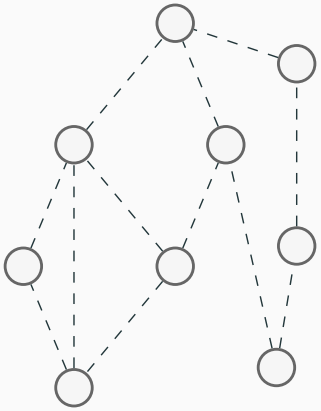
Routage efficace et garanti en réseaux de capteurs sans fils

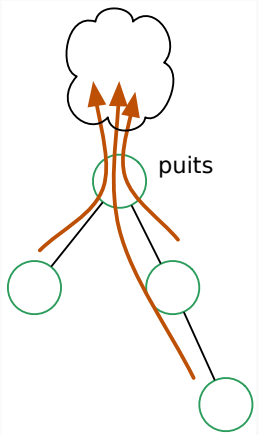
Henry-Joseph Audéoud

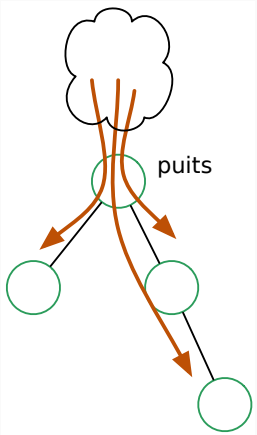
9 décembre 2019

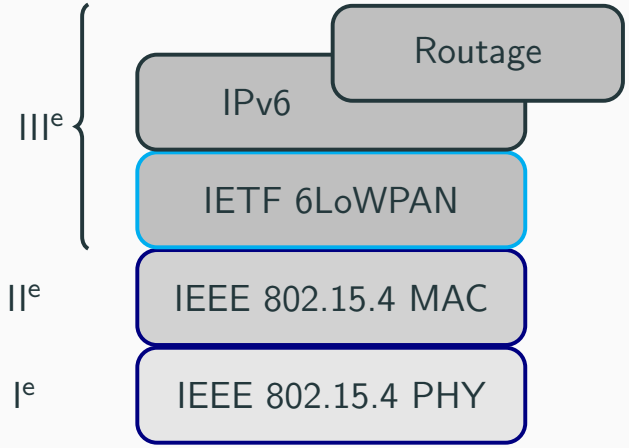
Univ. Grenoble Alpes — LIG

Réseaux de capteurs sans fil

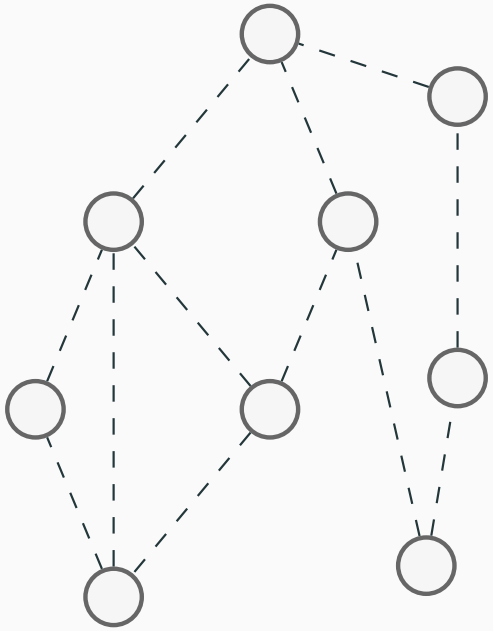




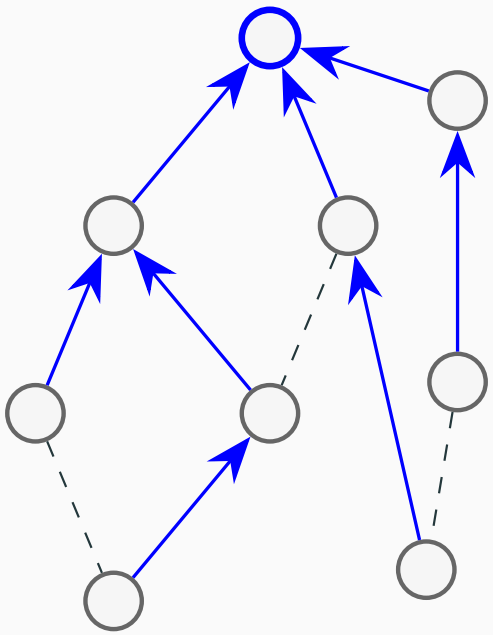




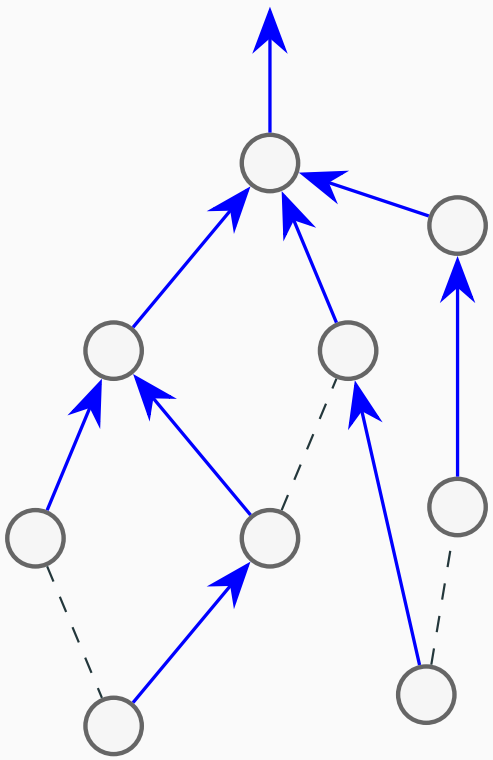
[Introduction] Routage



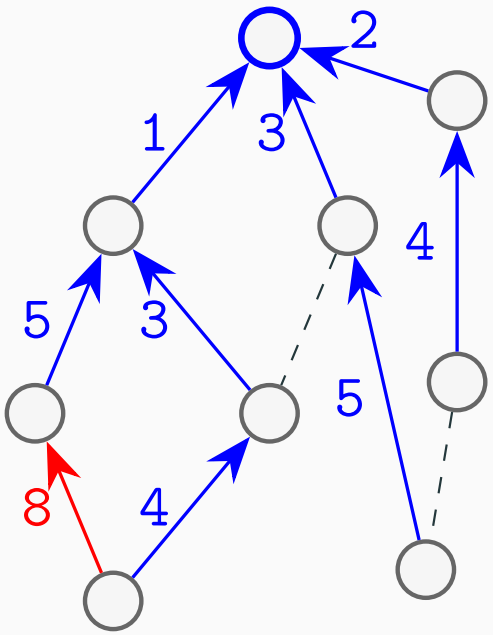
[Introduction] Routage



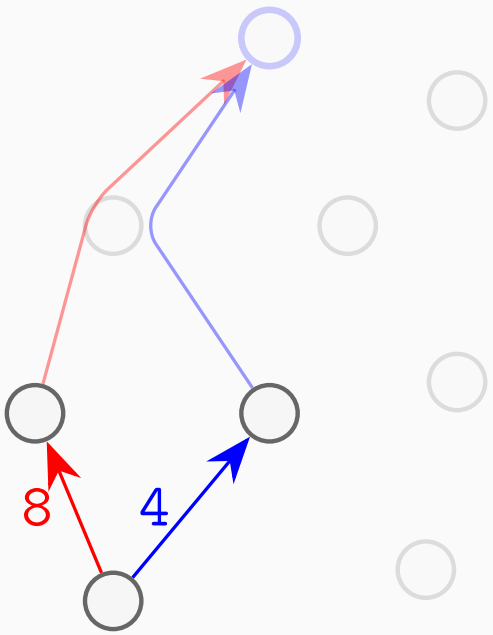
[Introduction] Routage



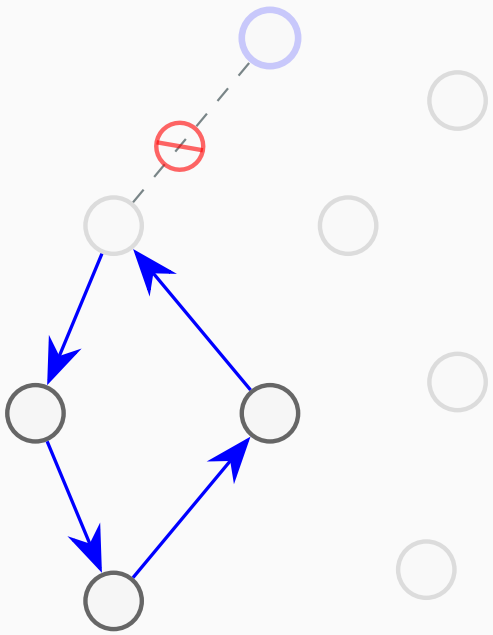
[Introduction] Routage



[Introduction] Routage

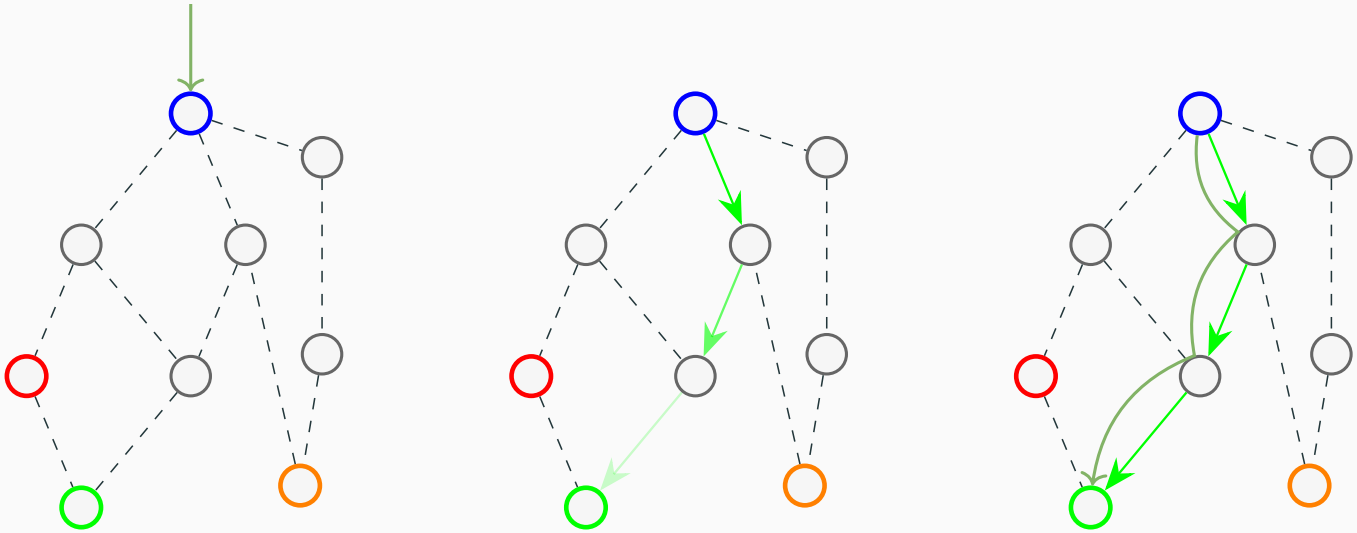


[Introduction] Routage

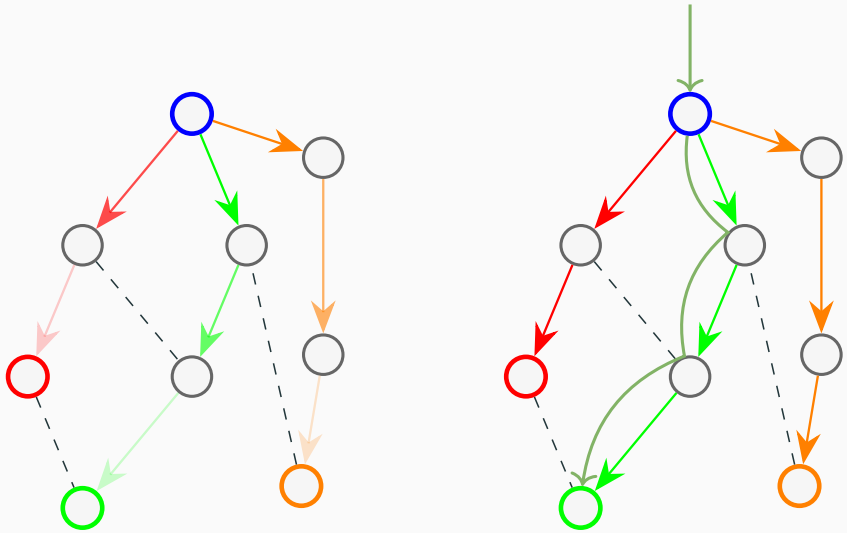


[Introduction] Routage

Réactif



Proactif



Plan

LRP, *The Lightweight Routing Protocol*

Estimation précise et rapide de la qualité d'un lien

LRP, *The Lightweight Routing Protocol*

Routage **efficace** et **garanti** en **réseau de capteurs sans fil**

Collecte / Distribution

Expériences

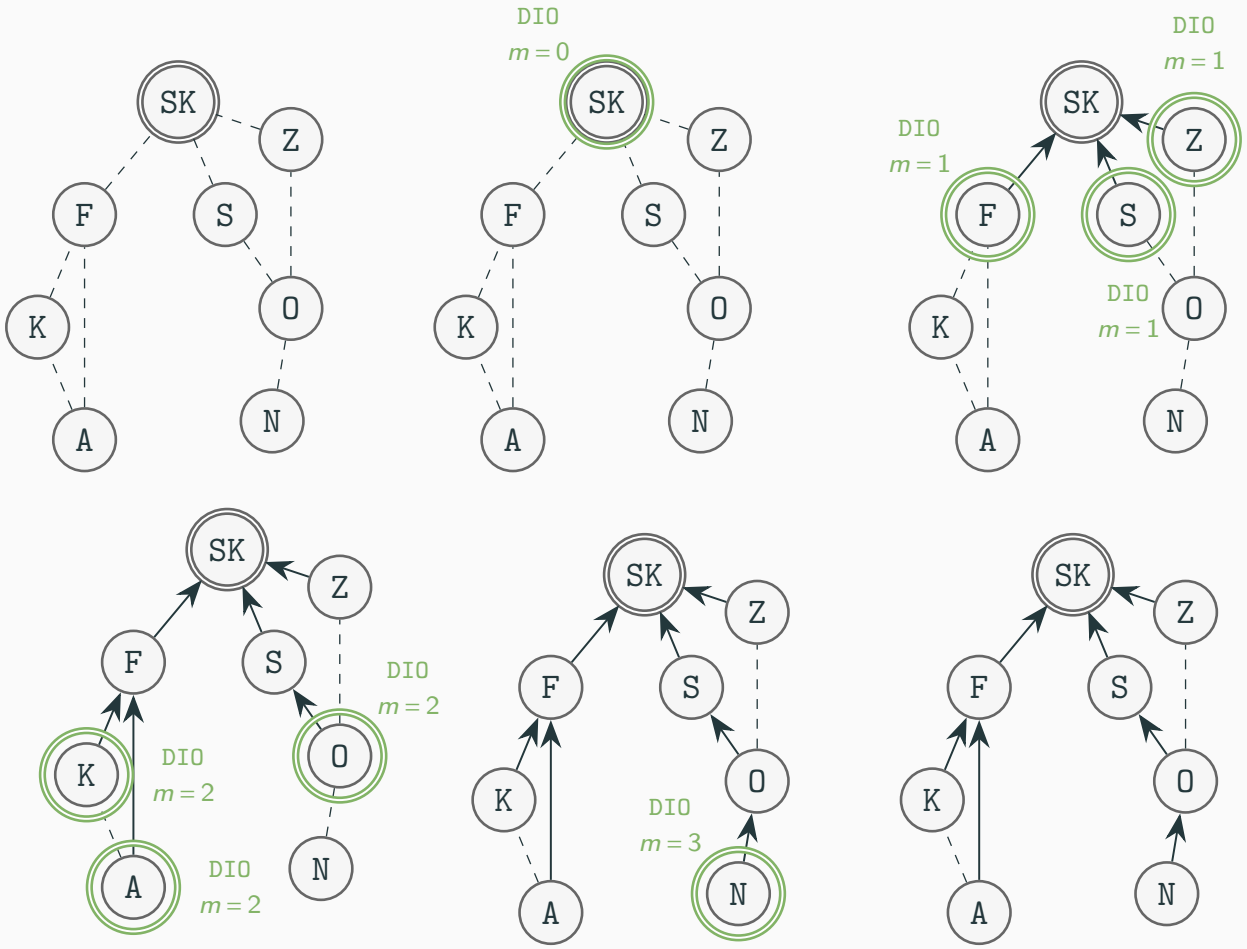
Validation de l'acheminement

Asymétrie

Comparaison avec RPL et AODV/LOADng

	RPL	**LRP**	**AODV LOADng**
Arbre de collecte	Proactif (DIS/DIO)	Proactif (DIO)	
		Réactif (BRK/UPD)	
Routes d'hôte	Proactif (DAO)	Proactif (RREP)	
		Réactif (RREQ/RREP)	Réactif (RREQ/RREP)
Validation de l'acheminement	En-tête	Règles	n/a

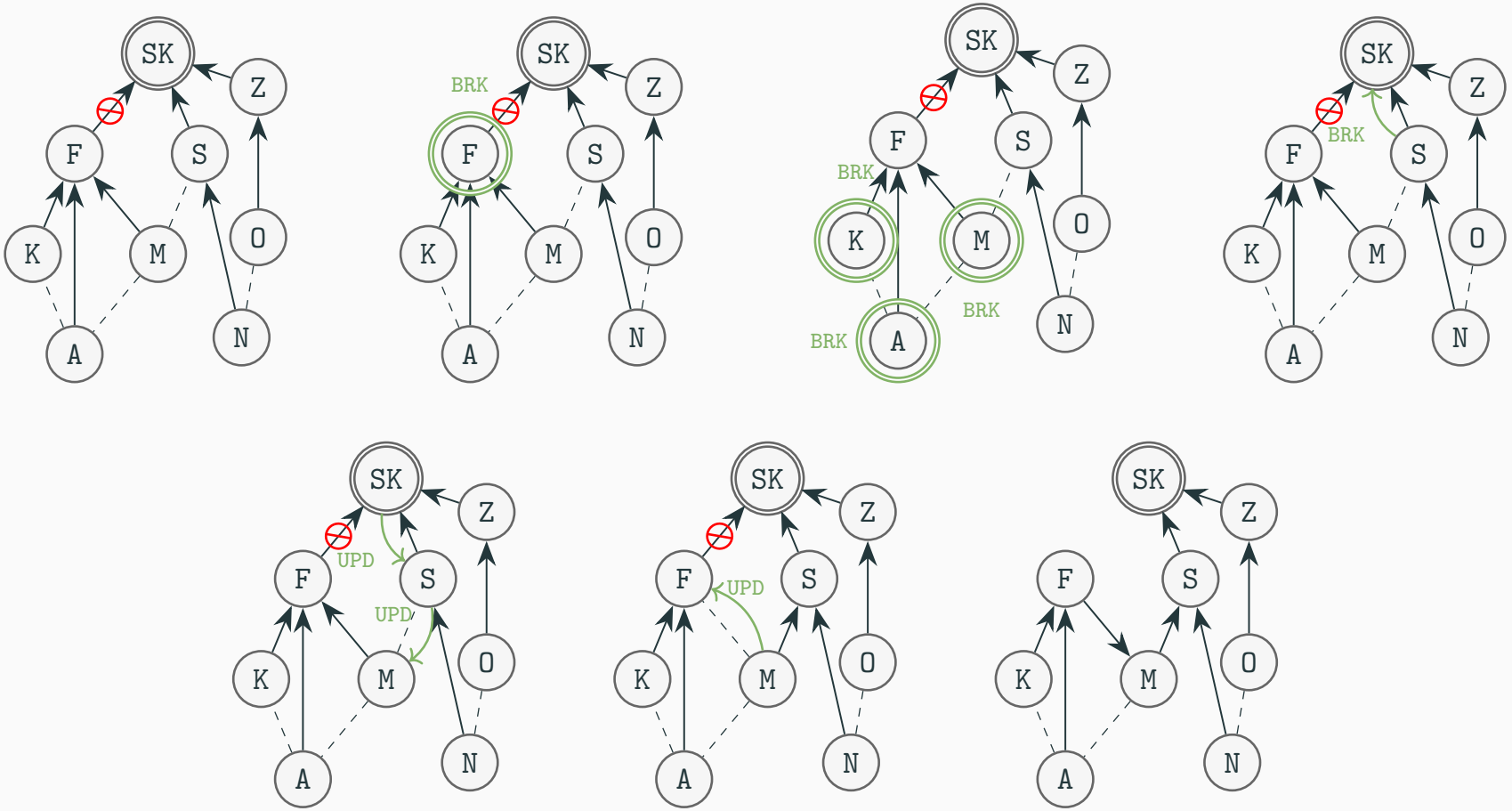
[Collecte] Construction de l'arbre de collecte



- Avec numéro de séquence
- Proactif (analogue à RPL)
- Réparation globale

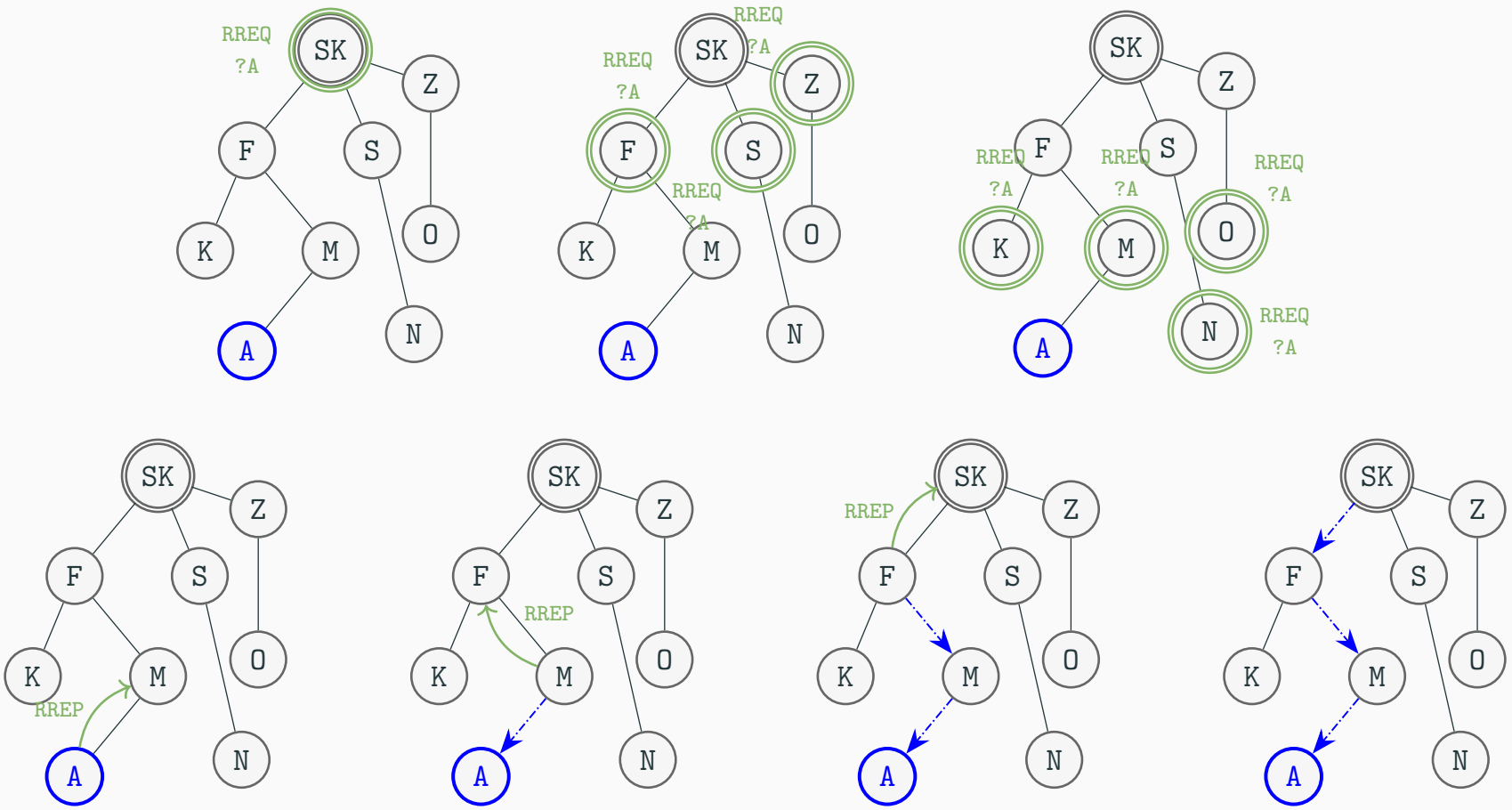
✓/✗ Initiée par le puits

[Collecte] Réparation locale [WiMob][ITC29]



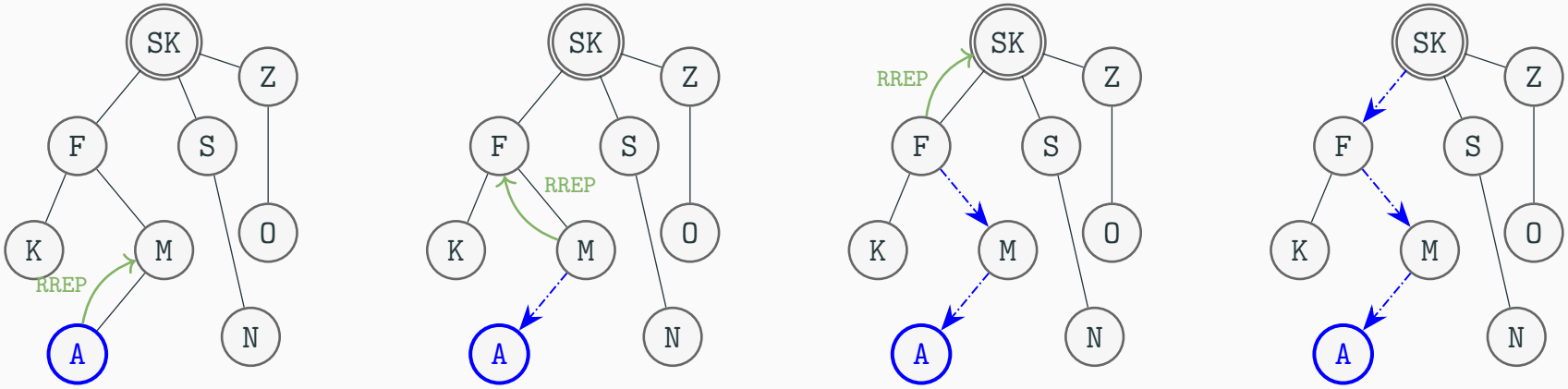
- Réactif
- ✓ Impact local
- ✓ Recherche par anneau grandissant
- ✗ Pas de plus court chemin pour le sous-arbre

[Distribution] Établissement des routes d'hôtes (réactif)



- Réactif (analogue à AODV) ✓/✗ Initié **par le puits**

[Distribution] Établissement des routes d'hôtes (proactif)



- Proactif
  (presqu'analogue à RPL)

✓/✗ Initié **par l'hôte**

Expériences

Implémentation

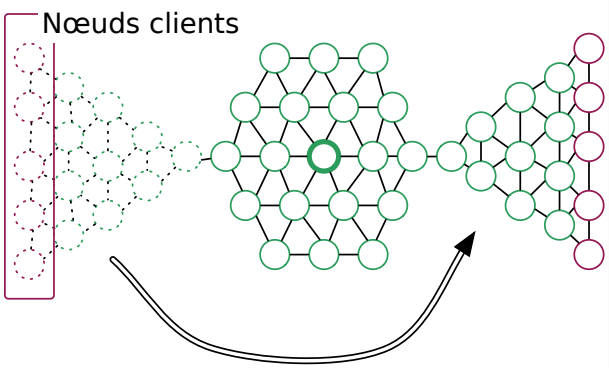
- Contiki-OS
- Comparaison avec RPL

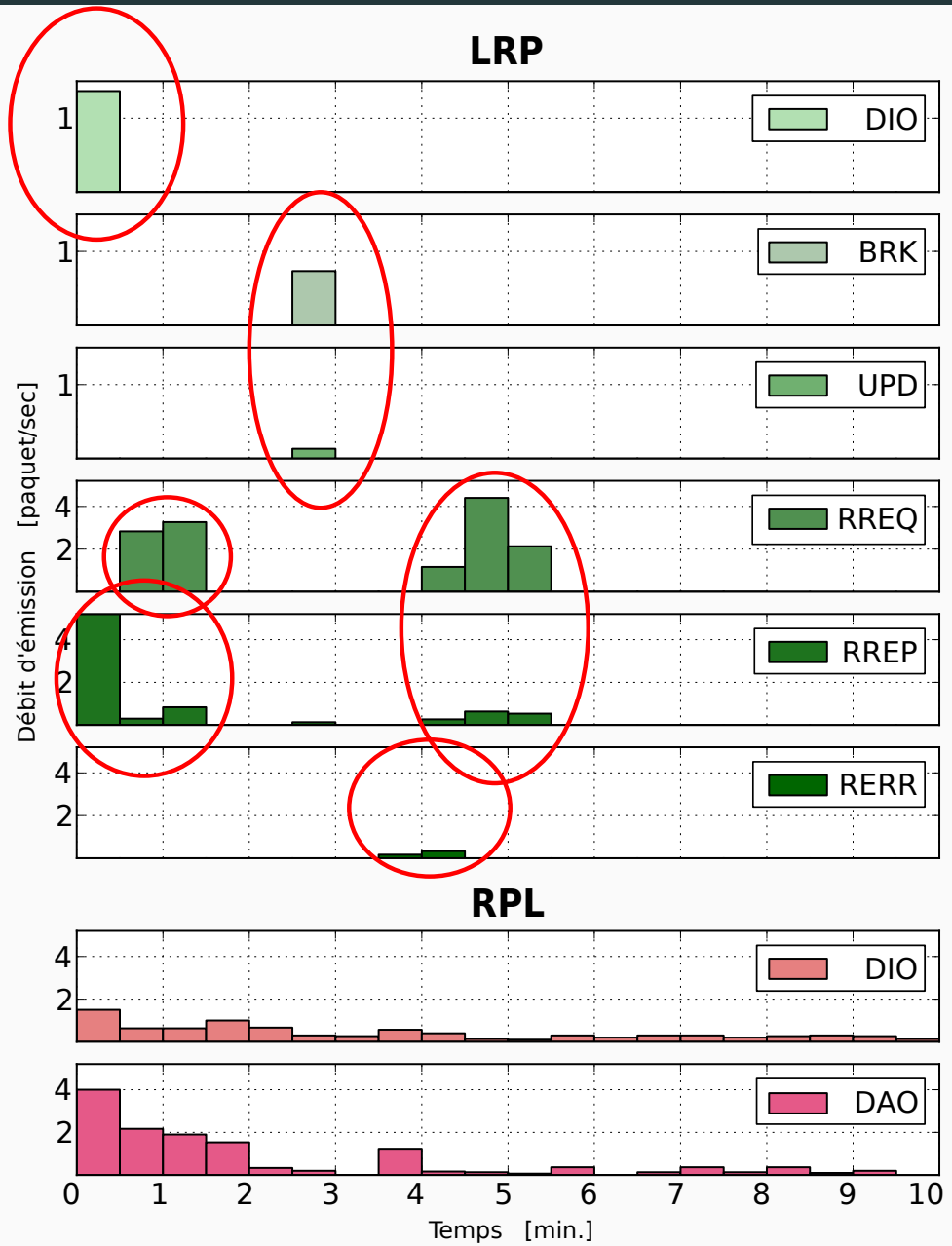
Expériences

- Essais sur simulateur : Cooja
- Expérimentations en plateforme réelle : FIT/IoT-LAB

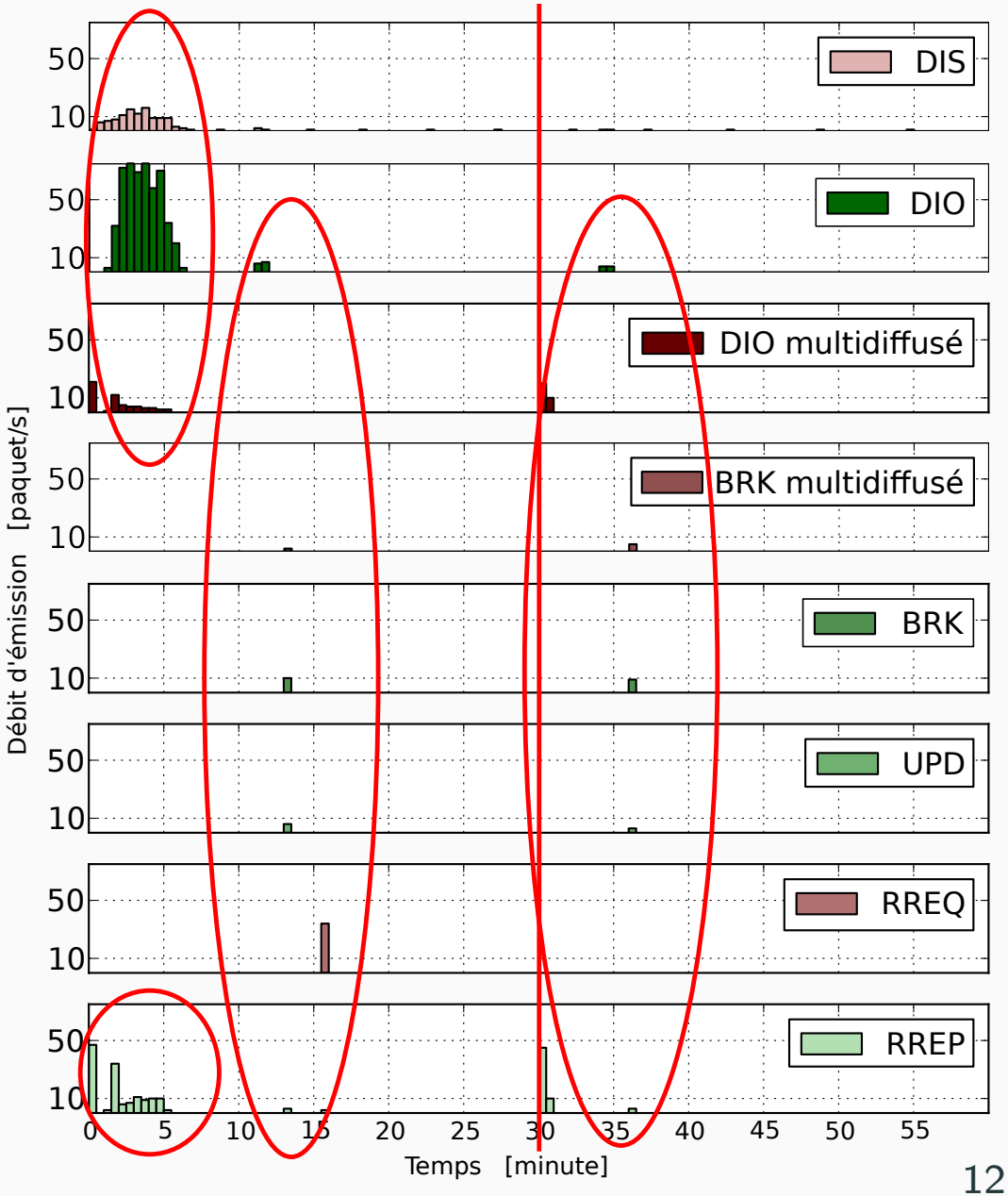
[Simulation] Réparation locale [WiMob]

- Simulation avec **Cooja**
- 34 nœuds + 1 puits
- Déplacement d'un sous-arbre à $t = 1\,\text{min}\ 40\,\text{s}$





- Expérimentation sur le banc de test d'**IoT-LAB**
- 35 nœuds & 60 minutes
- Métrique *hop count*

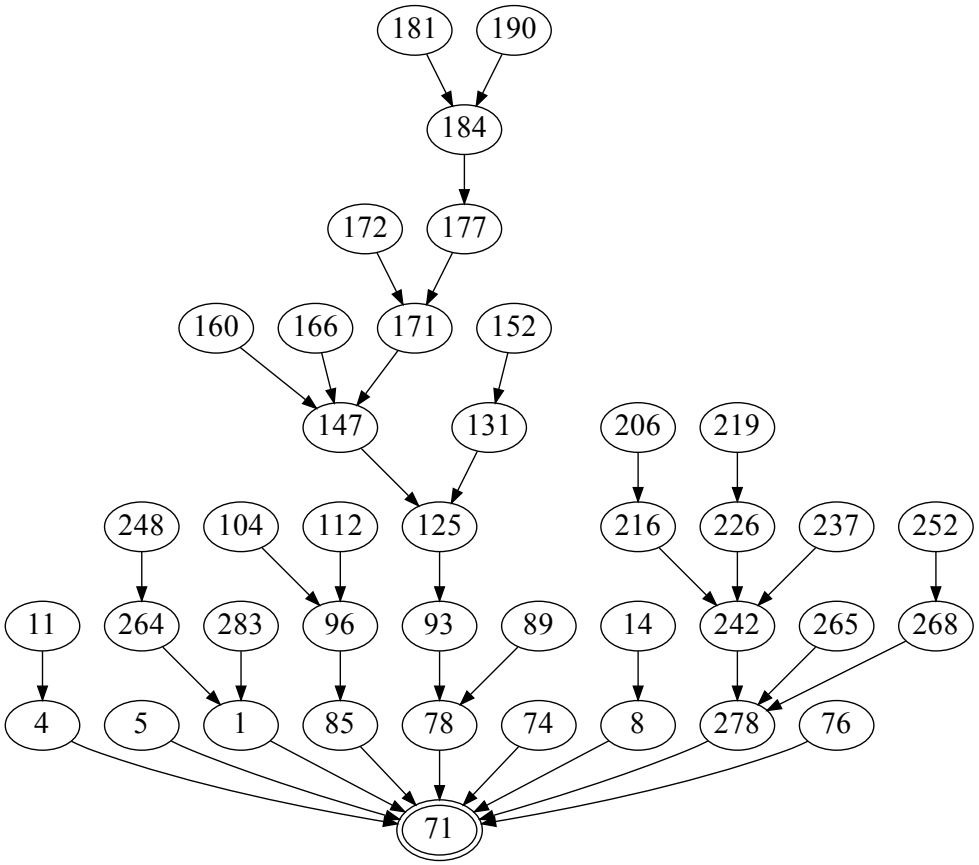


[Expérimentation] Trafic de contrôle (i) [ITC29]

- IoT-LAB (Grenoble)

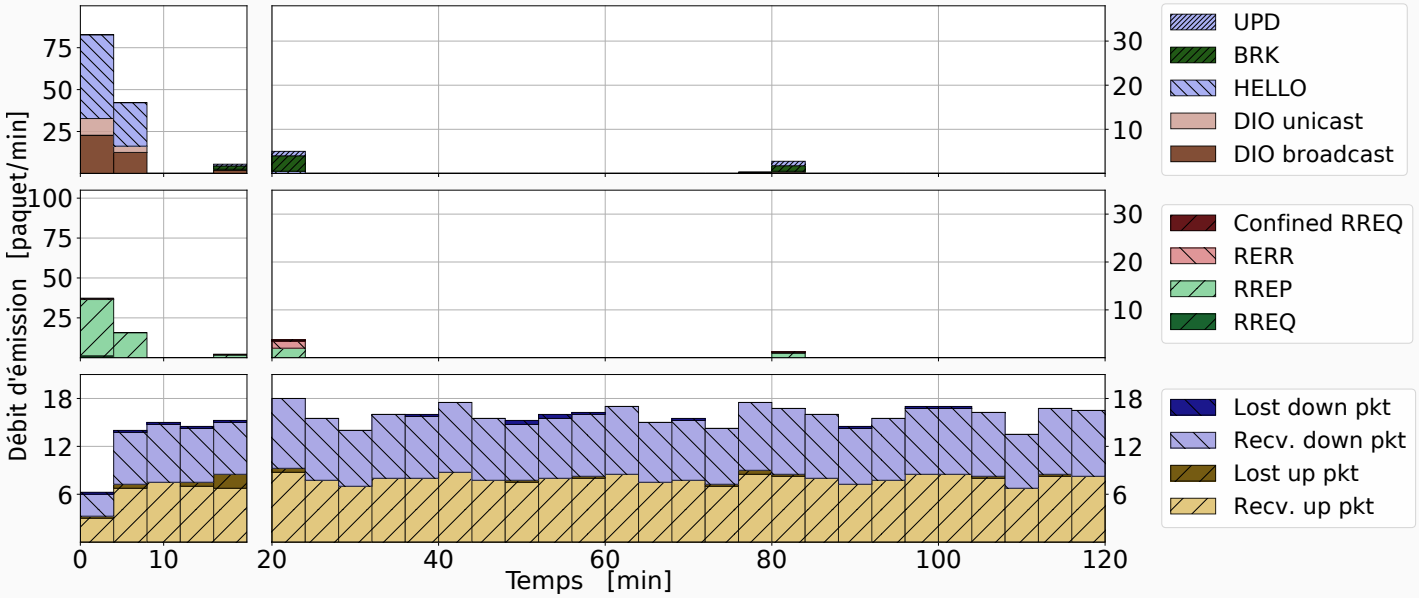
- 41 nœuds &
  2 heures

- Trafic de données
  collecté & distribué :
  1 échange par nœud
  aller-retour toutes les
  5 minutes

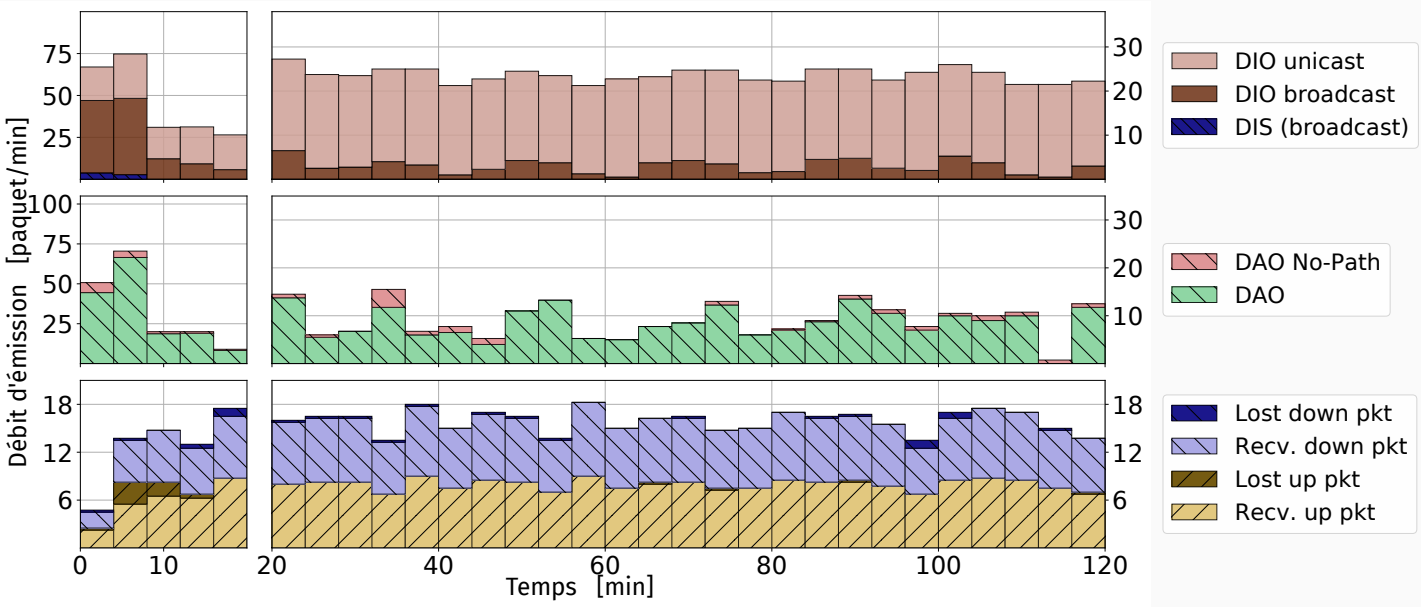


- RPL & LRP

[Expérimentation] Trafic de contrôle (ii) [ITC29]

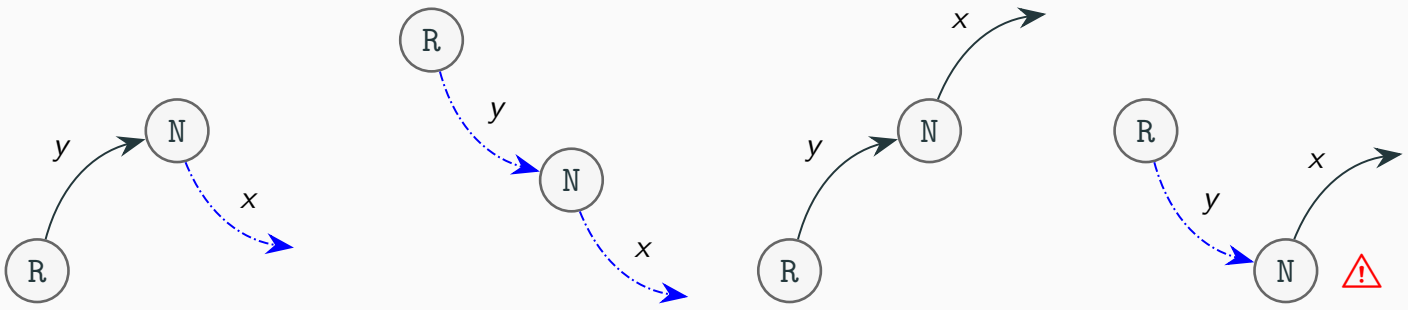


LRP



RPL

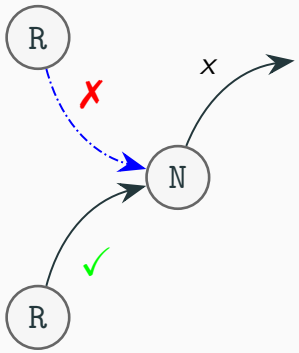
Question : comment **garantir** l'absence de boucles ?



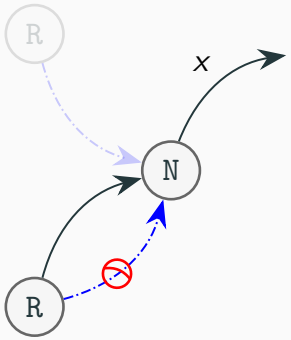
Entre capteurs Distribution Collecte ??

$$x \prec y \overset{\text{def}}{\iff} x.\texttt{plen} > y.\texttt{plen} \lor$$
$$x.\texttt{plen} = y.\texttt{plen} \land (x.\texttt{seq} > y.\texttt{seq} \lor$$
$$x.\texttt{seq} = y.\texttt{seq} \land x.\texttt{c} < y.\texttt{c})$$

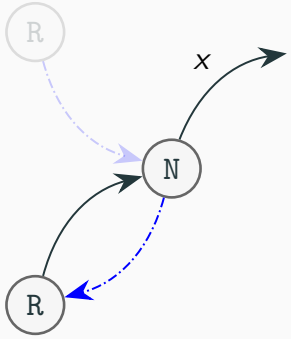
[Acheminement] Détection d'une boucle (ii) [WiMob]



1. Suppression des routes d'hôtes vers son successeur

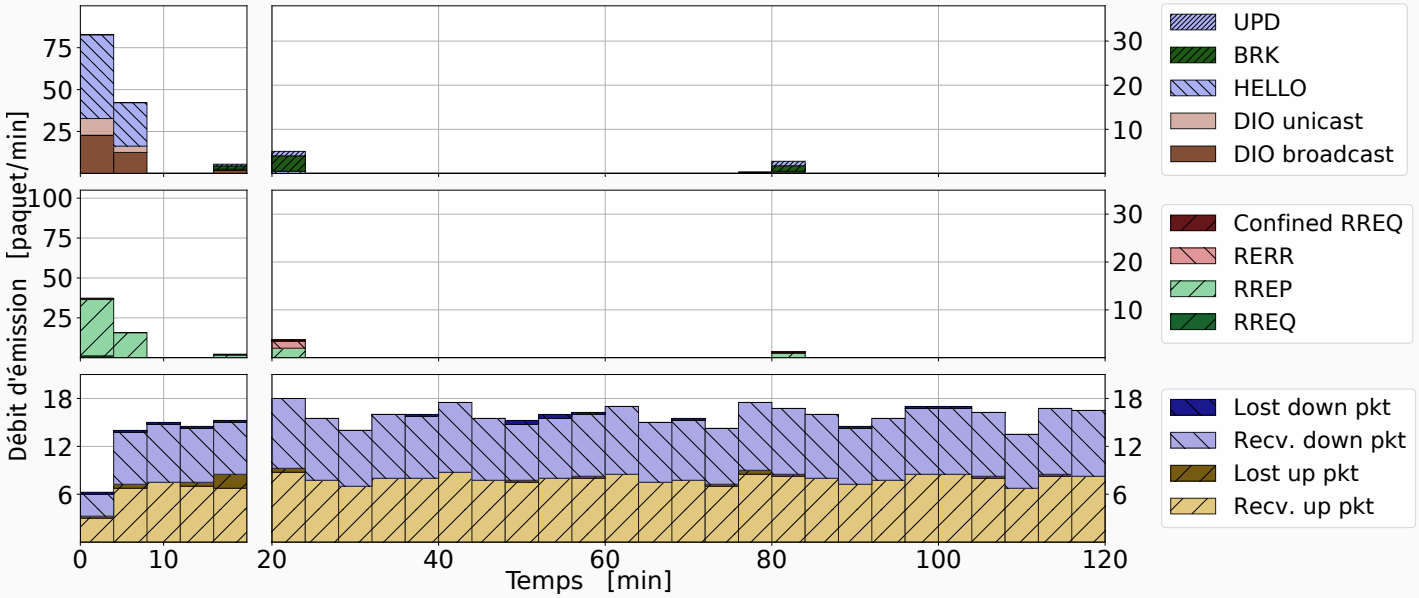


2. Vérifier que l'émetteur est un prédécesseur

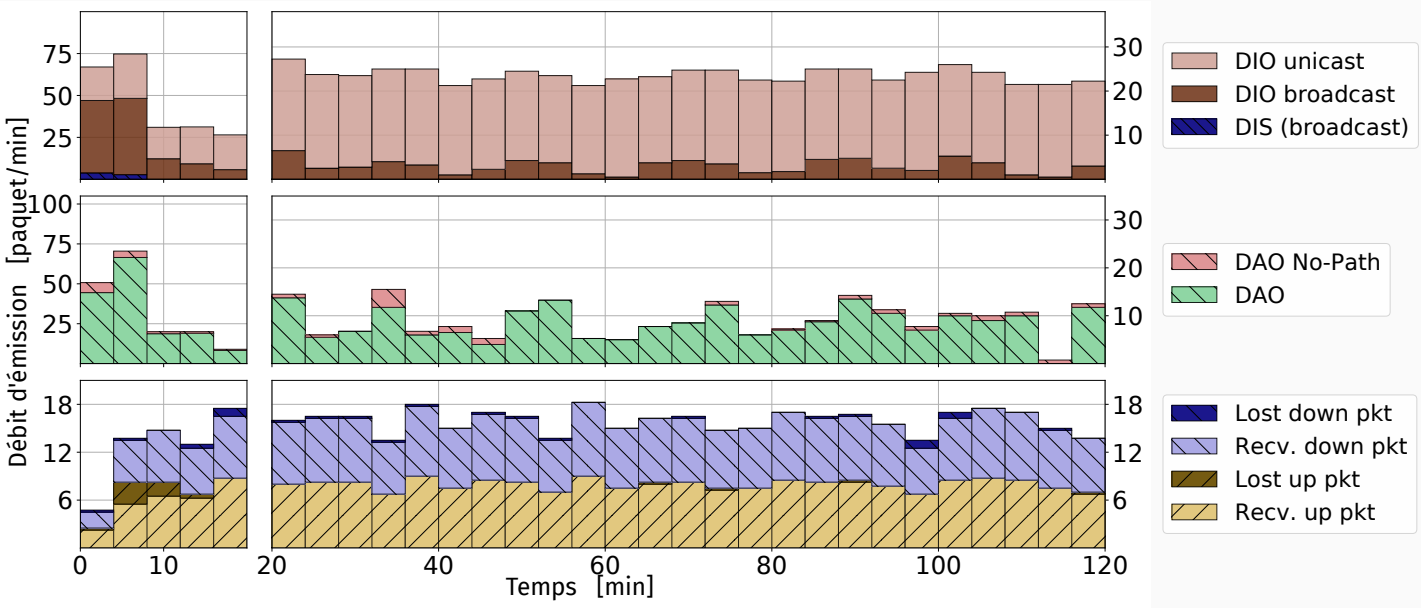


Validation de l'acheminement
sans surcharge de contrôle ou de données

[Expérimentation] Trafic de contrôle (ii) [ITC29]

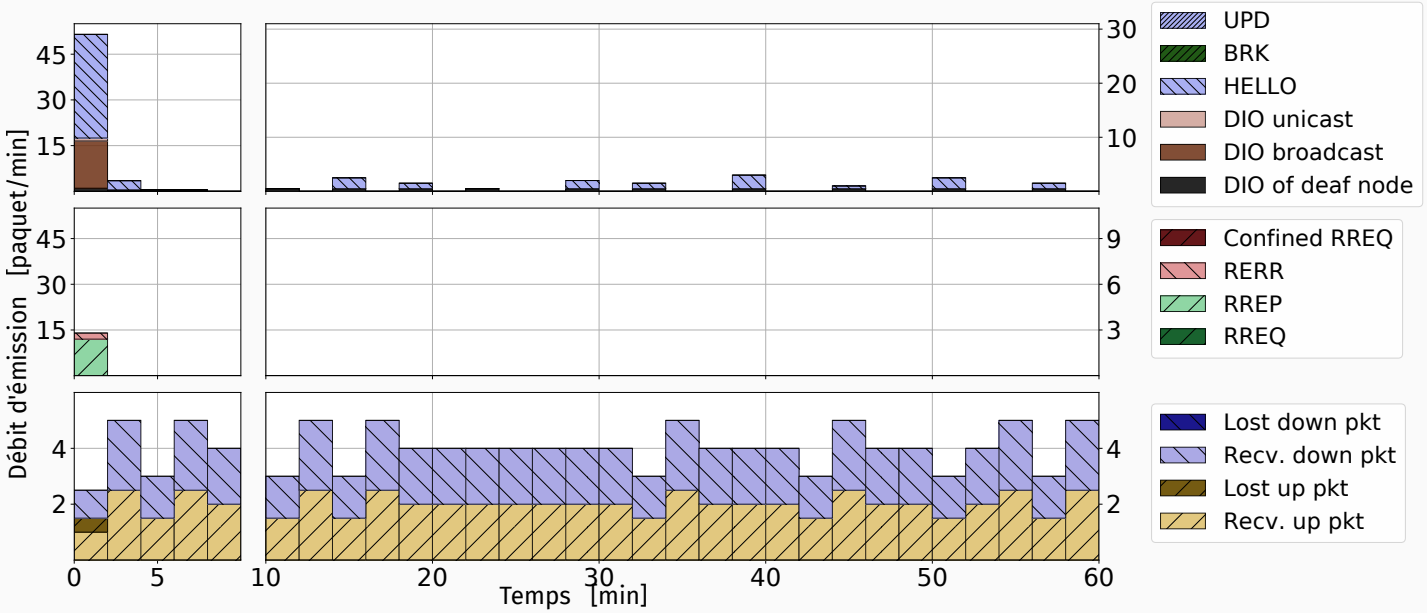


LRP

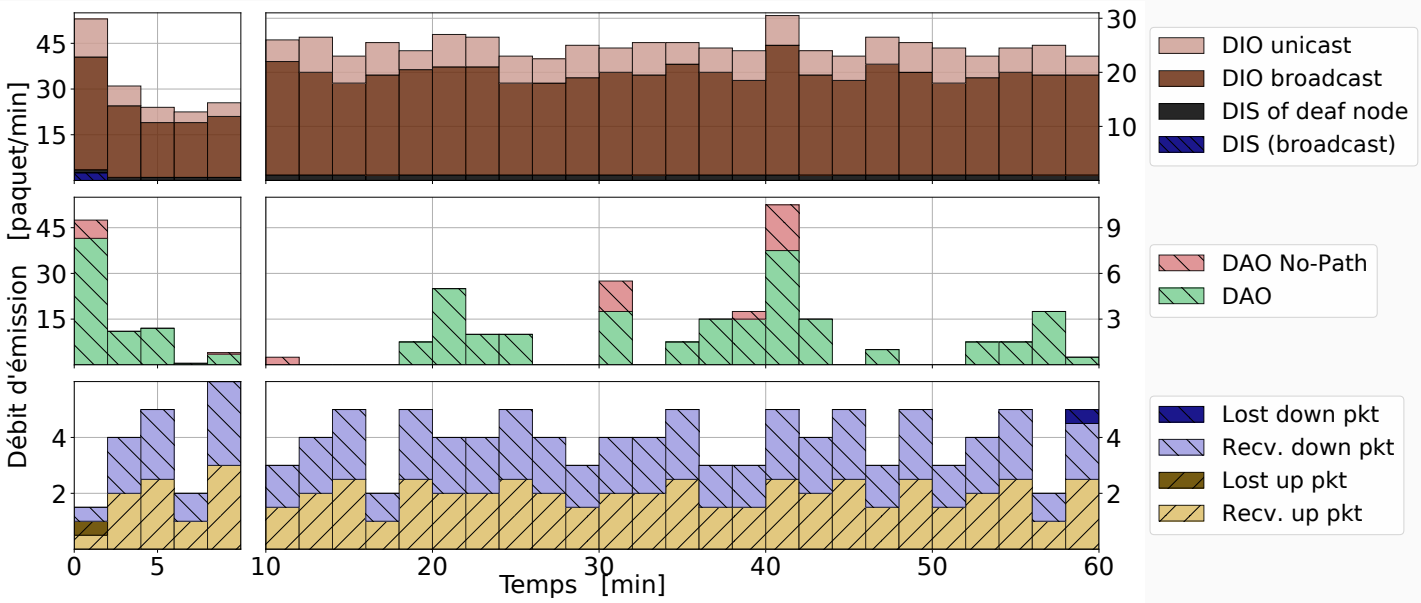


RPL

[Assymétrie] [ITC29]



LRP



RPL

[LRP] Synthèse

LRP : routage **efficace** et **garanti** pour les **réseaux de capteurs sans fil**

- Testé expérimentalement
- Optimisations des routes après réparation locale ?

En-dessous du routage : qualité des liens sous-jacents ?

Estimation précise et rapide de la qualité d'un lien

Estimation précise et rapide de la qualité d'un lien

Objectif : indiquer à l'algorithme de routage le PER des liens

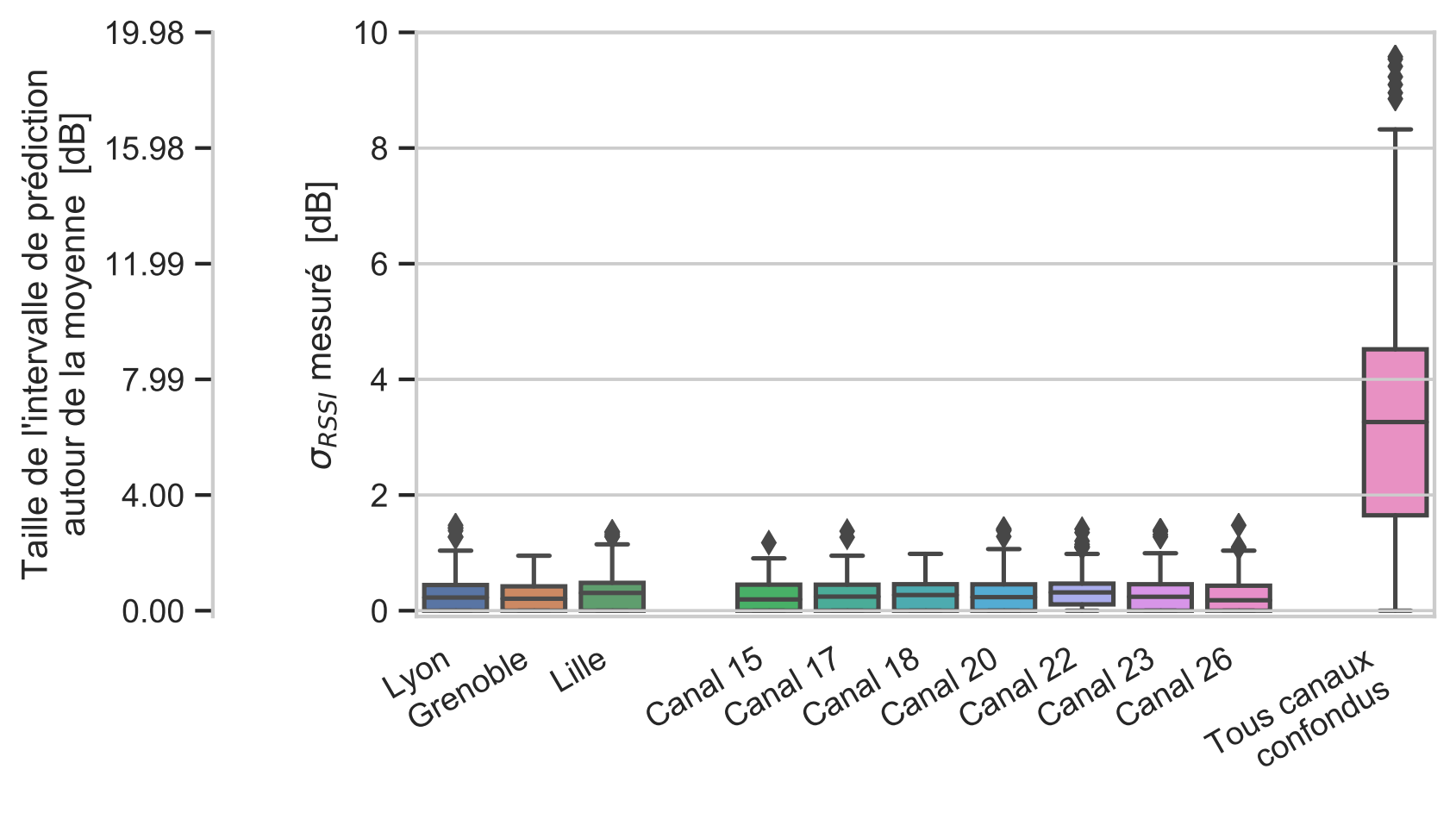
- Efficacité énergétique
- Exactitude
- Réactivité
- Stabilité

Baccour et al., "Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks : A survey", *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2012

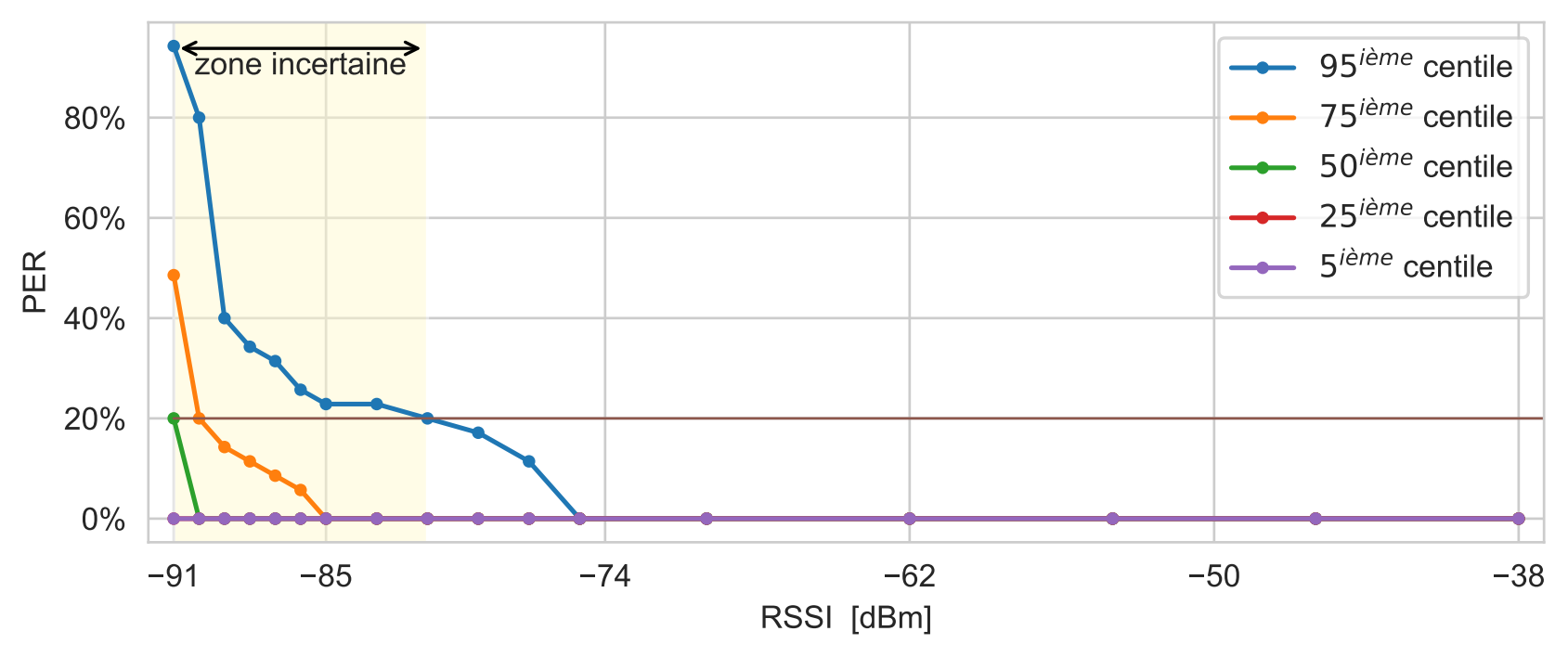
[RSSI] Description

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*, ou *Energy Detection*)

> *Estimation de la puissance du signal reçue dans la largeur de bande du canal. Aucune tentative n'est faite pour identifier ou décoder les signaux.* — *IEEE 802.15.4*


Taille de l'intervalle de prédiction autour de la moyenne [dB]
19.98
15.98
11.99
7.99
4.00
0.00
σ_{RSSI} mesuré [dB]
10
8
6
4
2
0
Lyon
Grenoble
Lille
Canal 15
Canal 17
Canal 18
Canal 20
Canal 22
Canal 23
Canal 26
Tous canaux confondus

[RSSI] Estimation du PER [WONS]

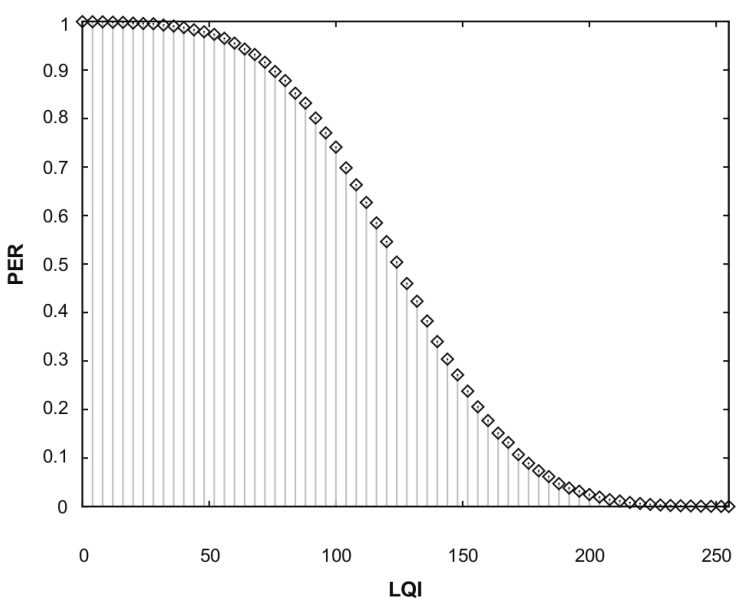


[LQI] Définition

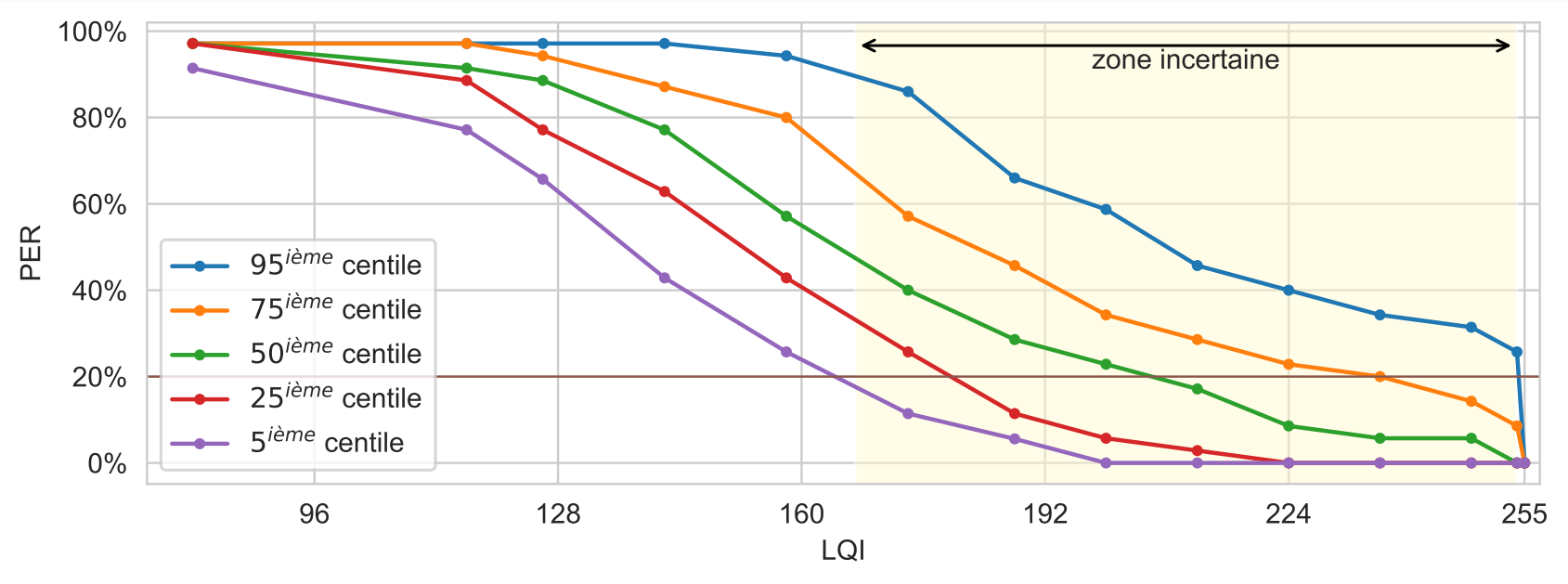
LQI (*Link Quality Indicator*)

Caractérisation de la puissance et/ou de la qualité de réception d'un paquet. — *IEEE 802.15.4*

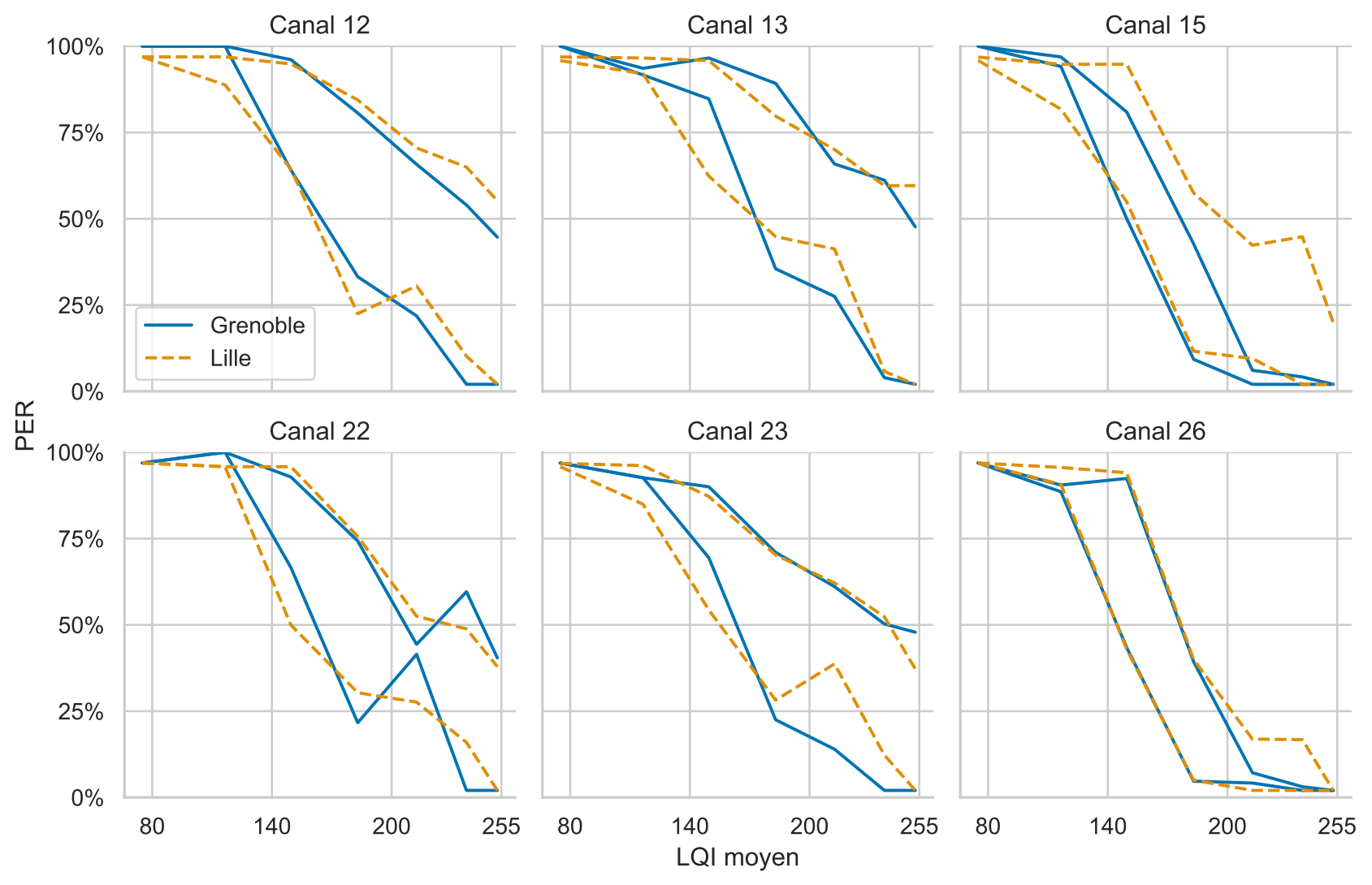
[...] résultat de corrélation de plusieurs symboles dans une trame. — *AT86RF231*



[LQI] Estimation du PER [WONS]



[LQI] Estimation du PER en présence de bruit [WONS]



[SNR] Obtenir le PER à partir de mesures [...]

$$\mathrm{PER} = 1 - (1 - \mathrm{BER})^{\text{longueur du paquet}}$$

$$\mathrm{BER} = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k \binom{16}{k} e^{\left(20 \times \mathrm{SNR} \times \left(\frac{1}{k} - 1\right)\right)}$$

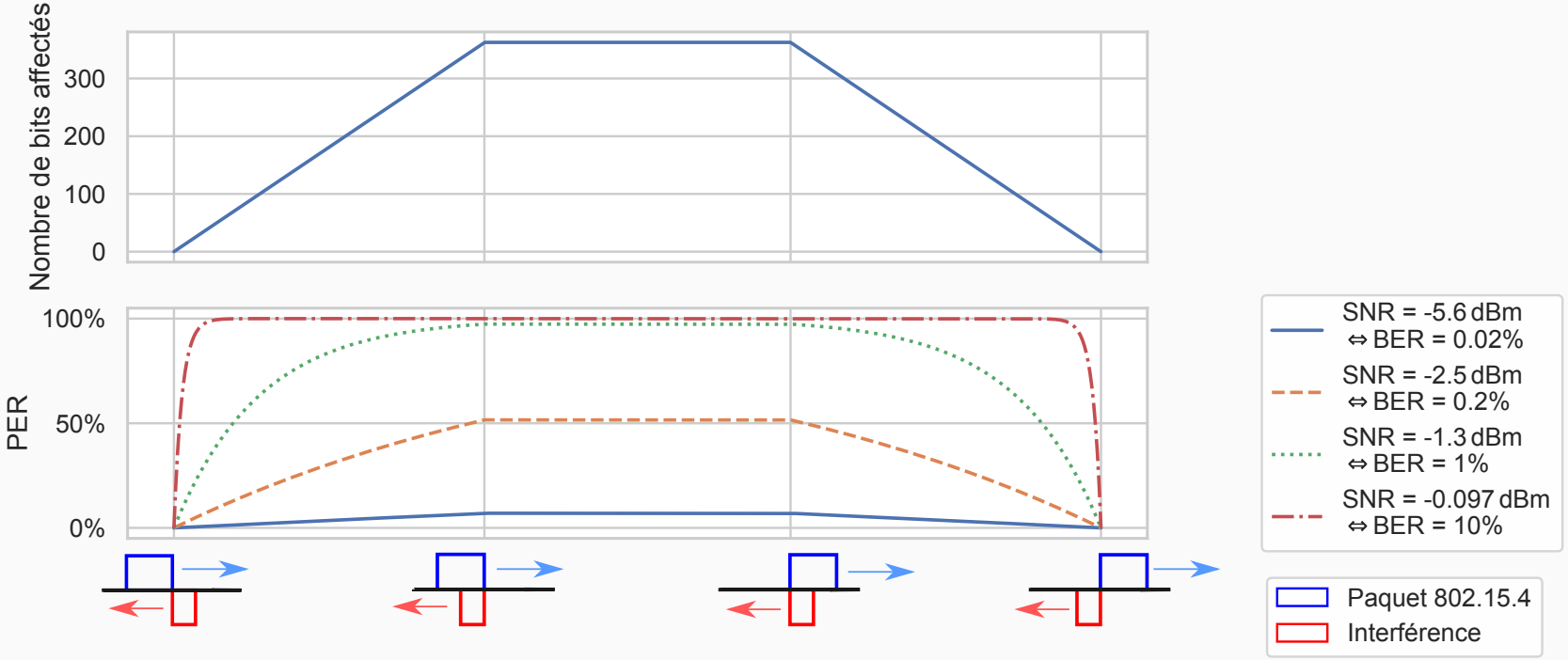
— IEEE 802.15.4

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{bruit}}}$$

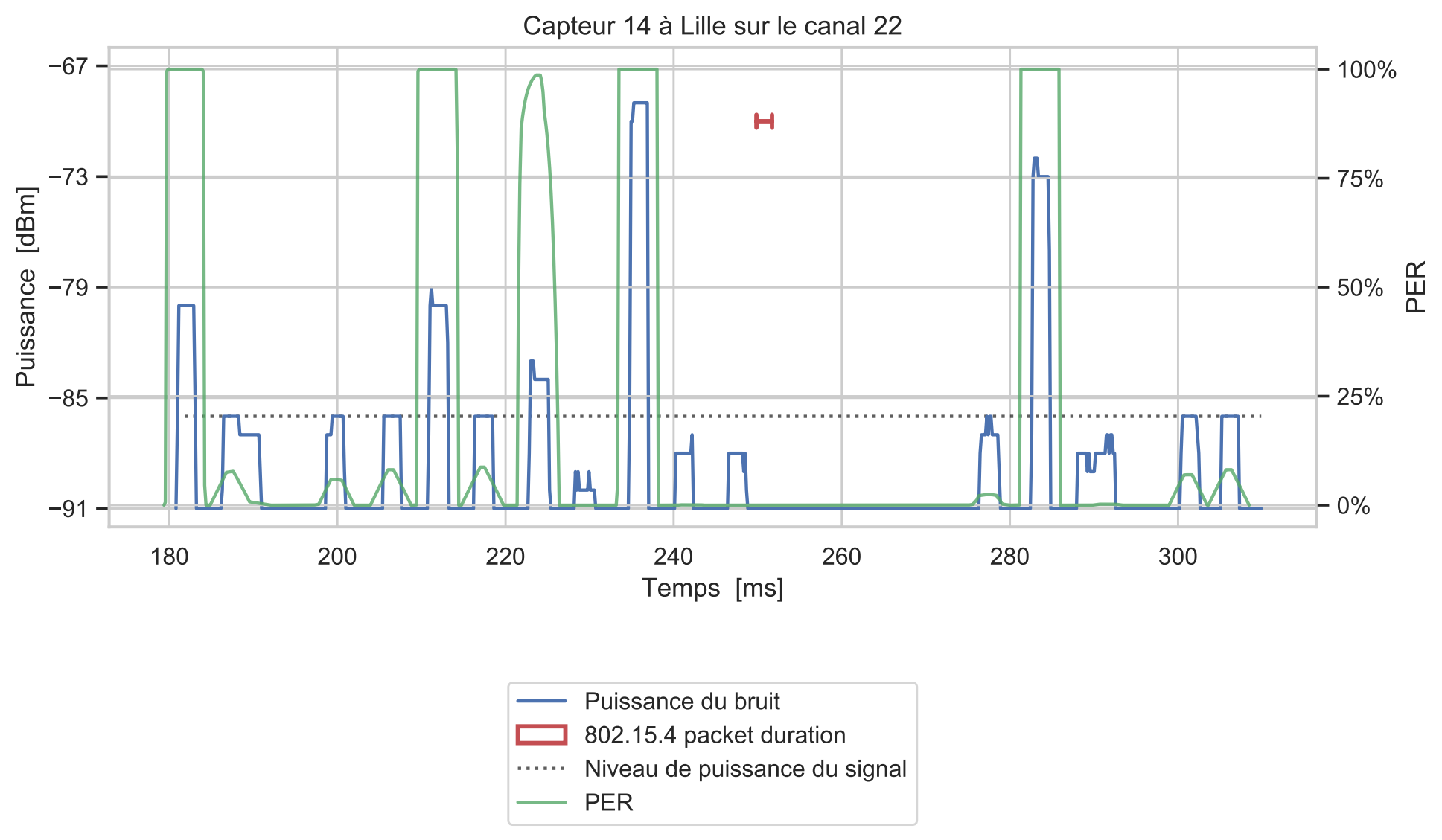
Double mesure :

- P_{signal} : mesuré avec le RSSI d'un paquet
- P_{bruit} : mesuré cycliquement sans surcharge énergétique (RNSI)

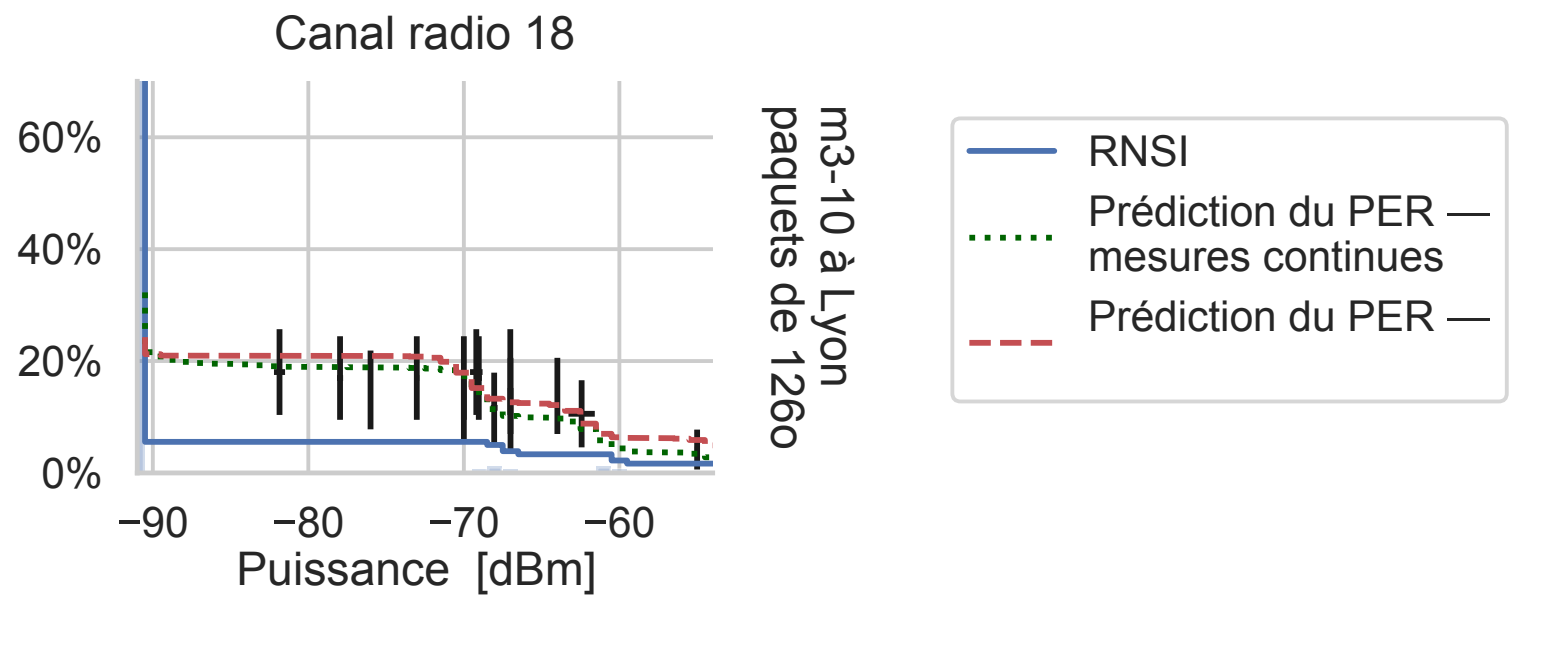
[SNR] Effet d'une collision [...]



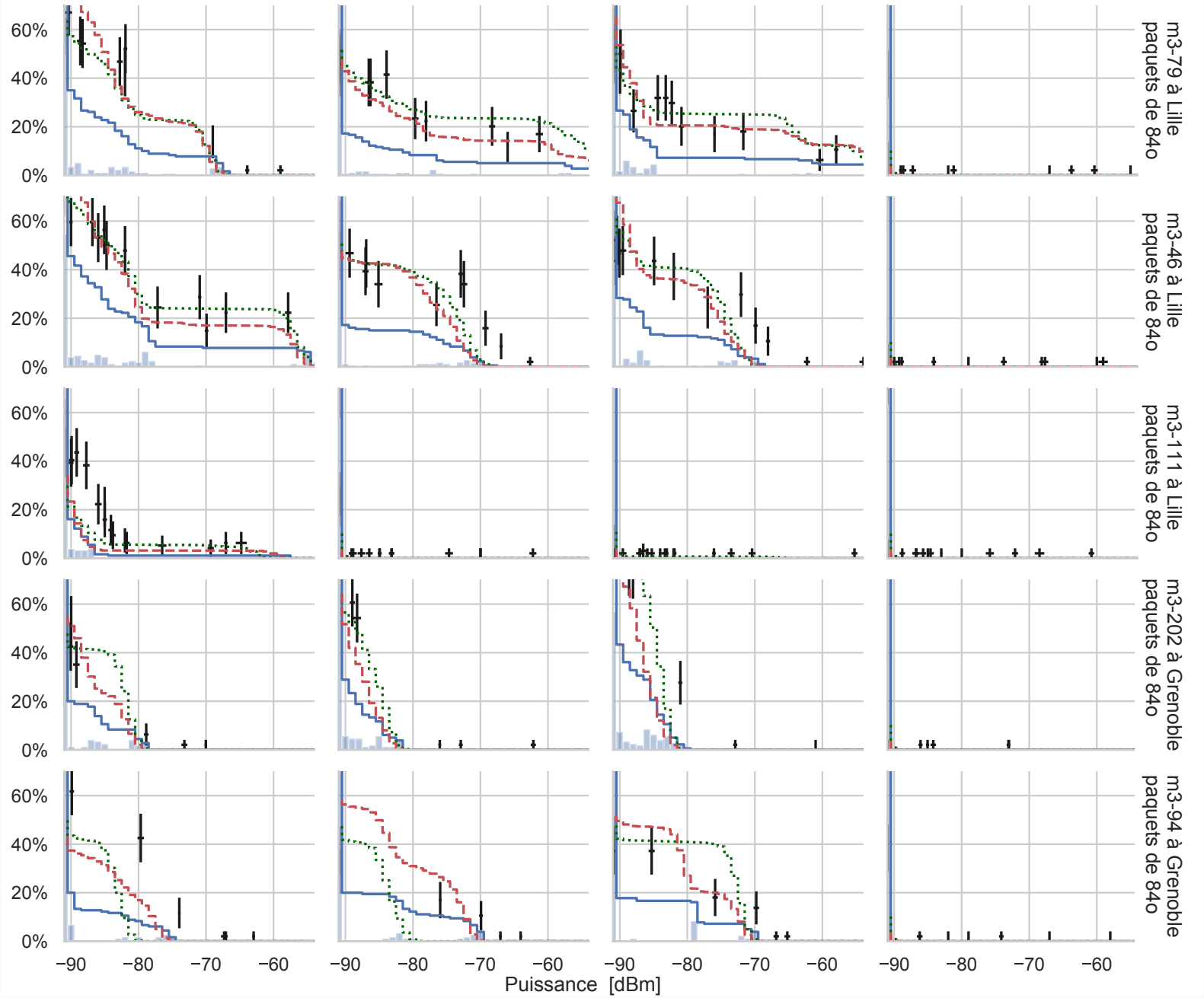
[SNR] Étude du bruit du canal [...]



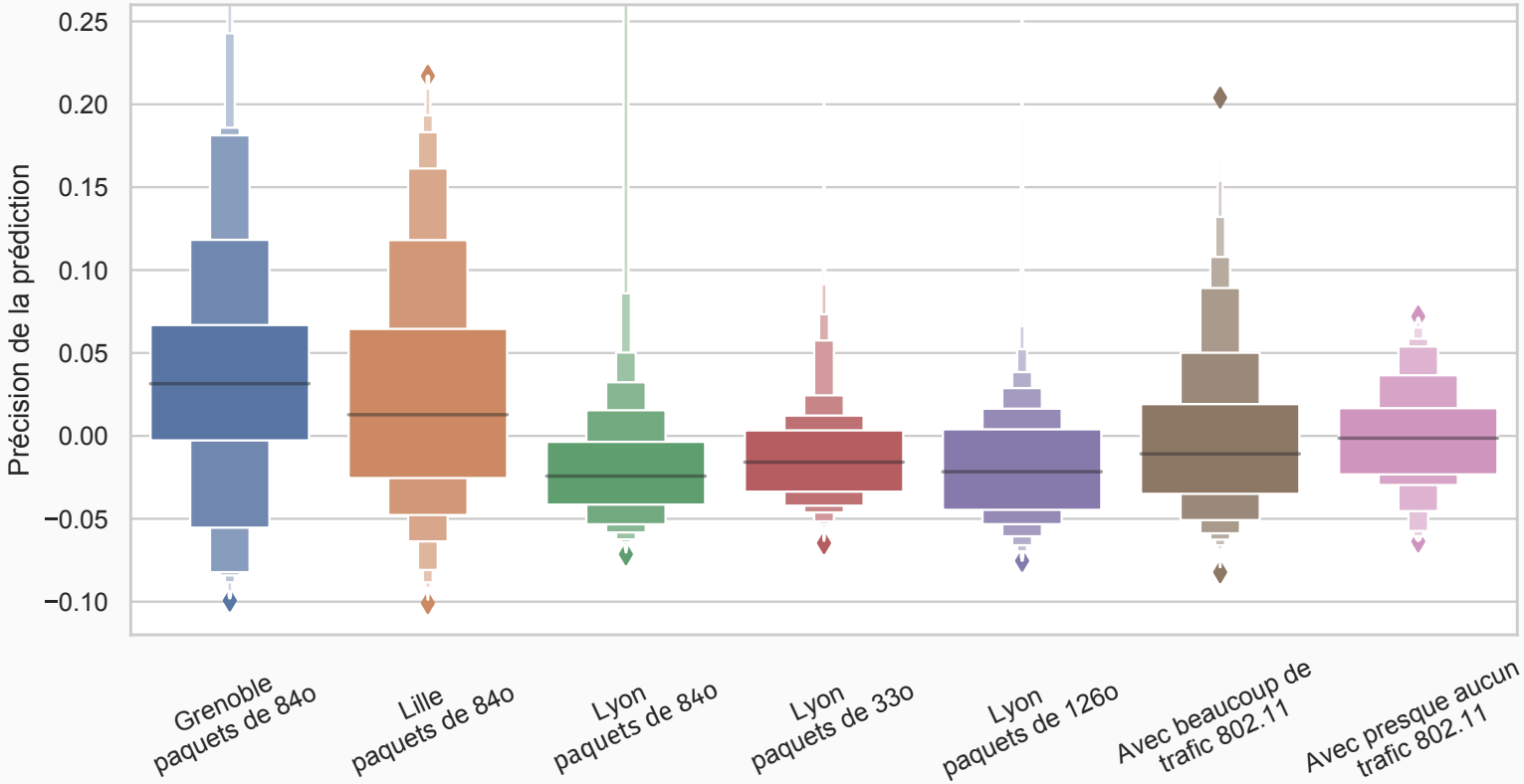
[SNR] Prédiction du PER (i) [...]



[SNR] Prédiction du PER (ii) [...]



[SNR] Précision de la prédiction [...]



[Qualité d'un lien] Synthèse

RSSI ✗ Dans le flou pour les liens avec faible RSSI

LQI ✗ Trop variable

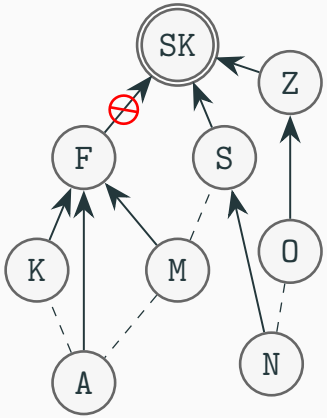
SNR
- ✓ **Précise** : ~ 10 pt-% de précision
- ✓ **Rapide** : (idéalement) un seul paquet suffit
- ✓ Adaptée aux réseaux de capteurs

Conclusion

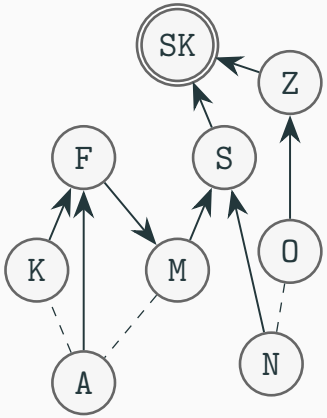
- Algorithme de routage conçu pour réseaux de capteurs
  - Efficace : peu de messages
  - Garanti : pas de boucles de routage
- Mise en pratique expérimentale
- Solution d'estimation de la qualité des liens
  - Fiable & rapide
  - Adaptée aux réseaux de capteurs

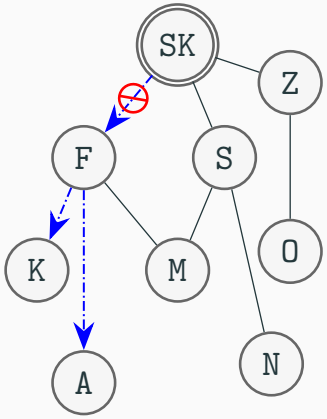
Merci de votre écoute !

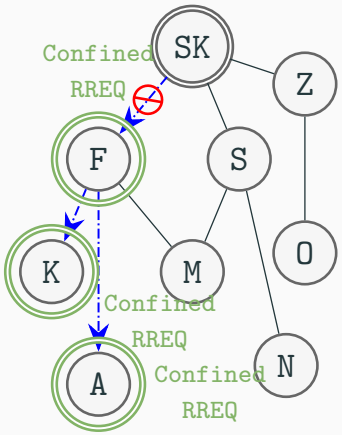
[Distribution] Interaction avec la réparation locale [ITC29]

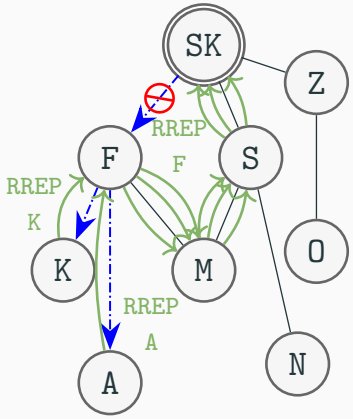


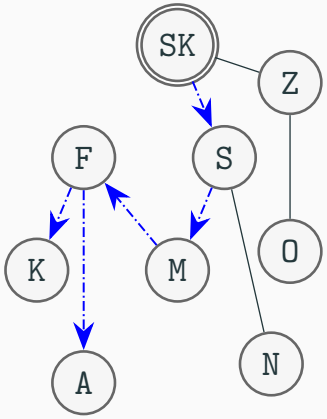
... ⇒ ...











✓ Proactif

✓ Impact local

[Expérimentation] Trafic de contrôle (iii) [ITC29]

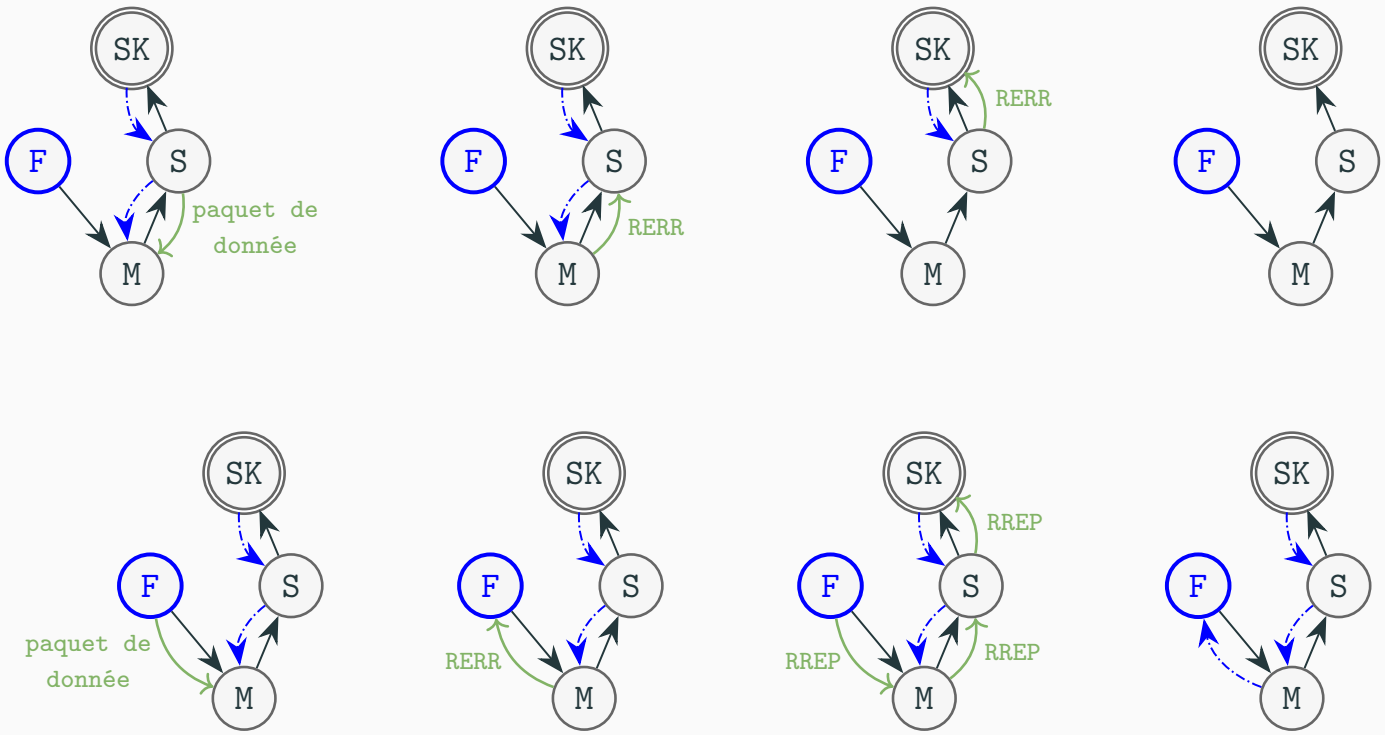
Nombre de messages envoyés

Type de trafic	Diffusion	RPL	LRP
Maintenance de l'arbre de collecte	multi–	786	155
	mono–	2497	399
Maintenance des routes d'hôtes	multi–	—	8
	mono–	1586	233
Paquets acheminés avec succès		1795 (97,2 %)	1819 (98,0 %)

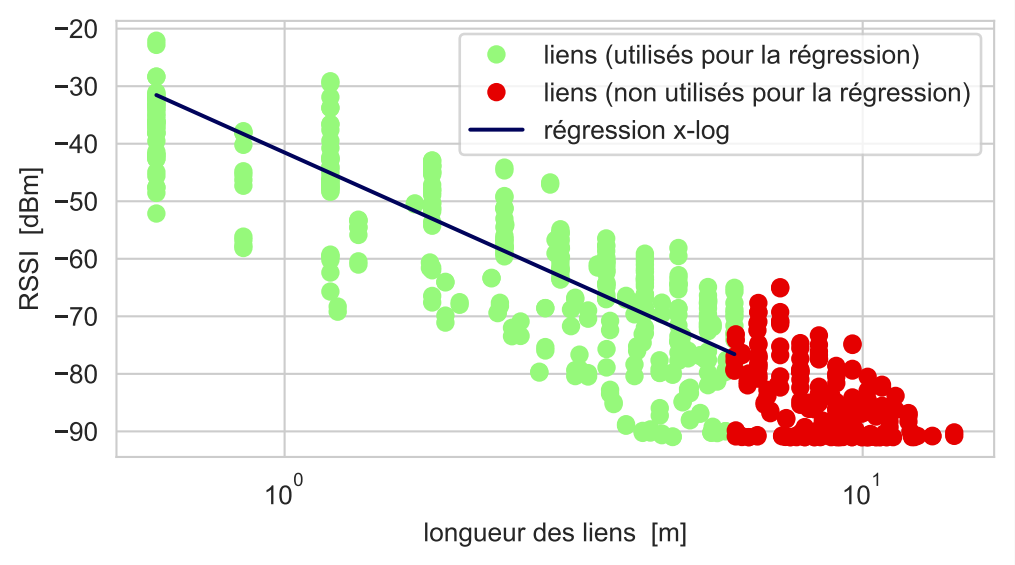
[Expérimentation] Trafic de contrôle (iv) [ITC29]

Paramètres des nœuds lors des expérimentations [EXPÉ2] et [EXPÉ3].

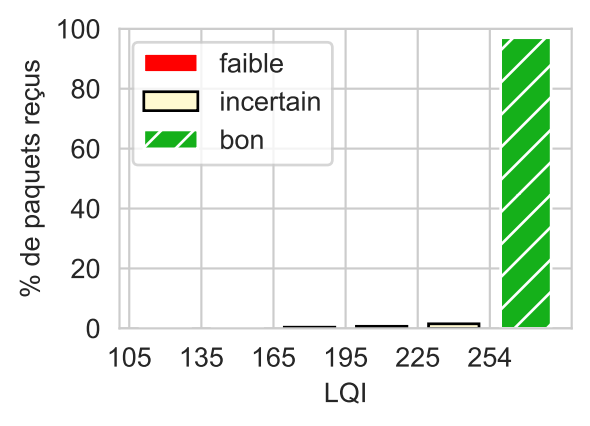
Paramètre	Valeur
Check interval de ContikiMAC	125 ms
Nombre de paquets UDP par client	1 toutes les 5 min
RPL	
$I_{\min}$	4 s
$I_{\max}$	1048 s
Redondance des DIO	10
Période de régénération des DAO	15 à 22 min
Fonction objectif	MRHOF avec ETX
LRP	
Délai aléatoire pour la transmission d'un paquet lors d'une inondation	0,5 s
Fréquence de sondage du voisinage lorsque le nœud est déconnecté	~5 min
Durée de mise en liste noire	10 min
Type de métrique	*hop count*


SK
F
S
M
paquet de
donnée
RERR
RREP

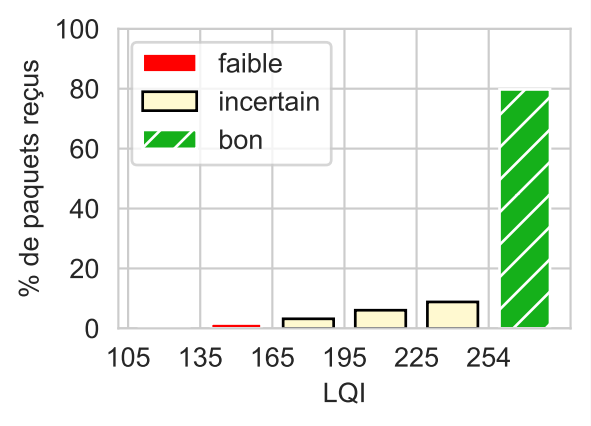
Corrélation avec la distance



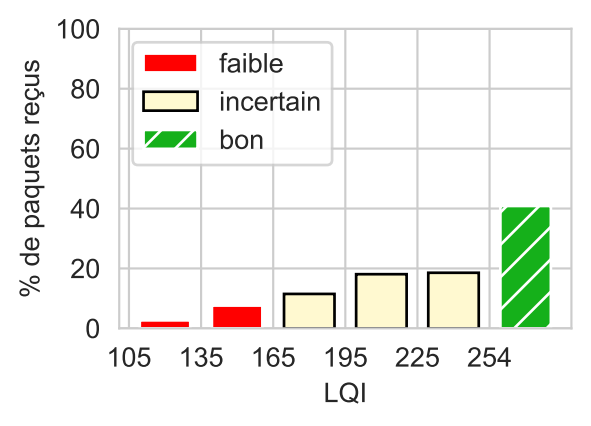
[LQI] Voir plus loin que le RSSI [WONS]



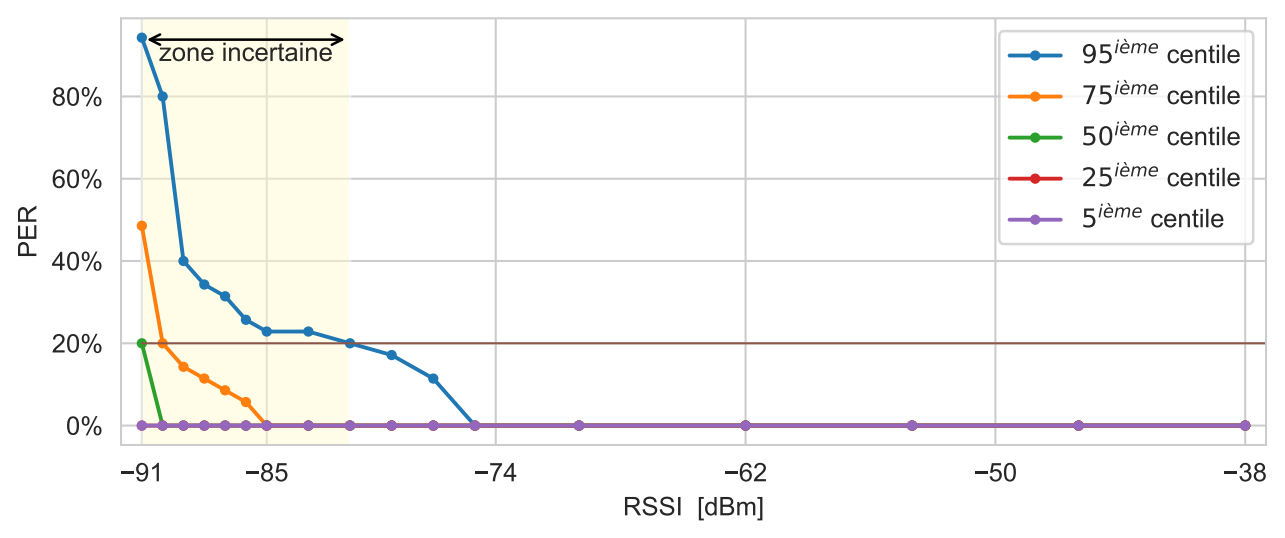
$\mathrm{RSSI} = -85\,\mathrm{dBm}$



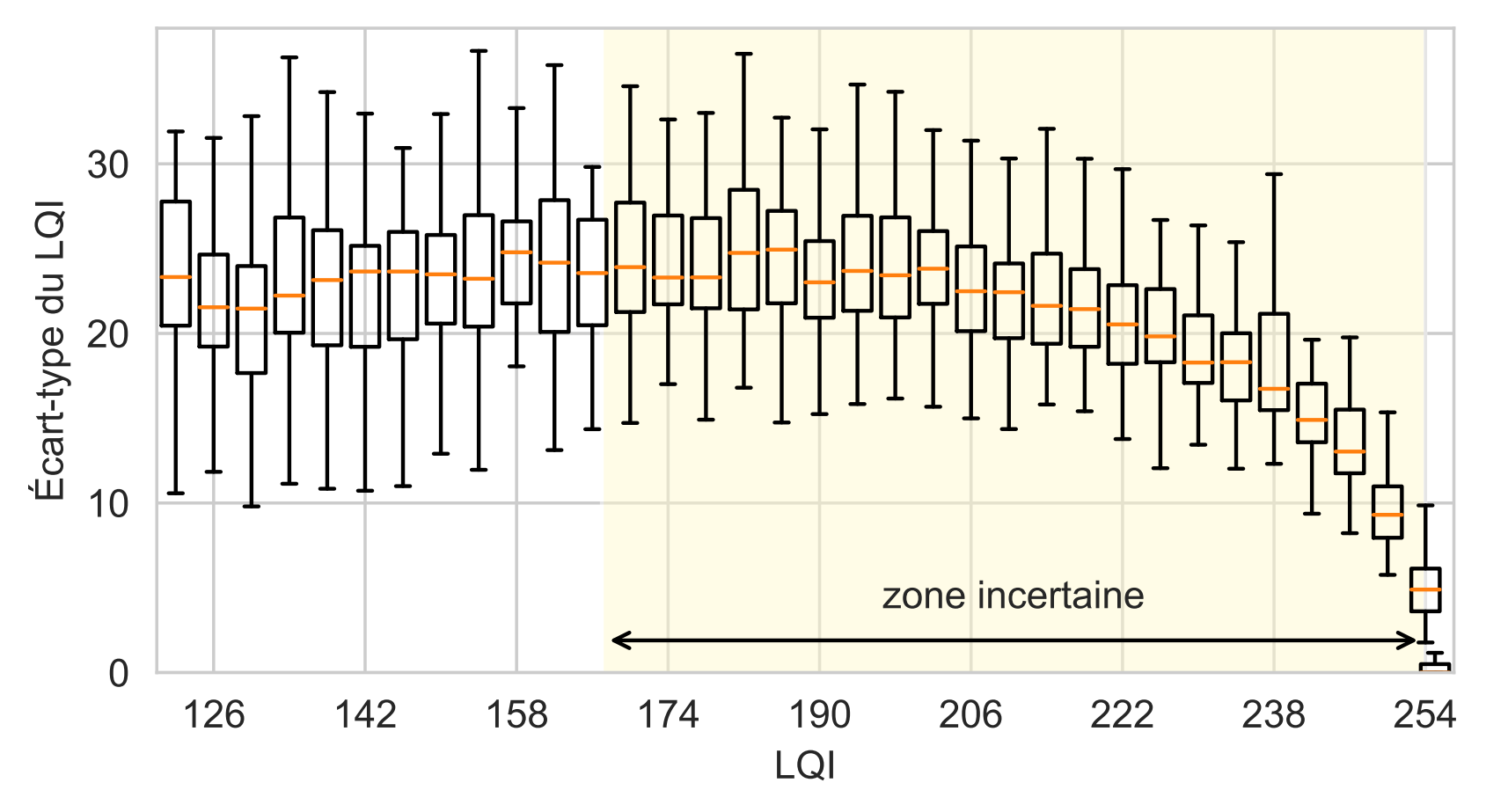
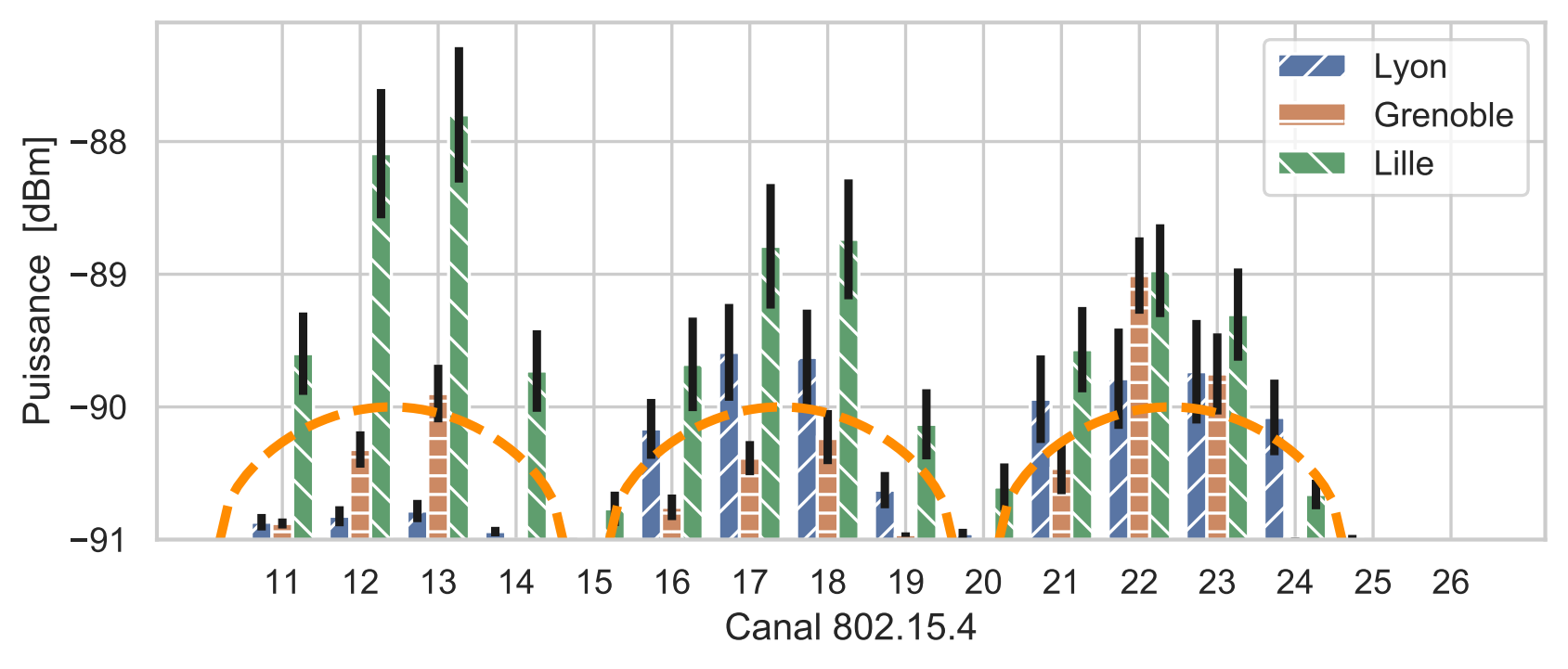
$\mathrm{RSSI} = -90\,\mathrm{dBm}$



$\mathrm{RSSI} = -91\,\mathrm{dBm}$



[LQI] Variabilité du LQI [WONS]



[LQI] Le bruit radio [...]