

Adaptation dynamique des facteurs d'étalement dans les réseaux LoRaWAN

Synthèse de contributions autour de l'ADR, de LoRaFlexSim, d'OSFARI et de MOSFARI

François d'Assise SANOU
Hamadoun TALL, Gérard CHALHOUB, Tiguiane YÉLÉMOU

Université Nazi BONI, Burkina Faso
Université Clermont Auvergne, France

Journées LPWAN 2026 – Clermont-Ferrand, France

Plan

- 1 Contexte
- 2 Contributions
- 3 ADR amélioré
- 4 LoRaFlexSim
- 5 OSFARI
- 6 MOSFARI
- 7 Synthèse

Motivation

- LoRaWAN est une technologie LPWAN adaptée aux communications longue portée et basse consommation.
- Le facteur d'étalement, ou SF, influence directement la portée, le débit, le ToA, l'énergie et les collisions.
- Dans les réseaux denses, mobiles ou interférés, une configuration fixe du SF devient insuffisante.
- Notre objectif est d'améliorer l'adaptation dynamique du SF pour renforcer la fiabilité du réseau.

Compromis lié au facteur d'étalement

Quand le SF augmente

- la portée et la robustesse augmentent ;
- le temps d'émission augmente ;
- le débit diminue ;
- le risque de collision et la consommation peuvent augmenter.

Problème

Un SF élevé protège le lien radio, mais occupe plus longtemps le canal.

Limites de l'ADR classique

- ADR adapte le SF et la puissance à partir de mesures historiques de qualité du lien.
- Il fonctionne bien dans les scénarios relativement stables.
- Mais il devient moins efficace lorsque :
 - la densité augmente ;
 - les interférences dominant ;
 - les nœuds sont mobiles ;
 - la qualité du lien varie rapidement.

Question scientifique

Comment adapter dynamiquement le SF de manière robuste et efficace dans les réseaux LoRaWAN soumis à la densité, à la mobilité et aux interférences ?

Fil conducteur des travaux

- ➊ Amélioration de l'ADR par ajustement dynamique du SF et de la puissance.
- ➋ Développement de LoRaFlexSim pour simuler et comparer les mécanismes LoRaWAN.
- ➌ OSFARI : adaptation SF en ligne sous interférences réalistes avec SNIR et UCB.
- ➍ MOSFARI : adaptation SF sous mobilité avec feedback binaire et UCB context-free.

ADR amélioré : principe

- Modification des paramètres `ADR_ACK_LIMIT` et `ADR_ACK_DELAY`.
- Ajustement de `adrDeviceMargin`.
- Couplage entre variation du SF et puissance d'émission.
- Objectif : accélérer l'adaptation lorsque le lien se dégrade.

PDR : ADR standard vs ADR amélioré

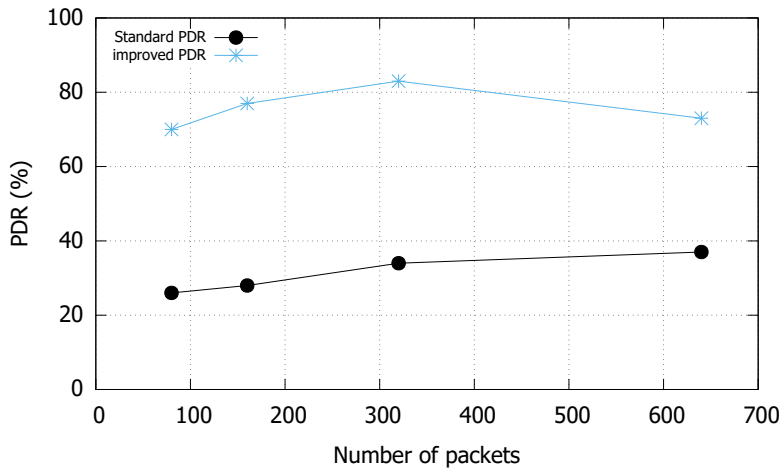


Figure 1 – PDR standard et PDR amélioré pour le premier scénario.

DER par facteur d'étalement

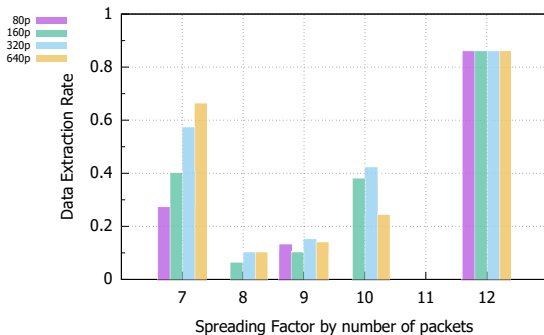


Figure 2 – DER par SF avec ADR standard.

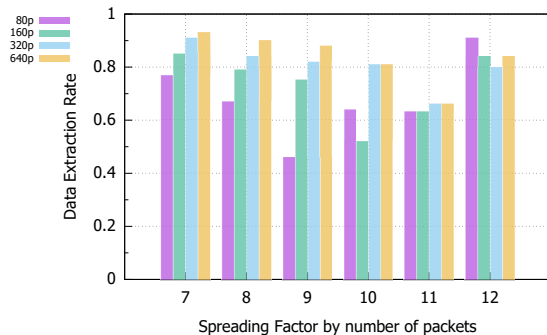


Figure 3 – DER par SF avec ADR amélioré.

Adaptation dynamique du SF

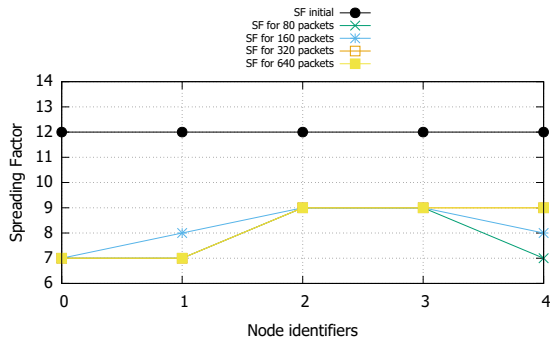


Figure 4 – Adaptation SF avec ADR standard.

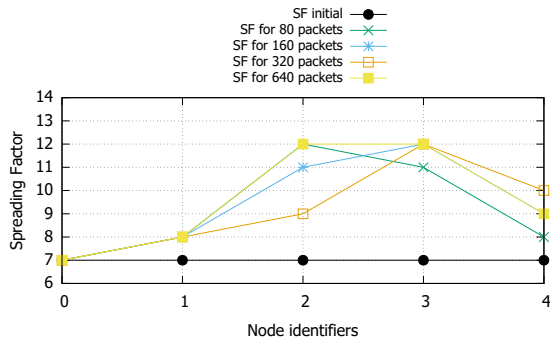


Figure 5 – Adaptation SF avec ADR amélioré.

LoRaFlexSim : rôle dans nos travaux

- Simulateur LoRa/LoRaWAN flexible et extensible.
- Permet de tester ADR, mobilité, classes A/B/C et multi-canaux.
- Sert de banc d'essai pour OSFARI et MOSFARI.
F. d'Assise Sanou, H. Tall, G. Chalhoub, and T. Yelemou, "Loraflexsim : A flexible lora/lorawan simulator," in Proceedings of the 14th IFIP/IEEE International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN), Nov. 2025, 10.23919/PEMWN67312.2025.11304034.

Architecture générale

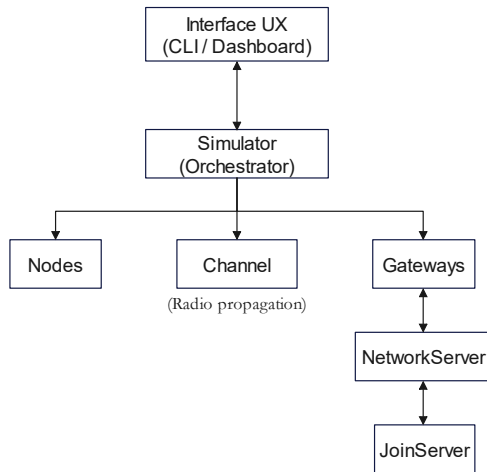


Figure 6 – Architecture générale de LoRaFlexSim.

OSFARI : adaptation sous interférences réalistes

- Dans les réseaux denses, les interférences deviennent dominantes.
- OSFARI utilise le SNIR au lieu de se limiter au SNR.
- Le choix du SF est formulé comme un problème de bandit multi-bras.
- Chaque SF, de SF7 à SF12, est considéré comme un bras.

Apprentissage UCB

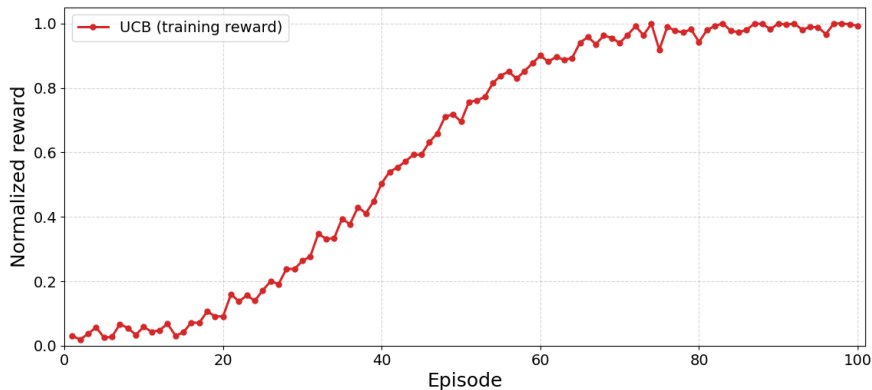


Figure 7 – Récompense normalisée pendant l'apprentissage UCB.

PDR selon la taille du réseau

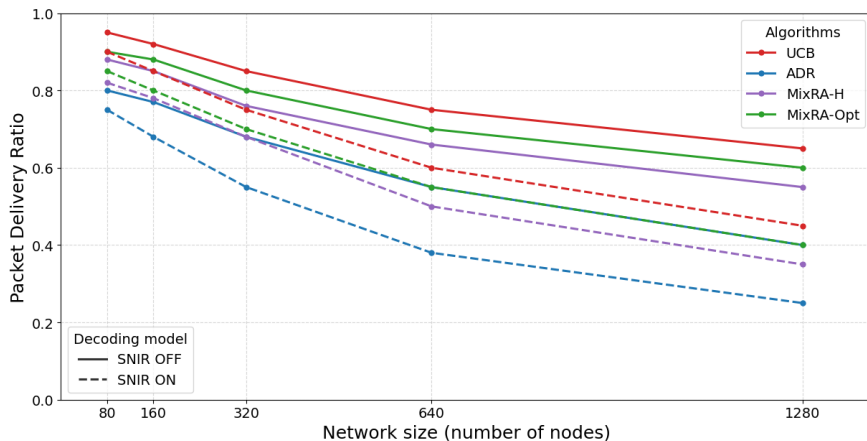


Figure 8 – PDR selon la taille du réseau pour UCB, ADR, MixRA-H et MixRA-Opt.

Throughput et DER

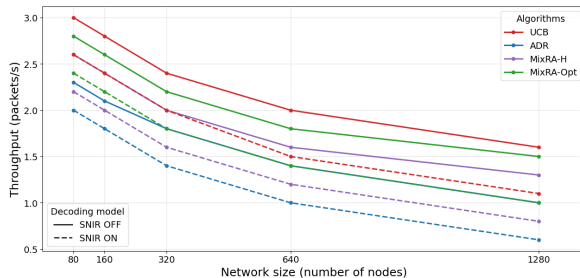


Figure 9 – Throughput selon la taille du réseau.

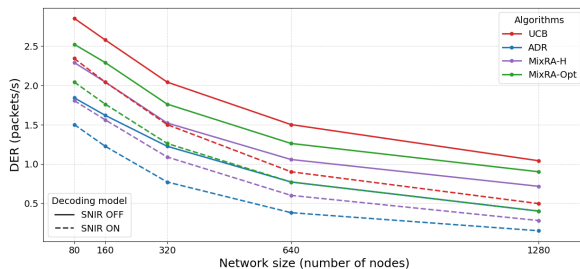


Figure 10 – DER selon la taille du réseau.

Distribution des SF

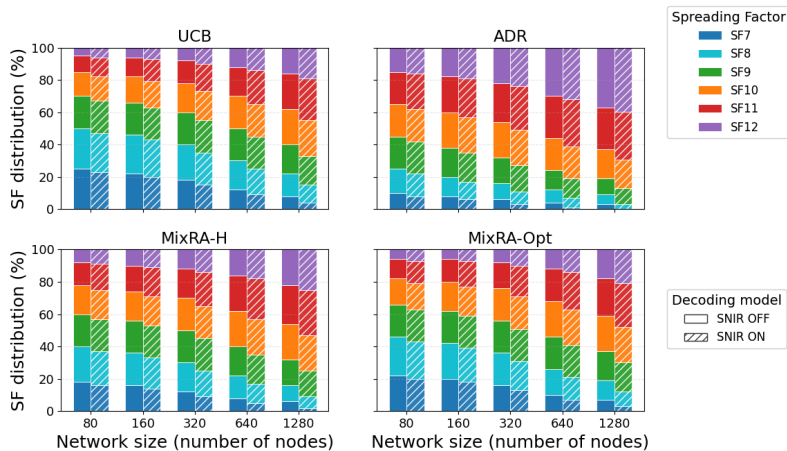


Figure 11 – Distribution des SF sélectionnés selon les algorithmes.

MOSFARI : adaptation sous mobilité

- Les nœuds mobiles rendent les mesures historiques rapidement obsolètes.
- MOSFARI utilise un feedback binaire : paquet reçu ou paquet perdu.
- Il n'utilise pas directement RSSI, SNR, SNIR ou position.
- L'objectif est de proposer une adaptation légère et embarquable.

Indice UCB utilisé

Indice de sélection

$$\text{UCB}_a(t) = \hat{\mu}_a(t-1) + \sqrt{\frac{2 \ln t}{N_a(t-1)}}$$

Décision

$$a_t = \arg \max_{a \in \{7, \dots, 12\}} \text{UCB}_a(t)$$

PDR et DER sous mobilité

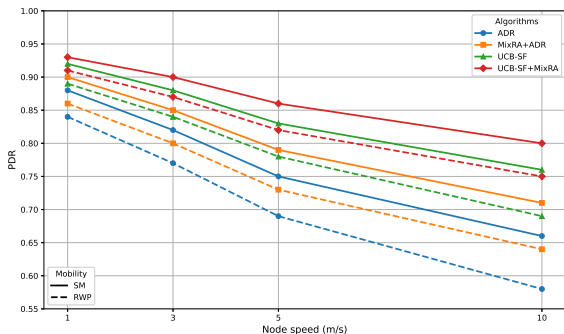


Figure 12 – PDR sous mobilité.

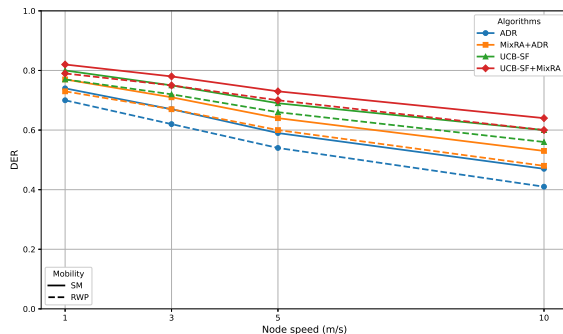


Figure 13 – DER sous mobilité.

Distribution SF selon la mobilité

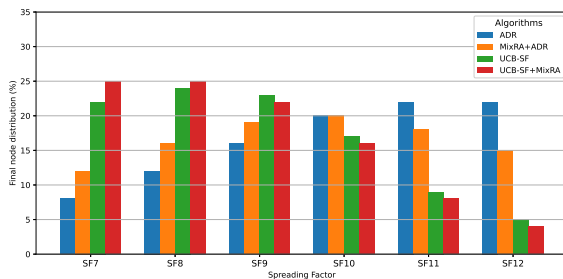


Figure 14 – Distribution SF avec Smooth Mobility.

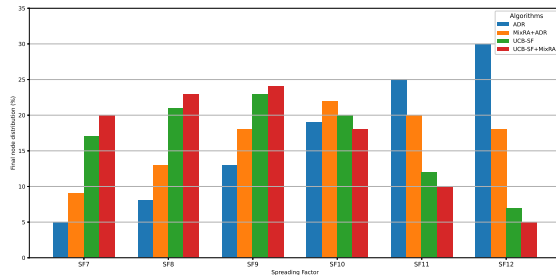


Figure 15 – Distribution SF avec Random Waypoint.

Synthèse des contributions

Travail	Idée	Apport	Limite
ADR amélioré	SF + puissance	Gain PDR/DER	Énergie à approfondir
LoRaFlexSim	Simulation flexible	Reproductibilité	Validation terrain
OSFARI	SNIR + UCB	Interférences réalistes	Extension mobilité
MOSFARI	Feedback binaire + UCB	Adaptation légère mobile	Feedback réel à intégrer

Résumé

L'adaptation dynamique du facteur d'étalement permet d'améliorer la fiabilité, la capacité et la robustesse des réseaux LoRaWAN.

Conclusion

- Nous avons présenté une synthèse de nos travaux sur l'adaptation dynamique des SF.
- L'ADR amélioré montre l'intérêt d'une réaction plus rapide.
- LoRaFlexSim permet une évaluation reproductible.
- OSFARI intègre les interférences via le SNIR.
- MOSFARI explore une adaptation légère sous mobilité.

Perspectives

- Coupler SF, puissance, canal et duty-cycle.
- Tester UCB glissant ou UCB discounté pour les environnements non stationnaires.
- Ajouter un mécanisme réaliste de feedback côté end-device.
- Étendre les validations aux scénarios multi-gateways.
- Préparer une expérimentation sur testbed LoRaWAN réel.

Merci pour votre attention !

Questions ?