



**HAL**  
open science

# Optimisation de l'allocation des facteurs d'étalement dans les Réseaux LoRaWAN

Mohamed Hammache, Rahim Kacimi, André-Luc Beylot

► **To cite this version:**

Mohamed Hammache, Rahim Kacimi, André-Luc Beylot. Optimisation de l'allocation des facteurs d'étalement dans les Réseaux LoRaWAN. 6ème Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication (CORES 2021), May 2021, La Rochelle, France. hal-03220095

**HAL Id: hal-03220095**

**<https://hal.science/hal-03220095>**

Submitted on 6 May 2021

**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.

# Optimisation de l'allocation des facteurs d'étalement dans les Réseaux LoRaWAN<sup>†</sup>

Mohamed Hammache<sup>1</sup>, Rahim Kacimi<sup>2</sup> et André-Luc Beylot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulouse, IRIT-ENSEEIH, Toulouse, France

<sup>2</sup> Université de Toulouse, IRIT-UT3, Toulouse, France

---

Les réseaux LPWAN connaissent une croissance vertigineuse et continuent de répondre à certains besoins essentiels du marché de l'Internet des objets en raison de leur capacité à fournir un accès sans fil à faible coût à des équipements géographiquement dispersés. Par conséquent, une allocation efficace des ressources sans fil de manière à en prendre en charge un grand nombre devient une préoccupation majeure. Dans cet article, nous proposons une approche d'affectation des facteurs d'étalement (Spreading Factors – SF) dans les réseaux LoRa en tenant compte de la charge de trafic à la fois entre les facteurs d'étalement et les différents canaux. Notre stratégie consiste à trouver une meilleure répartition des nœuds sur les SFs en orchestrant un équilibrage de charge efficace. De plus, les performances de notre solution sont évaluées sous diverses configurations de réseau en tenant compte de l'effet de capture et de la non-orthogonalité des SFs. Nous avons validé certaines hypothèses par des expériences à grande échelle en particulier pour le modèle de *path loss* 3GPP qui est utilisé pour la première fois dans des simulations LoRa. Nos résultats suggèrent que l'équilibrage de charge conduit à de meilleures performances en termes de DER (Data Extraction Rate pour taux d'extraction de données) tout en garantissant une bonne évolution en fonction de la taille et de la densité du réseau.

**Mots-clefs :** Réseaux LoRaWAN, Allocation de ressources

---

## 1 Introduction

Les réseaux LPWAN (Low Power Wide Area Networks) sont des réseaux sans fil à faible consommation d'énergie, à faible débit et à longue portée. Leur succès dans le contexte de l'Internet des objets est spectaculaire. On estime en effet que plus de 20 % des raccordements à l'Internet des objets se font via des LPWAN, ce qui représente d'ores et déjà plusieurs milliards d'objets connectés.

Par conséquent, afin de répondre aux exigences en termes de déploiement massif, l'utilisation des canaux a été régulée avec un rapport cyclique d'activité de 1% et les débits binaires ont été réduits au minimum. Par exemple, une passerelle LoRa devrait recevoir le trafic de plusieurs milliers de nœuds. Cependant, malgré ce faible taux d'activité, des problèmes de transmission tels que des collisions sont toujours observés en raison de la charge agrégée de trafic et du grand nombre de nœuds utilisant le même facteur d'étalement.

LoRaWAN [AVT<sup>+</sup>17] a récemment attiré l'attention de la communauté des communications sans fil en raison de ses fortes promesses en termes de densité, de faible puissance, de capacité à longue portée et de flexibilité. Toutes ces caractéristiques le rendent adapté à un large éventail d'applications de l'Internet des objets telles que la surveillance environnementale, la ville intelligente, le contrôle de l'éclairage public et l'agriculture de précision. La communication entre les nœuds et les passerelles dans les réseaux LoRaWAN est contrôlée par un ensemble de paramètres. Ces paramètres deviennent critiques et ont un impact significatif sur la qualité de la communication en termes de capacité du réseau, de taux de collision, de taux d'extraction de données (DER), etc. En effet, le choix d'une combinaison de paramètres plutôt qu'une autre peut améliorer ou dégrader notablement un ou plusieurs des critères de qualité de communication mentionnés précédemment. L'un des paramètres les plus importants ayant un impact direct sur le débit global est le facteur d'étalement (SF). Il ne fait aucun doute que le choix du bon SF pour envoyer un trame contribue fortement à minimiser les interférences intra-SF et inter-SF et permet la coexistence de plusieurs nœuds dans la même zone sans dégrader considérablement la qualité du réseau. La méthode classique consiste pour

---

<sup>†</sup> Ce travail a été accepté et publié à LCN 2020

un nœud consiste à choisir son SF en fonction des conditions de réception et du niveau d'interférence perçu. Les algorithmes reposent ainsi sur le rapport signal sur bruit (SNR) et sur le niveau de puissance du signal reçu (RSSI). On va alors choisir le facteur d'étalement le plus faible car ce sera celui qui lui semblera garantir le meilleur débit. Cette solution va optimiser localement le choix du SF mais l'absence d'une vision d'ensemble induit des niveaux d'interférences élevés et de nombreuses collisions en particulier sur les facteurs d'étalement les plus faibles (ie. ceux qui conduisent en théorie aux meilleurs débits). Le nœud peut en fait utiliser tous les facteurs d'étalement plus grand. Dans cet article, nous étudions une approche différente pour l'allocation des facteurs d'étalement sous divers scénarios de charge pour les réseaux LoRaWAN. Nous plaçons pour l'utilisation d'un contrôle de charge et d'un déplacement entre les différents SF. Par conséquent, nous proposons une nouvelle stratégie (L3SFA) qui améliore le taux d'extraction de données global (DER). La stratégie L3SFA considère la charge globale du système en termes de trafic engendré ou de nombre de nœuds pour allouer les SF aux nœuds. Son objectif principal est de répartir la charge sur différentes classes (SF) tout en assurant un bon DER.

## 2 Modèle du Système

Nous considérons un réseau LoRaWAN composé de  $N$  nœuds avec une seule passerelle. Chaque nœud est initialisé avec un  $SF = i$  suivant les seuils RSSI et SNR donnés dans [HKB20] pour envoyer des trames à la passerelle. Pour déterminer les SF autorisés (entre SF7 et SF12) pour un nœud donné, nous définissons un schéma d'équilibrage de charge précis. Suite à l'initialisation des SF, nous introduisons  $M_{j,i}$  le nombre de nœuds qui peuvent utiliser  $SF = j$  mais qui ont été décalés vers  $SF = i$  et  $M_{i,j}$  nombre de nœuds qui gardent leur  $SF = j$  inchangé. Pour faciliter la présentation, nous notons  $M_i$  le nombre de nœuds auxquels un  $SF = i$  a été attribué, après la procédure de décalage.  $M_i$  peut être calculé comme suit :  $M_i = \sum_{j=7}^i M_{j,i}$ .

Soit  $\rho_i$  la charge pour chaque  $SF = i$  après la phase de décalage.  $\rho_i$  est calculé en utilisant l'équation  $\rho_i = \frac{M_i \times T_i}{p}$ , où  $T_i$  est le temps de vol en utilisant  $SF = i$  et  $p$  est la période de génération de trames des nœuds. Par conséquent, le taux d'extraction de données  $DER_i$  atteint pour  $SF = i$  avec une charge  $\rho_i$  peut être calculé comme suit :  $DER_i = e^{-\rho_i}$  correspondant à l'absence de collision sur le  $SF = i$ . Nous formulons le problème d'allocation de SF comme un problème de maximisation décrit dans les équations (1a-1d).

$$\max \quad \frac{1}{N} \sum_{i=7}^{12} DER_i \times M_i \quad (1a)$$

$$\text{s.t.} \quad M_{j,i} \in \mathbb{N} \quad (1b)$$

$$\sum_{j=i}^{12} M_{i,j} = N_i \quad (1c)$$

$$M_{j,i} = 0 \quad \text{If } j > i \quad (1d)$$

La fonction objectif donnée par l'équation (1a) vise à maximiser le  $DER$  global en se fondant sur le  $DER_i$  de chaque  $SF = i$  et le nombre de nœuds utilisant ce SF après que la phase d'équilibrage de charge aura été terminée. L'équation (1b) impose une forte contrainte sur le problème d'optimisation. En effet, le nombre de nœuds changeant de facteur d'étalement doit être un entier positif. Le processus de décalage n'est possible que si l'équation (1d) est satisfaite. En effet, le décalage de SF est dans un sens (de SF inférieur à SF supérieur), l'inverse n'est pas possible. Le processus de décalage est contrôlé par l'équation (1c). Cette contrainte garantit que le nombre total de nœuds décalés de  $SF = i$  vers des SF supérieurs plus ceux que l'on a laissés en place doit être égal au nombre de nœuds utilisant  $SF = i$  avant le processus de décalage. Cela garantit que  $\sum_{i=7}^{12} M_i = N$ . Le problème d'optimisation présente une grande complexité. En effet, d'une part, nous sommes confrontés à un problème d'optimisation non linéaire à nombre entiers [HKLW10] et d'autre part, la taille du réseau est hautement évolutive. Sans aucun doute, une recherche exhaustive n'est pas réalisable en raison du grand nombre de combinaisons de configurations possibles, et aucun algorithme en temps polynomial n'est connu pour être applicable dans un cas général, surtout lorsque le problème d'optimisation ne présente pas une forme linéaire ou convexe.

### 3 Heuristique d'Équilibrage de Charge et d'Allocation de SF

Dans cette section, nous présentons une stratégie nommée L3SFA qui alloue de manière optimale les SFs aux nœuds afin d'obtenir un meilleur DER. Il en découle trois phases principales : *i) initialisation, ii) allocation de SF et iii) ajustement de SF.*

L3SFA commence par une phase d'initialisation. Notons que deux actions sont entreprises : 1) comme le mécanisme d'allocation SF est incrémental, tous les nœuds sont initialisés avec  $SF = 7$ . 2) Les nœuds sont triés en fonction de leur distance à la passerelle ou des valeurs de RSSI. Évidemment, cette action intuitive permet d'attribuer un SF inférieur en priorité aux nœuds les plus proches de la passerelle ou à ceux dont la valeur RSSI est la plus élevée.

Après l'initialisation, L3SFA commence la deuxième phase de pré-allocation des facteurs d'étalement. L'algorithme parcourt la liste des nœuds triée produite lors de la première phase et pour chaque nœud un SF approprié est attribué en fonction des valeurs SNR et RSSI mesurés sur la passerelle. Ces valeurs sont comparées aux seuils RSSI et SNR. Une telle comparaison est nécessaire et suffisante pour garantir une transmission réussie. Sans aucun doute, un RSSI supérieur à la sensibilité assure la réception des trames par la passerelle et combiné à un SNR supérieur au seuil SNR, les trames seront certainement décodées.

L'allocation de SF effectuée dans la phase deux n'est pas définitive. Cette allocation est contrôlée par la dernière phase du mécanisme L3SFA. Avant d'affecter définitivement un SF à un nœud, la troisième phase effectue un contrôle de charge sur la répartition des SF pour ajuster si nécessaire et mieux répartir la charge.

Le mécanisme de redistribution de SFs doit avoir une connaissance globale du système d'allocation de SF pour effectuer les ajustements. En effet, il prend en entrée : un SF pré-affecté à un nœud, un vecteur de nombre de nœuds utilisant  $SF = i$  pour  $i \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$  et un vecteur de charges représentant le nombre de nœuds seuil pour chaque  $SF = i$  calculées à l'aide de l'équation 2.

L'utilisation d'une telle stratégie garantit que chaque nœud sera associé au SF approprié qui est qualifié de bon pour deux raisons principales : 1) L'allocation de SF dans la deuxième phase garantit qu'une trame sera reçue et pourra être décodée s'il n'y a pas de collision. 2) L'ajustement de SF en phase trois contrôle la charge SF ce qui réduit considérablement le nombre de collisions. Le déplacement de certains nœuds lorsque cela est possible vers un SF supérieur réduit les phénomènes d'effet de capture. De plus, des classes SF moins chargées sont moins pénalisantes en terme de DER que des classes surchargées avec des SFs plus élevés. Ces derniers augmentent le temps de vol des trames et par conséquent la probabilité de collision.

### 4 Analyse de Performances

Dans cette section, nous examinons les performances de notre stratégie à travers des simulations approfondies et la mise en œuvre des algorithmes détaillés dans la section 3. Outre la conception de la stratégie L3SFA, nous avons également développé un outil de simulation LoRa-L3SFA fondé sur LoRaSim [BRVA16] et LoRaFREE [AZCP20] pour démontrer les gains de performance de notre solution. L'outil LoRa-L3SFA combine la bibliothèque python Simpy et le modèle de perte 3GPP Urban Macro. Le Choix de ce modèle est validé après une étude expérimentale menée avec un nœud Microchip RN2384 intégré à une Raspberry Pi et doté d'un module GPS pour tracer les valeurs du RSSI en fonction de la distance à la gateway. On considère que les nœuds sont positionnés aléatoirement dans un espace à 2 dimensions formant une cellule de  $\text{rayon} = 600$  mètres. Plusieurs exécutions sont réalisées avec des valeurs de départ différentes afin d'avoir une bonne confiance dans les résultats. Nous exécutons 2400 simulations avec  $N$  nœuds,  $N \in [500, 10000]$  avec un pas de 500, sous différentes configurations. Nous montrons dans la Fig. 1d à 1f la répartition des facteurs d'étalement après l'allocation de SF avec et sans contrôle de charge pour  $N = 5000$  nœuds. De même, nous montrons l'amélioration du DER global de la redistribution de SF dans les Fig. 1a à 1c. On remarque que la charge de trafic engendrée diminue en utilisant respectivement les taux de génération de trames  $\frac{1}{100}$ ,  $\frac{1}{300}$ ,  $\frac{1}{600}$ . On observe sur les Fig. 1a à 1c, que L3SFA conduit à de meilleurs résultats en termes de DER. En effet, le déplacement de certains nœuds vers un SF plus élevé allège le système et réduit les collisions dues à l'effet de capture, ce qui augmente la capacité du réseau LoRa. Par exemple, pour un taux de génération de trames de  $\frac{1}{600s}$  et pour atteindre un DER supérieur à 80%, L3SFA prend en charge 8500 nœuds contre seulement 6000 nœuds en utilisant L3SFA sans ajustement de SF.

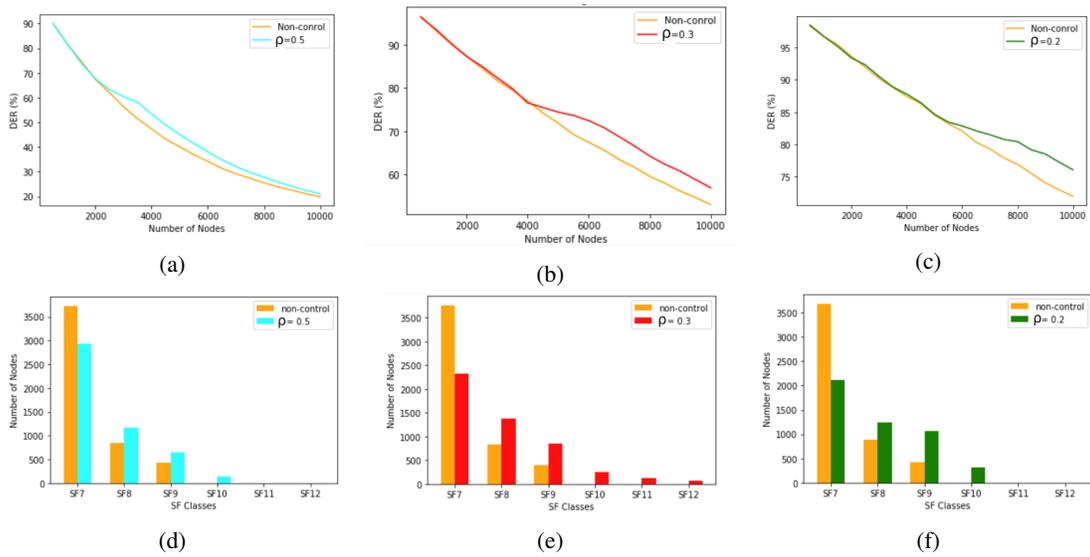


FIGURE 1: Étude de la performance de L3SFA. [a-c] DER en fonction du nombre de nœuds pour un taux de génération de trames de  $\frac{1}{100s}$ ,  $\frac{1}{300s}$ ,  $\frac{1}{600s}$ . [d-f] Distribution de SF pour 5000 noeuds

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié le problème d’allocation du facteur d’étalement dans les systèmes LoRaWAN à grande échelle. Nous avons démontré que les stratégies d’affectation de SF conventionnelles souffrent en terme de performances et ne parviennent pas à gérer la charge du trafic engendrée. Nous avons présenté une nouvelle approche d’allocation des SF qui consiste à viser un meilleur équilibrage de charge. Cette approche cherche une meilleure répartition des nœuds sur les différents SF en orchestrant un équilibrage de charge efficace. Nous avons examiné les performances de notre stratégie sous différentes configurations de réseau. Nos résultats suggèrent que l’ajustement de la répartition de SFs conduit à de meilleures performances en termes de DER tout en garantissant une bonne évolutivité vis-à-vis de la taille et de la densité du réseau. À l’avenir, plusieurs pistes sont envisageables pour améliorer notre stratégie en combinant canaux et facteurs d’étalement. De plus, nous aimerions déployer nos algorithmes sur notre serveur réseau LoRaWAN, et mener des expériences pour étudier son comportement dans une infrastructure réelle, en particulier sur le lien descendant. Nous nous intéressons enfin à l’utilisation de la macro-diversité en réception pour étendre notre stratégie à une solution multi-passerelle.

## Références

- [AVT<sup>+</sup>17] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9) :34–40, 2017.
- [AZCP20] K. Q. Abdelfadeel, D. Zorbas, V. Cionca, and D. Pesch. *free* —fine-grained scheduling for reliable and energy-efficient data collection in lorawan. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1) :669–683, 2020.
- [BRVA16] Martin Bor, Utz Roedig, Thiemo Voigt, and Juan Alonso. Do lora low-power wide-area networks scale? In *Proc. of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWIM’16*, page 59–67, 11 2016.
- [HKB20] M. Hammache, R. Kacimi, and A. L. Beylot. L3sfa : Load shifting strategy for spreading factor allocation in lorawan systems. In *2020 IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 216–224, 2020.
- [HKLW10] Raymond Hemmecke, Matthias Köppe, Jon Lee, and Robert Weismantel. Nonlinear integer programming. In *50 Years of Integer Programming*, 2010.