



**HAL**  
open science

## **Parler, c'est bien... répondre, c'est mieux : le trafic descendant dans LoRaWAN**

Carlos Fernandez Hernandez, Christelle Caillouet, Alexandre Guitton, Oana Iova,  
Fabrice Valois

### ► **To cite this version:**

Carlos Fernandez Hernandez, Christelle Caillouet, Alexandre Guitton, Oana Iova, Fabrice Valois. Parler, c'est bien... répondre, c'est mieux : le trafic descendant dans LoRaWAN. CORES 2026 - 11es Rencontres Franco-phones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performances et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, Jun 2026, Mandelieu-la-Napoule, France. <hal-05600759>

**HAL Id: hal-05600759**

**<https://hal.science/hal-05600759v1>**

Submitted on 23 Apr 2026

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

# Parler, c'est bien... répondre, c'est mieux : le trafic descendant dans LoRaWAN

Carlos Fernandez Hernandez<sup>1</sup> † et Christelle Caillouet<sup>2</sup> et Alexandre Guitton<sup>3</sup>  
et Oana Iova<sup>1</sup> et Fabrice Valois<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSA Lyon, Inria, CITI, UR3720, Villeurbanne

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

<sup>3</sup>Université Clermont-Auvergne, CNRS, Mines de Saint-Étienne, Clermont-Auvergne-INP, LIMOS, Clermont-Ferrand

---

Le trafic descendant dans les réseaux LoRaWAN est un élément clé pour de nombreuses applications IoT. La planification de ces transmissions, assurée par le serveur de réseau, repose sur des choix complexes impliquant le moment de transmission et la passerelle utilisée. Dans cet article, nous évaluons les performances de la planification du trafic descendant effectuée par The Things Stack (TTS) à l'aide de l'outil d'émulation ELoRa et d'un modèle de planification optimal servant de référence. Sur la base de cette analyse, nous proposons une modification simple et déterministe de l'algorithme de planification de TTS, basée sur un seuil de facteur d'étalement. Les résultats montrent une amélioration allant jusqu'à 12 % de la capacité de planification du trafic descendant, soulignant le potentiel d'optimisation des serveurs de réseau LoRaWAN à travers des ajustements algorithmiques légers et facilement déployables.

**Mots-clés :** LoRaWAN, trafic descendant, ordonnancement, ELoRa, The Things Stack.

---

## 1 Introduction

Dans le contexte de l'Internet des Objets (IoT), LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) est un protocole majeur, offrant des communications longue portée à faible consommation d'énergie. Bien que la plupart des applications LoRaWAN soient principalement basées sur un trafic montant (communication depuis les terminaux vers les serveurs réseau et applications), plusieurs mécanismes essentiels dépendent de la communication descendante (vers les terminaux), tels que : la procédure de connexion au réseau, les accusés de réception pour les paquets montants, la gestion des dispositifs (dont l'algorithme d'adaptation dynamique du débit de LoRaWAN), les mises à jour logicielles à distance, ou les commandes d'actionneurs.

Des études antérieures ont montré que les transmissions descendantes fréquentes peuvent dégrader significativement la capacité réseau [VdAHMH17]. Bien que la passerelle soit souvent considérée comme le goulot d'étranglement du trafic descendant, elle ne fait qu'exécuter les décisions de transmission du serveur réseau. Ce dernier a la vue globale de la charge du réseau et de la qualité de liens de communications entre les terminaux et les passerelles, et décide de l'ordonnancement des paquets descendants.

Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur les terminaux LoRaWAN de classe A et sur les accusés de réception pour les paquets montants. Après chaque transmission montante, un nœud ouvre deux courtes fenêtres de réception successives (appelées Rx1 puis Rx2). Les acquittements doivent alors être transmis par les passerelles pendant ces fenêtres de temps prédéterminées. Dans ce contexte, nous proposons un cadre d'évaluation des algorithmes d'ordonnancement des paquets descendants des serveurs réseau LoRaWAN, en comparant, dans une configuration identique, l'ordonnancement réel de The Things Server (TTS), le serveur réseau le plus répandu, à un ordonnancement optimal tel que proposé par Caillouet et al. [CGIV24]. Nous proposons également un algorithme léger et déterministe d'ordonnancement qui améliore la capacité descendante de TTS jusqu'à 12%, réduisant significativement l'écart avec l'ordonnancement optimal.

---

† Ces travaux ont reçu le soutien du projet ANR-21-CE25-0002-01.

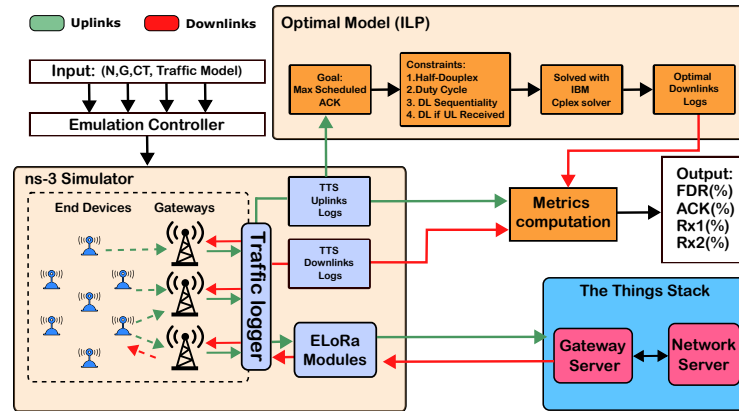


FIGURE 1 – Description du cadre d'évaluation proposé combinant ELoRa et le modèle d'optimisation.

## 2 Cadre d'évaluation

Pour évaluer et comparer les performances de l'ordonnanceur du trafic descendant de TTS avec celles d'un ordonnanceur optimal, nous proposons le cadre illustré dans la Fig. 1, composé de trois éléments principaux : le module d'émulation ELoRa [ARGS23, HIV24] du simulateur NS-3, le modèle d'optimisation basé sur la programmation linéaire en nombres entiers [CGIV24] et le module de calcul de métriques.

ELoRa est construit au-dessus du simulateur réseau NS-3, qui génère du trafic LoRaWAN entre les terminaux et les passerelles, permettant ainsi d'étudier diverses configurations réseau et différentes charges de trafic. ELoRa transfère les paquets arrivant aux passerelles simulées vers le système d'exploitation sur lequel s'exécute l'instance TTS, où ils sont traités en temps réel comme du trafic réel. Après traitement, si le paquet montant reçu dans TTS est un trafic confirmé, un paquet descendant est généré selon l'algorithme d'ordonnancement, puis renvoyé vers le simulateur NS-3 afin d'être transmis via la passerelle sélectionnée.

Les données montantes enregistrées dans le simulateur NS-3 sont également extraites et utilisées comme entrée du modèle d'optimisation afin d'obtenir l'ordonnancement optimal qui maximise le nombre de paquets descendants qui peuvent être envoyés par les passerelles étant donné le même trafic montant que pour ELoRa. Ainsi, les résultats de l'ordonnanceur descendant optimal et de l'ordonnanceur descendant de TTS reposent exactement sur le même trafic d'entrée et la même configuration réseau.

Les données de trafic issues du simulateur NS-3 et du modèle optimal sont ensuite exploitées pour calculer les métriques de performance dans le module final, ce qui permet de comparer les deux ordonnanceurs en garantissant une évaluation équitable basée sur des indicateurs cohérents.

## 3 Comparaison entre TTS et un ordonnancement optimal

Nous considérons un scénario LoRaWAN simulé en temps réel sur une zone de 1 km x 1 km, où les terminaux sont distribués uniformément et les passerelles disposées régulièrement dans un rayon de 250 m (dans le cas où il n'y a qu'une seule passerelle, elle est placée au centre). Chaque terminal transmet en moyenne toutes les 360 s (processus de Poisson), avec des paquets de 20 octets et des paramètres radio fixes (BW 125 kHz, CR 4/5), tandis que le SF est initialisé selon la puissance reçue moyenne. 50% des terminaux utilisent uniquement des paquets montants confirmés (qui nécessitent un acquittement). Les autres terminaux envoient 95% de paquets non confirmés et 5% confirmés pour vérifier périodiquement la connectivité réseau (cf l'algorithme d'adaptation dynamique du débit de LoRaWAN). Nous simulons 16 scénarios combinant un nombre de terminaux  $N \in \{100, 200, 300, 400\}$  et un nombre de passerelles  $G \in \{1, 2, 3, 4\}$ .

L'évaluation du pourcentage des paquets descendants envoyés par les passerelles montre que l'ordonnanceur optimal surpasse systématiquement TTS, avec un écart maximal de taux d'acquiescement de 23% dans le scénario comportant 400 terminaux et 4 passerelles. Nous allons nous concentrer ici sur la raison derrière cette performance de l'ordonnanceur optimal, en considérant le temps de blocage défini comme la durée cumulée pendant laquelle une passerelle est incapable de transmettre en raison des limitations du cycle

Parler, c'est bien... répondre, c'est mieux

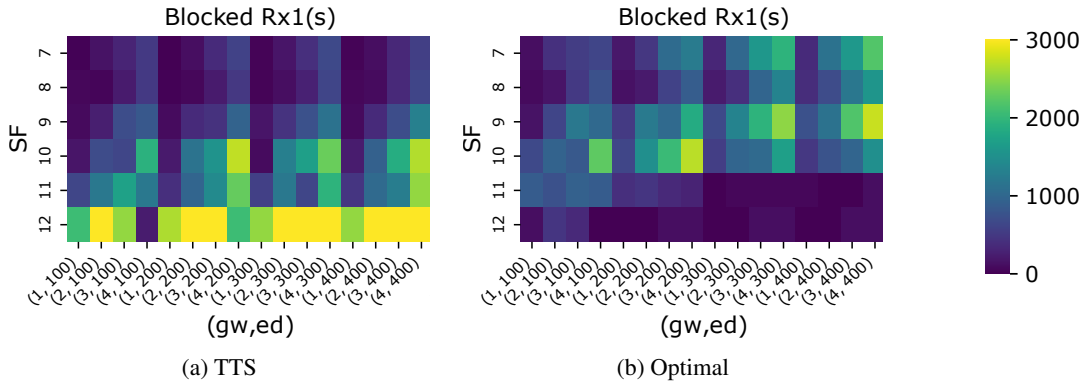


FIGURE 2 – Comparaison des temps de blocage des passerelles en fonction du SF du paquet descendant.

d'activité. Ce temps dépend du temps de transmission du paquet descendant ainsi que du cycle d'activité de la sous-bande utilisée pour la transmission.

La Fig. 2 montre le temps de blocage des passerelles dans Rx1 (qui correspond à la première fenêtre de réception des terminaux), pour TTS (à gauche) et pour l'ordonnanceur optimal (à droite). Contrairement à Rx2, les limitations de cycle d'activité dans Rx1 sont très contraignantes : après une transmission descendante en Rx1, la passerelle est bloquée et ne peut plus émettre pendant 99 fois le temps de transmission de la transmission précédente (contre seulement 9 fois pour Rx2). Ainsi, plus le SF utilisé est élevé, plus la passerelle reste bloquée longtemps. Dans TTS, la passerelle est principalement bloquée en raison de la planification de paquets descendants avec des SF élevés, en particulier SF12. Au contraire, l'ordonnanceur optimal évite ce comportement, conduisant à une distribution plus équilibrée du temps de blocage entre tous les SF. Cela permet de planifier davantage de paquets tout en maintenant une utilisation diversifiée des SF.

## 4 Amélioration de l'ordonnement

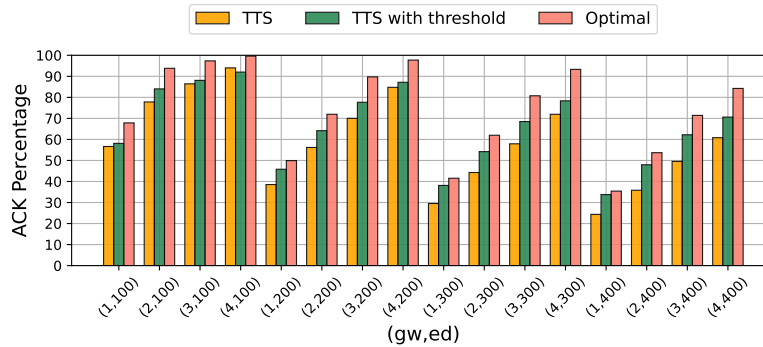
Sur la base des observations précédentes, nous proposons d'utiliser un seuil de SF pour déterminer la fenêtre de réception à utiliser lors de la planification d'un paquet descendant. Nous proposons donc de modifier l'algorithme de TTS de sorte que si le SF du paquet montant associé dépasse ce seuil, le paquet descendant est planifié pendant Rx2 ; s'il est inférieur, il est planifié pendant Rx1 ; et s'il est égal au seuil, Rx1 est priorisée sur Rx2. Nos résultats montrent que le seuil  $SF_{Th} = 9$  offre les meilleures performances. Nous évaluons ensuite les performances de l'ordonnement TTS intégrant cette modification.

Les résultats du taux d'acquiescement sont présentés dans la Fig. 3a. L'augmentation de la capacité d'ordonnement des paquets descendants obtenue grâce à notre proposition (TTS avec seuil) atteint jusqu'à 12% (pour 400 terminaux et 3 passerelles). Il s'agit d'une amélioration notable, d'autant que ce mécanisme ne requiert qu'une adaptation minimale du serveur réseau de TTS.

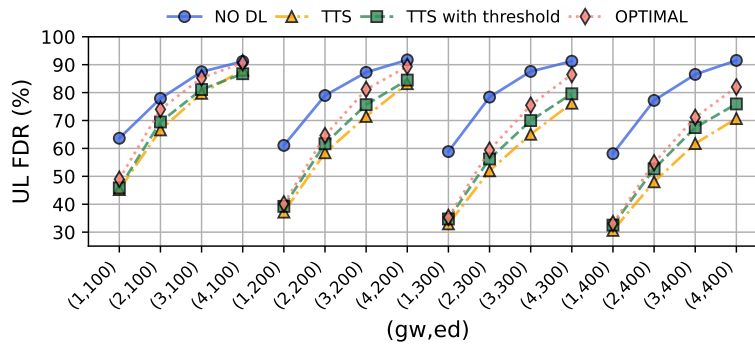
Il apparaît clairement que l'ordonneur proposé améliore les performances dans presque tous les cas, à l'exception du scénario le moins dense (4 passerelles et 100 terminaux). Cela s'explique par le fait que la majorité des terminaux y utilisent des SF faibles (37% en SF7, 16% en SF8 et 17% en SF9), rendant un seuil fixe moins pertinent lorsque qu'un type de SF domine. Cette limite reste toutefois mineure, puisqu'il est possible de surveiller la distribution du trafic par SF et d'ajuster dynamiquement le seuil en conséquence.

Il est bien connu que le trafic descendant affecte négativement les performances du trafic montant en raison du fonctionnement semi-duplex des passerelles et de la priorité donnée à la transmission sur la réception [VdAHMH17]. Dans ce contexte, nous quantifions l'impact des différents ordonneurs sur les performances du trafic montant, en étudiant le taux de livraison des trames montantes (noté UL-FDR).

La Fig. 3b confirme que la transmission de trafic descendant dégrade le taux de livraison des trames montantes, en particulier dans les scénarios avec une seule passerelle. Lorsque le nombre de passerelles augmente, cet impact diminue. Le modèle optimal obtient les meilleures performances, atteignant jusqu'à 12% de UL-FDR de plus que TTS (pour 4 passerelles et 400 terminaux). TTS avec seuil surpasse également



(a) Comparaison de TTS (sans seuil), TTS (avec seuil), et l'ordonnancement optimal.



(b) Taux de livraison des paquets montants (UL-FDR). Le scénario sans trafic descendant (NO DL) sert de référence.

la version de base de TTS, avec un gain pouvant atteindre 6% dans ce même scénario. Cela n'est pas surprenant, car un UL-FDR plus élevé est directement lié à un plus grand nombre d'acquittements transmis avec succès, ce qui améliore le taux de livraison des paquets montants confirmés.

## 5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un cadre commun pour comparer équitablement l'ordonnancement descendant optimal et celui de TTS, ainsi qu'un mécanisme déterministe basé sur un seuil de SF. Notre proposition améliore l'utilisation du cycle d'activité en répartissant les paquets entre les deux fenêtres de réception Rx1 et Rx2 selon le SF du paquet montant associé, permettant jusqu'à 12% de gain sur la capacité d'accusé de réception et réduisant de moitié l'écart avec l'optimal. Simple et léger à intégrer, ce mécanisme ouvre la voie à des améliorations futures, notamment via des stratégies adaptatives de sélection de passerelle pour mieux exploiter la diversité spatiale et renforcer le passage à l'échelle.

## Références

- [ARGS23] A. Aimi, S. Rovedakis, F. Guillemin, and S. Secci. ELoRa : End-to-end emulation of massive IoT LoRaWAN infrastructures. In *IEEE/IFIP NOMS*, 2023.
- [CGIV24] C. Caillouet, A. Guitton, O. Iova, and F. Valois. The Impact of Downlink Scheduling Policy on the Capacity of LoRaWAN. In *IEEE Globecom*, 2024.
- [HIV24] C. F. Hernandez, O. Iova, and F. Valois. Downlink scheduling in LoRaWAN : ChirpStack vs The Things Stack. In *IEEE LATINCOM*, 2024.
- [VdAHMH17] F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman, and J. Hoebeke. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in Ns-3. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(6) :2186–2198, 2017.