\hat{N}_t$  par réception réussie. Cet indicateur fournit le nombre de trames (par trame de données de l'application) à confier au canal pour atteindre l'utilisation maximale sans perte après correction d'erreur (avec  $C = \frac{1}{N_t}$ ). Initialement,  $\hat{N}_t$  forme un plateau, avant de s'envoler aux abords de ce qu'on pourrait décrire comme la limite de portée utile de la modulation utilisée. Nous pouvons observer qu'avec ou sans

diversité, un taux de codage situé entre  $\frac{1}{3}$  et  $\frac{1}{2}$  reste la valeur à viser, pour corriger les erreurs sans redondance inutile, et ce à moins de chercher à étendre la portée.

Avec une perspective différente, la figure 3(b) montre l'utilisation maximale du canal obtenue uniquement par des données de l'application (donc en supprimant les données redondantes reçues) pour différents taux de codage. À courte distance,  $C = \frac{1}{4}$  n'apporte aucun bénéfice, à l'inverse de ce qui se passe plus loin ;  $C = \frac{1}{2}$  est plus éloigné que  $C = \frac{1}{3}$  du taux de codage optimal à faible distance et chute rapidement. À très grande distance (plus de 8km sans diversité par exemple), l'utilisation est meilleure avec  $C = \frac{1}{2}$  tout simplement parce que le code correcteur étant devenu inopérant, le plus grand nombre relatif de trames systématique redevient un avantage mais évidemment pour des pertes très conséquentes au niveau de l'application (à gauche de la discontinuité, 100% des données sont reçues).

## 5 Conclusion

S'il était établi que la redondance est bénéfique dans une cellule LPWAN, cet article montre qu'il existe un niveau optimal en deçà duquel les pertes ne sont pas corrigées avant même que l'utilisation maximale du canal soit atteinte. À l'inverse, un excès de redondance surcharge le canal à (relativement) faible distance, mais permet de maintenir une bonne fiabilité quand elle augmente. Cette mesure est cependant loin d'être aussi efficace que de disposer d'une diversité d'antennes (et de récepteurs) sur la passerelle dont les bénéfices se font sentir autant pour améliorer la capacité à faible distance que la portée de couverture. La correction d'erreur inter-trame est complémentaire de l'ajustement du SF : elle augmente la portée à laquelle un SF donné peut être utilisé et le nombre d'émetteurs qu'une cellule peut accueillir, tout en maintenant une bonne fiabilité de réception des données de l'application.

## 6 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

- [CHT20] U. Coutaud, M. Heusse, and B. Tourancheau. Fragmentation and Forward Error Correction for LoRaWAN Small MTU Networks. In *MaDeLoRa workshop, Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*. ACM, 2020.
- [dSSHS<sup>+</sup>20] Jean Michel de Souza Sant'Ana, Arliones Hoeller, Richard Demo Souza, Hirley Alves, and Samuel Montejo-Sánchez. LoRa Performance Analysis with Superposed Signal Decoding. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(11):1865–1868, 2020.
- [HCD22a] Martin Heusse, Christelle Caillouet, and Andrzej Duda. Frame Arrival Timing in LoRaWAN : Capacity Increase With Repeated Transmissions and More Channel Attenuation. In *PIMRC 2022 - IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Virtual Conference, Japan, September 2022.
- [HCD22b] Martin Heusse, Christelle Caillouet, and Andrzej Duda. Taux de réception en LoRaWAN et temporalité des arrivées : pouvez-vous parler moins fort et répéter? In *CORES 2022 – 7ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication*, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, France, May 2022.
- [MKRP20] Paul Marcelis, Nikolaos Kouvelas, Vijay S Rao, and Venkatesha Prasad. DaRe : Data Recovery through Application Layer Coding for LoRaWAN. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020.