



Institut
Mines-Telecom

Passerelle intelligente pour réseaux de capteurs sans fil contraints

Rémy Leone,
remy.leone@telecom-paristech.fr

INFRES, Thales Communications &
Security, LINCS



Sommaire

Introduction & contexte

Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

Cache adaptatif

Conclusion

Outline

Introduction & contexte

Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

Cache adaptatif

Conclusion

Contexte

Wireless Sensor Network & Low-Power and Lossy Network

- ▶ Réseau utilisant une radio pour communiquer
- ▶ Systèmes embarqués
- ▶ Capteurs, actionneurs

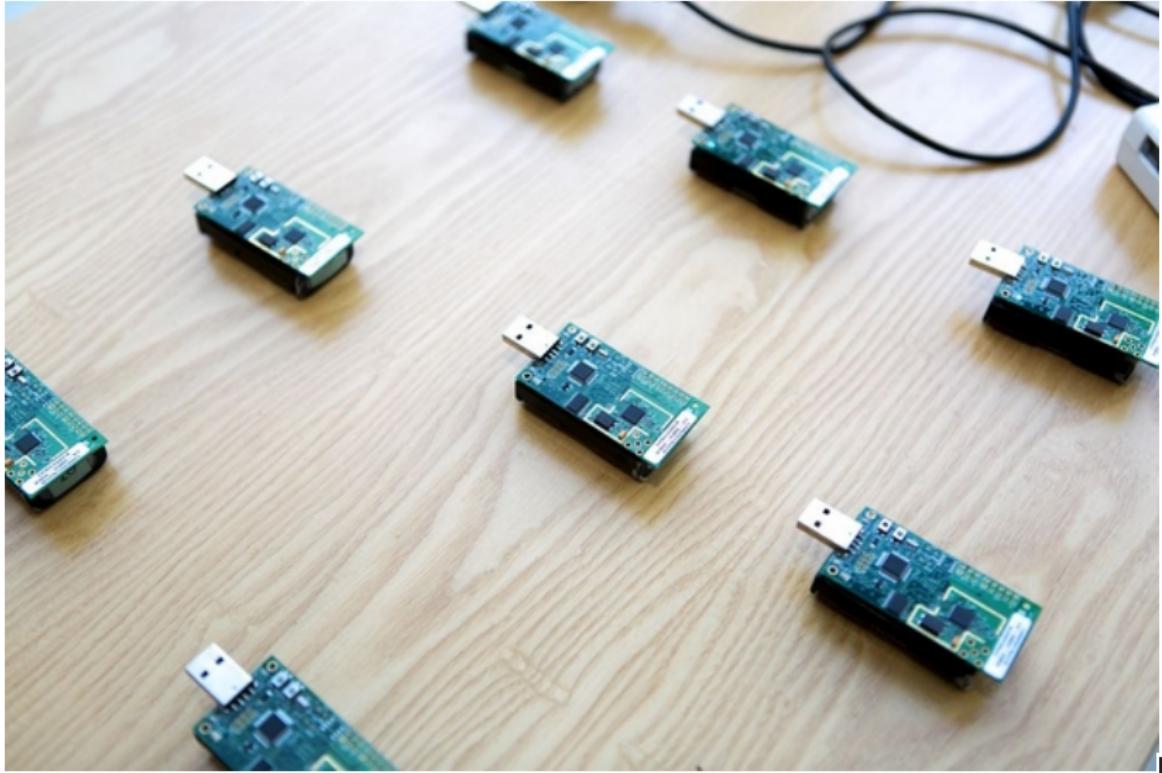
Raisons technologiques

- ▶ Réduction des couts de fabrication
- ▶ Réduction des besoins énergétiques

Raisons d'usages

- ▶ Ajout de fonctionnalités de services a des objets courants
- ▶ Analyse des données pour fournir de l'aide à la décision
- ▶ Intégration centralisée

Motes



Testbed



Domaines d'application

Applications industrielles

Mesures, Contrôle des chaînes de productions

Villes intelligentes

Voirie, Contrôle de l'eau, Smart parking

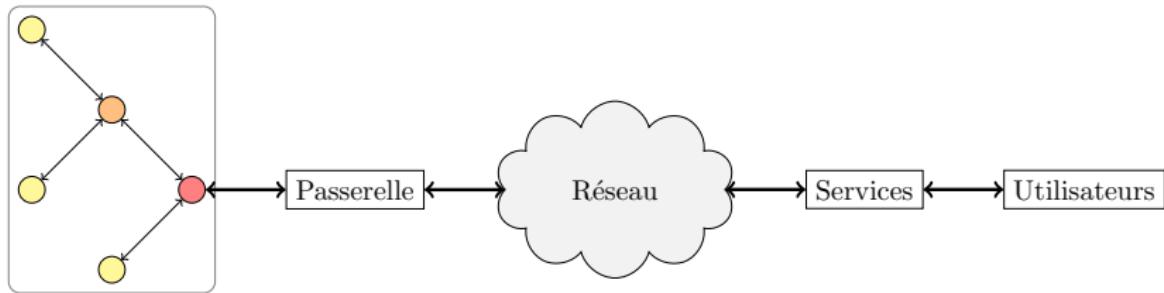
Gestion de bâtiment

Alarmes, chauffage, lumière, surveillance, fermeture des portes

Communications Machine to Machine (M2M)

Découverte et autoconfiguration de services

Architecture générale



LLN (Nœuds capteurs)

Challenges

Contraintes matérielles

- ▶ Grande hétérogénéité
- ▶ Faibles ressources matérielles
- ▶ Batterie ou source d'alimentation limitée
- ▶ Cycles de vie

Solutions

- ▶ Standards de communications
- ▶ Système d'exploitation adaptés
- ▶ Cycle de sommeil
- ▶ Mise à jour (Over The Air)

Contraintes liées aux réseau

Contraintes liées aux réseau

- ▶ Faible bande passante
- ▶ Noeud en sommeil (Connexions intermittantes)
- ▶ Canal bruité
- ▶ Passage à l'échelle

Solutions

- ▶ Protocoles réseau adaptés
- ▶ Couche MAC adaptée



Problématiques

Connaitre l'état des noeuds

- ▶ Diagnostiquer ou anticiper des pannes
- ▶ Mesurer les grandeurs caractéristiques
- ▶ Provisionner le réseau contraint

Comment optimiser l'utilisation des ressources de ces réseaux contraints ?

- ▶ Limiter la charge sur les noeuds contraints
- ▶ Conserver un niveau de service suffisant

Axes des contributions

Passerelle

- ▶ Interface entre les réseaux contraints et classiques
- ▶ Services pour le réseau de capteurs

Axes de contributions

- ▶ Ajout de fonctionnalités transparentes pour le réseau de capteurs



Outline

Introduction & contexte

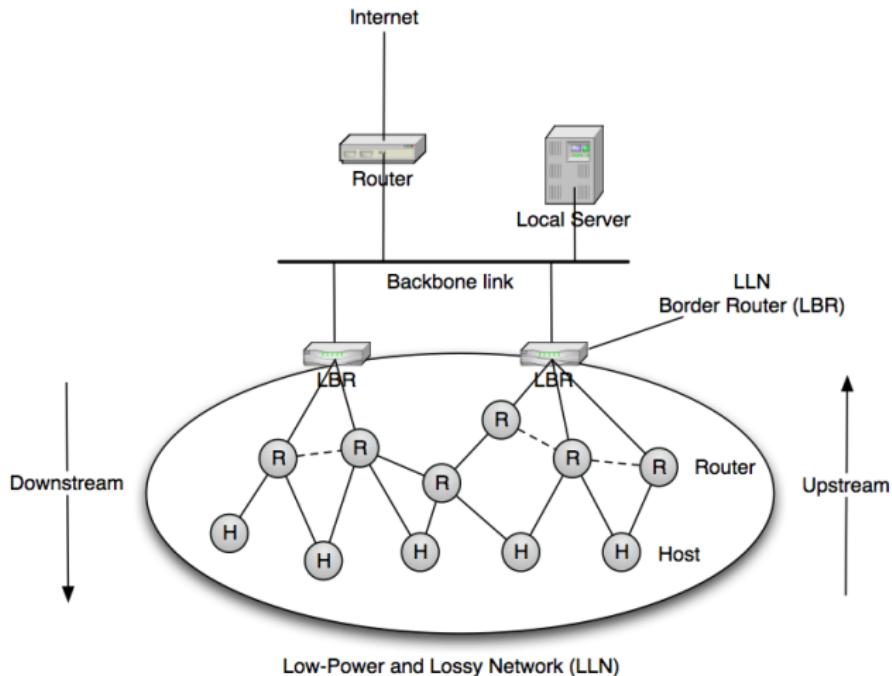
Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

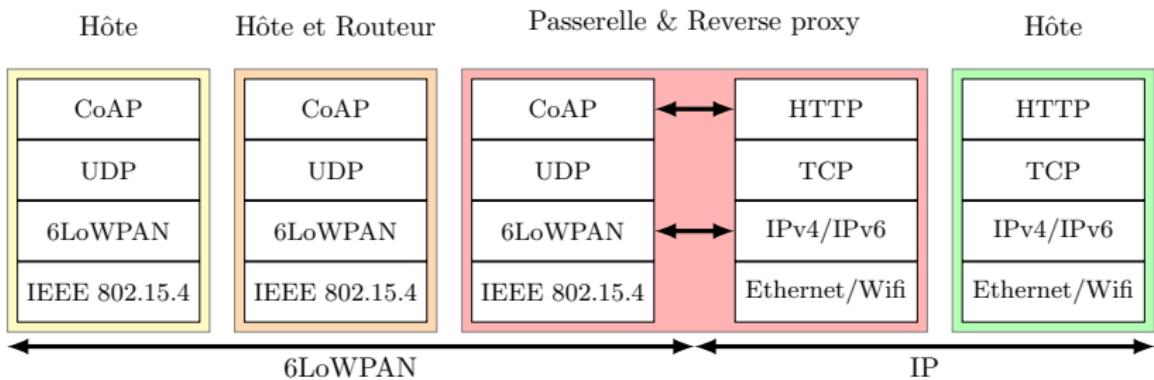
Cache adaptatif

Conclusion

Architecture réseau



Protocoles pour les LLNs



Rôle de la passerelle

Couche physique et liaison: IEEE 802.15.4

- ▶ PAN coordinator

Couche réseau: 6LoWPAN

- ▶ Compression IPv6

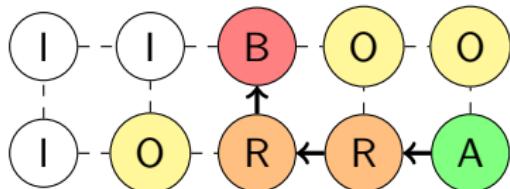
Protocole de routage: RPL

- ▶ Racine du DODAG (MP2P/P2MP)
- ▶ Routeur de bordure (LBR)

Protocole applicatif: CoAP

- ▶ Traduction de protocole (HTTP/CoAP)
- ▶ Proxy inverse

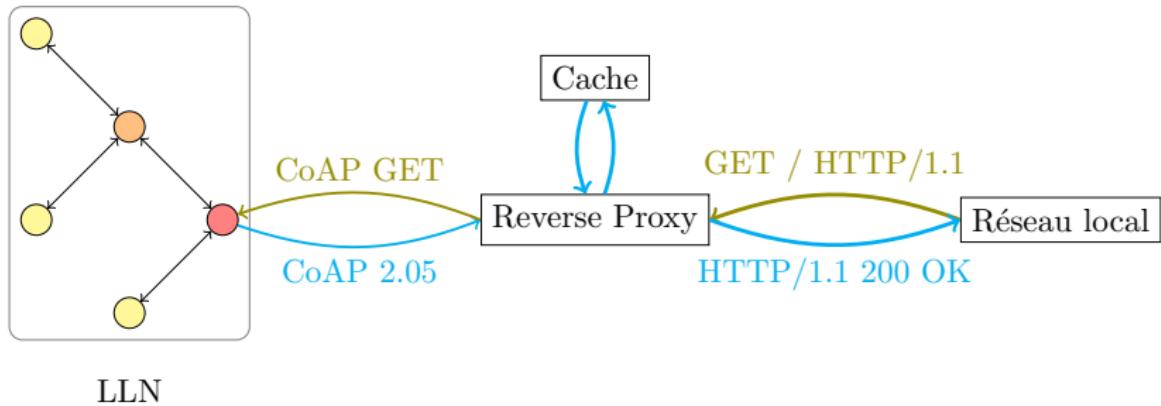
Impact du trafic dans un réseau multi-sauts



Objectifs

- ▶ Calculer l'impact du trafic en fonction de la topologie
- ▶ Agir de manière aussi transparente que possible
- ▶ Réguler le trafic si possible

Reverse proxy



Problématiques

Prévision de l'impact du trafic

- ▶ Provisionnement du réseau
- ▶ Surveillance matérielle et fonctionnelle continue
- ▶ Anticipation des pannes

Optimisation de l'utilisation des ressources

- ▶ Économie de bande-passante et d'énergie
- ▶ Améliorer la rapidité du traitement

Contributions

Supervision passive

- ▶ Observe le trafic au niveau du routeur de bordure
- ▶ Fournit une estimation de l'utilisation de la radio permettant de déduire une partie de la consommation énergétique

Reverse proxy adaptatif

- ▶ Régule les temps de validité des réponses en cache au niveau de la passerelle
- ▶ Offre un compromis entre satisfaction des utilisateurs et économies d'énergie

Outline

Introduction & contexte

Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

Cache adaptatif

Conclusion

Introduction

Supervision

- ▶ Collecte de données
- ▶ Interprétation des données
- ▶ Prise de décisions

Objectifs

- ▶ Diagnostiquer les pannes
- ▶ Anticiper les problèmes
- ▶ Mesure le système

État de l'art

Supervision active

- ▶ Envoi de statut périodique de la part des noeuds ("health report")
- ▶ Sondes tierces

Limitations

- ▶ Oblige les noeuds à avoir un module spécifique qui envoie ces données
- ▶ Pour les sondes tierces elles ont également besoin d'être sondée
- ▶ Trafic supplémentaire



Problématiques et contributions

Buts

- ▶ Produire une estimation de l'utilisation de la radio
- ▶ La radio est la principale consommatrice d'énergie
- ▶ Avoir une vue du trafic réseau et identifier les points chauds

Solutions de supervision classiques

- ▶ Supervision active parfois indisponible
- ▶ Consommatrice d'énergie & inefficace avec des noeuds souvent en sommeil

Contribution

- ▶ Supervision passive de la consommation énergétique à la passerelle
- ▶ Utilisation de la topologie réseau pour inférer le cout des retransmissions



Mesures implicites

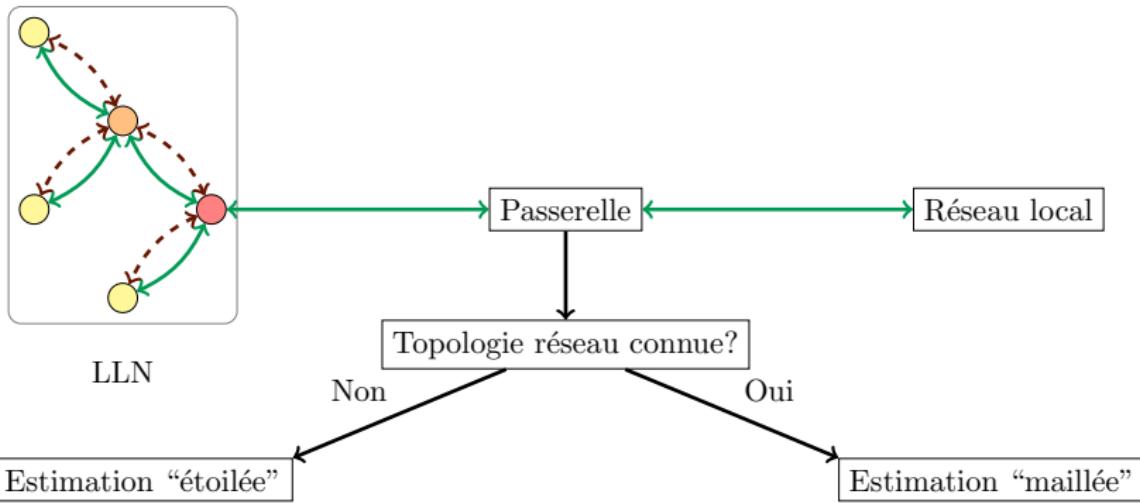
Définitions

- ▶ Une mesure active nécessite un envoi de paquets dédiés à cette mesure.
- ▶ Une mesure passive ne dépend que des paquets qui seraient envoyés de toute façon, même si la mesure n'avait pas lieu.

Propriétés des mesures passives

- ▶ Elles sont fondées sur l'observation de paquets non modifiés et non perturbés.
- ▶ Une méthode passive ne laisse aucune trace sur le réseau.
- ▶ Elles ne sont donc utiles que s'il existe déjà des paquets intéressants.
- ▶ Exemple: sFlow, netflow, IPFIX.

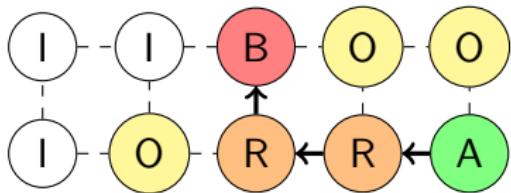
Architecture de mesure implicite



Modèle

- ▶ Modélisation de la couche MAC

Modélisation des transmission



Estimation “étoilée”

- ▶ Source et destination

Estimation “maillée”

- ▶ Route complète

IEEE 802.15.4 & ContikiMAC

IEEE 802.15.4

$$T_p = \frac{\mathcal{L}(f)}{R} \left\lceil \frac{\mathcal{L}(p)}{L} \right\rceil$$

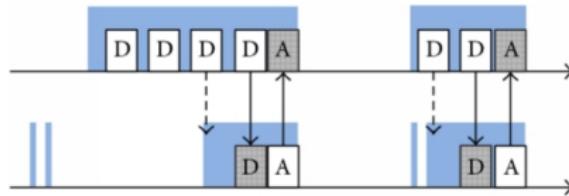


Figure : Schéma d'endormissement dans ContikiMAC

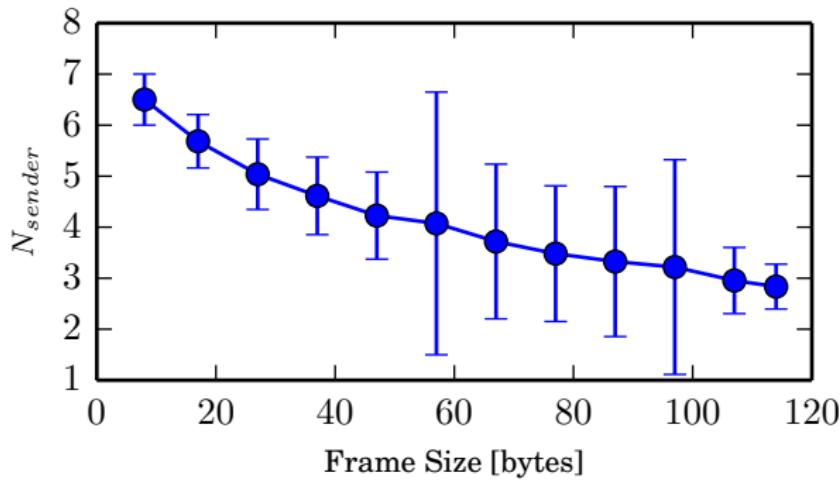
Facteur de "strobbing"

$$N_{\text{receiver}} = 1.5$$

Strobbing moyen N_{sender}

Conditions expérimentales

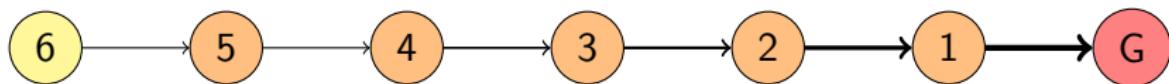
- ▶ Topologie binaire
- ▶ Rime stack (IEEE 802.15.4 et ContikiMAC)



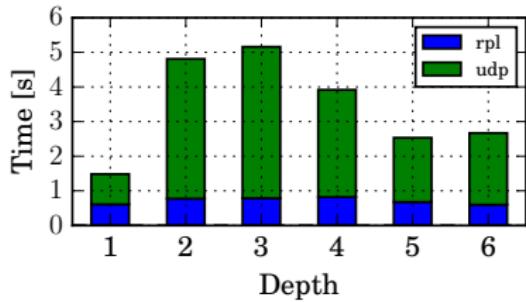
Validation expérimentale

Hypothèses

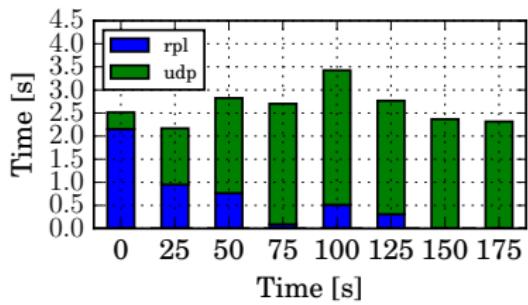
- ▶ Contiki/COOJA/Powertracker
- ▶ 200 secondes
- ▶ 1 paquet/s (69 octets sur le médium)
- ▶ $N_{\text{sender}} = 3.76$



Validation expérimentale



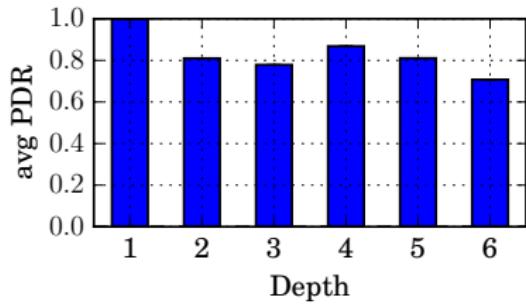
(a) Répartition par profondeur



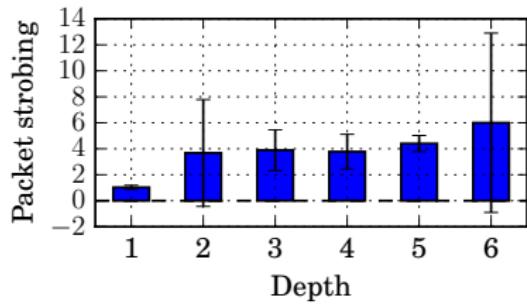
(b) Évolution au cours du temps

Figure : Analyse des protocoles

Validation expérimentale



(a) Packet Delivery Ratio (PDR)



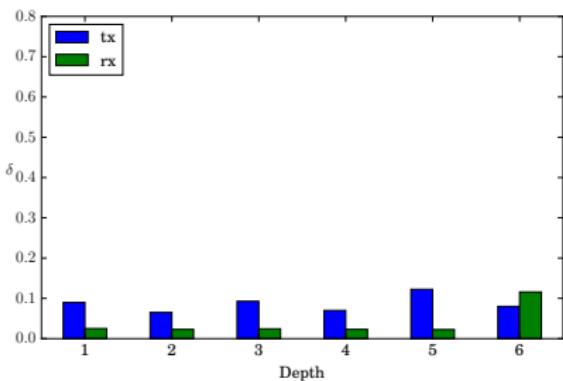
(b) Strobbing par profondeur

Figure : Impact de la profondeur

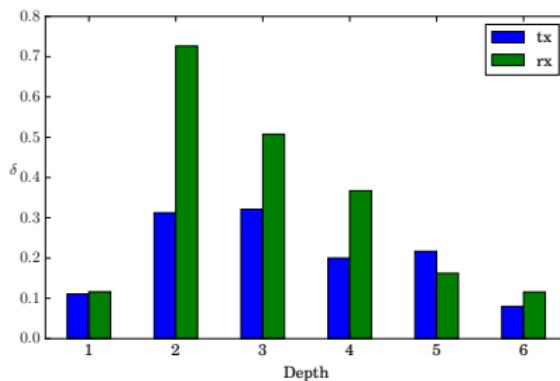
Validation expérimentale

Précision

$$\delta = \frac{\hat{X}}{X}$$



(a) Estimation “étoilée”



(b) Estimation “maillée”

Figure : δ final par profondeur

Recalibration périodique

Objectifs

- ▶ Apprendre le biais de l'estimation passive

Modèle correctif

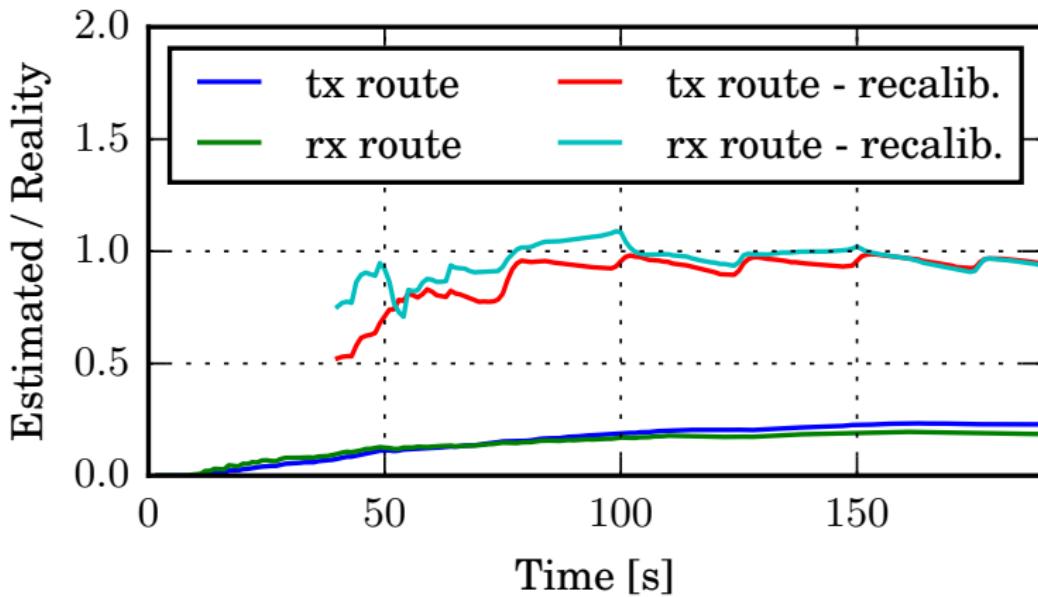
$$\hat{X}(t) = X(t_r) + \epsilon(t_r) \frac{t - t_r}{T} \quad (1)$$

$$\epsilon(t_r) = \alpha(X(t_r) - \hat{X}(t_r)) + (1 - \alpha)\epsilon(t_{r-1}) \quad (2)$$

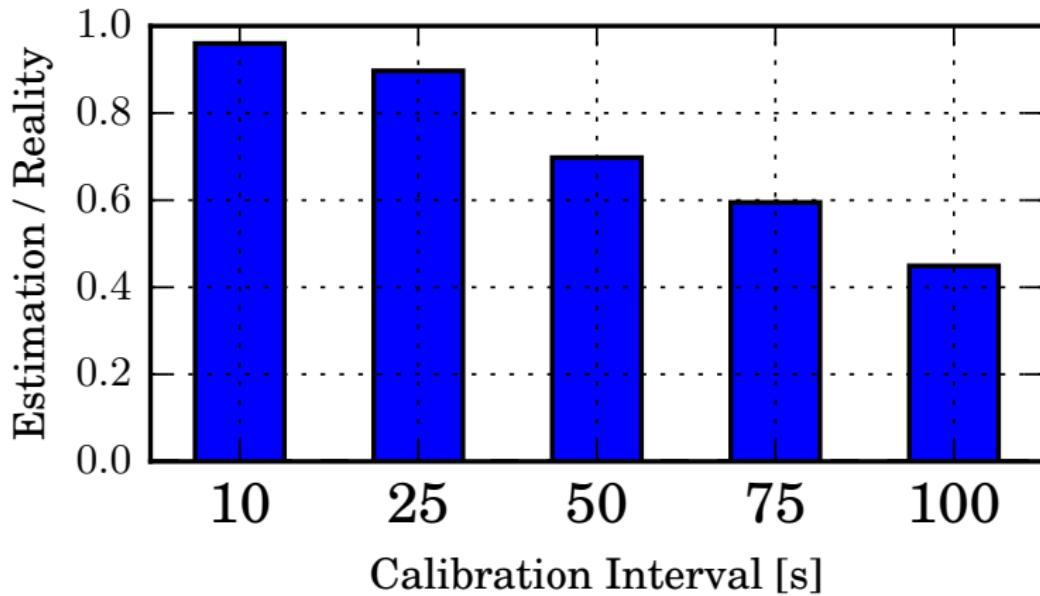
Topologie expérimentale

- ▶ 21 noeuds
- ▶ $\alpha = 0.25$
- ▶ Recalibration toutes les 25 secondes

Evolution de l'erreur d'estimation



Intervalle de recalibration



Conclusion

Supervision

- ▶ La connaissance de la topologie améliore la précision
- ▶ Calibration par strobbing validée mais insuffisante
- ▶ Recalibrations nécessaires pour cette configuration

Ouvertures

- ▶ Couche MAC plus fiable et déterministe (TSCH)
- ▶ Différentes topologies

Publication

Rémy Léone, Jérémie Leguay, Paolo Medagliani, Claude Chaudet.

Tee: Traffic-based energy estimators for duty-cycled Wireless Sensor Networks.

IEEE International Conference on Communication (ICC),
page 6749-6754, Londres, 2015.

Outline

Introduction & contexte

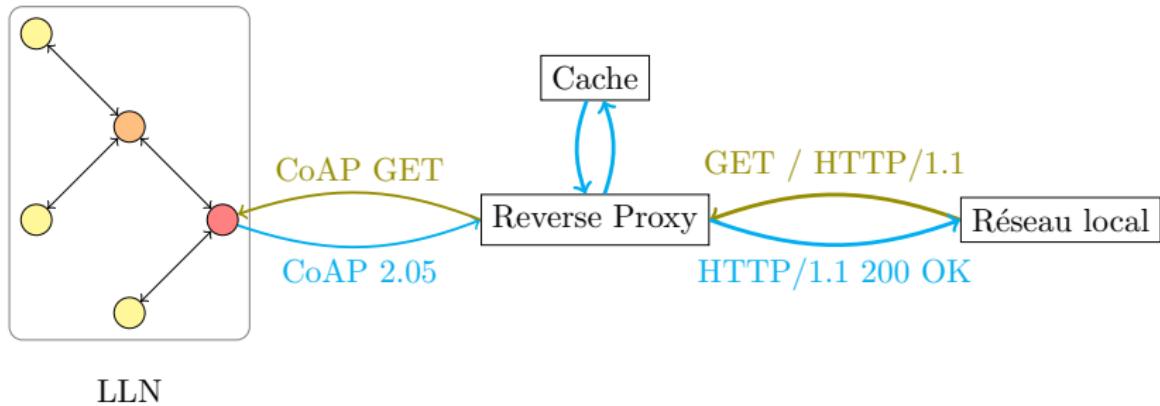
Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

Cache adaptatif

Conclusion

Architecture: Proxy inverse



Contexte

Reverse Proxy Cache

- ▶ Intercepte les requêtes entrantes
- ▶ Chaque réponse a un temps de validité en cache

Etat de l'art sur les caches en IoT

- ▶ Fonctionnalités de traduction de protocoles
- ▶ Cache répartis au niveau des noeuds



Contribution

Contraintes

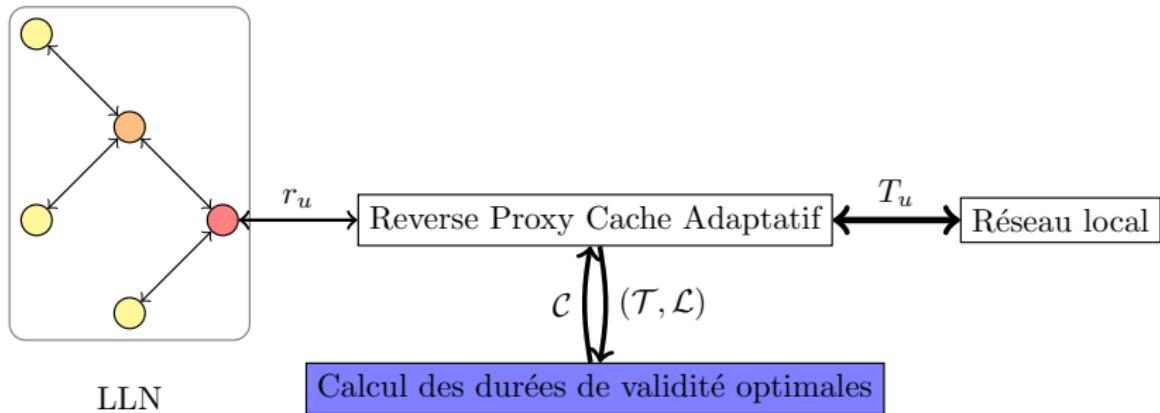
- ▶ Les noeuds veulent répondre au moins de requêtes possibles
- ▶ Les utilisateurs veulent les réponses les plus récentes possibles

Modèle de résolution

- ▶ Fournir les temps de validité optimaux pour les ressources en cache afin d'avoir le meilleur temps de validité possible
- ▶ Utilisation d'algorithme génétique (NSGA-II) pour la résolution d'un problème multi-objectifs (Satisfaction ou Durée de vie)



Architecture de RPCA



Modélisation du problème

Contrainte sur la durée des validité

$$c_{min}(u) \leq c_u \leq c_{max}(u)$$

Satisfaction utilisateur

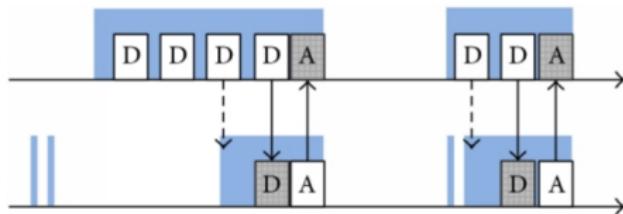
$$\forall u, \gamma_u = \frac{c_{max}(u) - c_u}{c_{max}(u) - c_{min}(u)}$$

Modèle de durée de vie

$$E_r(T) = E_0 - \int_0^T P(t)dt \quad (3)$$

$$\int_0^T P(t)dt = \alpha_S P_S + \alpha_L P_L + \alpha_{Tx} P_{Tx} + \alpha_{Rx} P_{Rx} \quad (4)$$

ContikiMAC



Notation

T_p Temps pour émettre un paquet

T_{ACK} Temps pour émettre un acquittement

T_s Temps de sommeil dans un cycle

T_d Temps pour détecter l'arrivée d'un paquet d'acquittement

T_c Temps d'un cycle complet

Cas favorable

Transmission

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Tx}} = T_p \quad (5)$$

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Rx}} = T_{\text{ACK}} \quad (6)$$

Réception

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Rx}} = T_p \quad (7)$$

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Tx}} = T_{\text{ACK}} \quad (8)$$

Cas défavorable

Transmission

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Tx}} = T_p + \left\lceil \frac{T_s}{T_p + T_d} \right\rceil T_p \quad (9)$$

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Rx}} = \left\lceil \frac{T_s}{T_p + T_d} \right\rceil T_d + T_{\text{ACK}} \quad (10)$$

Réception

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Rx}} = 2T_p \quad (11)$$

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Tx}} = T_{\text{ACK}} \quad (12)$$

Cas moyen

Transmission

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Tx}} = \frac{T_p}{2} \left[\frac{T_s}{T_p + T_d} \right] + T_p \quad (13)$$

$$T_{p,\text{Tx} \rightarrow \text{Rx}} = \frac{T_d}{2} \left[\frac{T_s}{T_p + T_d} \right] + T_{\text{ACK}} \quad (14)$$

Réception

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Rx}} = \frac{3T_p}{2}$$

$$T_{p,\text{Rx} \rightarrow \text{Tx}} = T_{\text{ACK}}$$



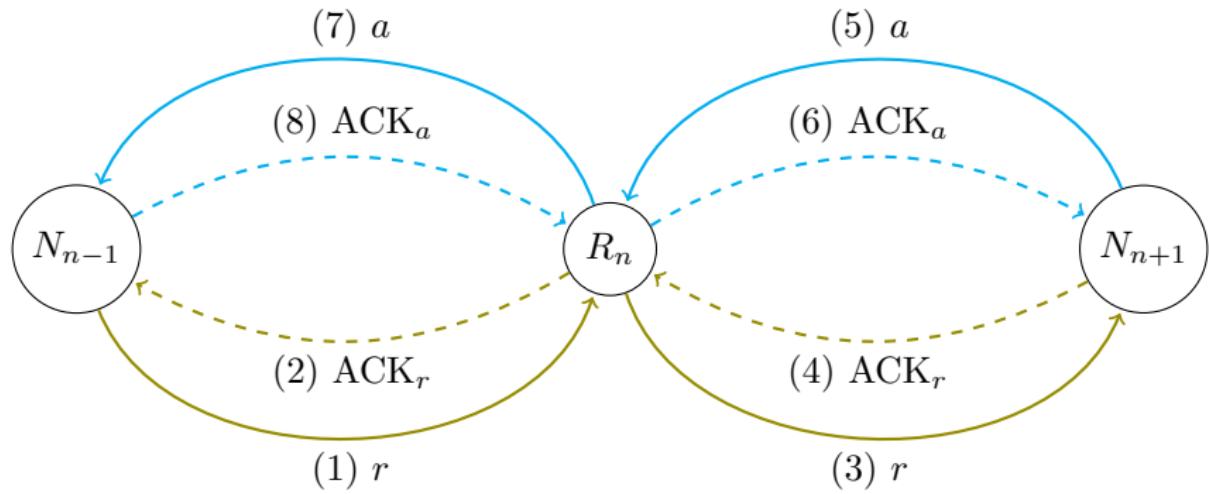
Consommation des noeuds serveurs

Consommation des noeuds serveurs

$$\alpha_{server,Tx} = \frac{T_{r,Rx \rightarrow Tx} + T_{a,Tx \rightarrow Tx}}{r_i} \quad (15)$$

$$\alpha_{server,Rx} = \frac{T_{r,Rx \rightarrow Rx} + T_{a,Tx \rightarrow Rx}}{r_i} \quad (16)$$

Consommation des noeuds routeurs



Consommation des noeuds routeurs

Charge pour les routeurs

$$T_{\text{router,Tx}} = T_{r,\text{Tx} \rightarrow \text{Tx}} + T_{r,\text{Rx} \rightarrow \text{Tx}} + T_{a,\text{Tx} \rightarrow \text{Tx}} + T_{a,\text{Rx} \rightarrow \text{Tx}} \quad (17)$$

$$T_{\text{router,Rx}} = T_{r,\text{Rx} \rightarrow \text{Rx}} + T_{r,\text{Tx} \rightarrow \text{Rx}} + T_{a,\text{Rx} \rightarrow \text{Rx}} + T_{a,\text{Tx} \rightarrow \text{Rx}} \quad (18)$$

$\alpha_{\text{router,Tx}}$ et $\alpha_{\text{router,Rx}}$

$$\alpha_{\text{router,Tx}} = \sum_{j \in m_i} \frac{T_{\text{router,Tx},j}}{r_j} \quad (19)$$

$$\alpha_{\text{router,Rx}} = \sum_{j \in m_i} \frac{T_{\text{router,Rx},j}}{r_j} \quad (20)$$

Consommation en phase d'écoute et de sommeil

Phase d'écoute

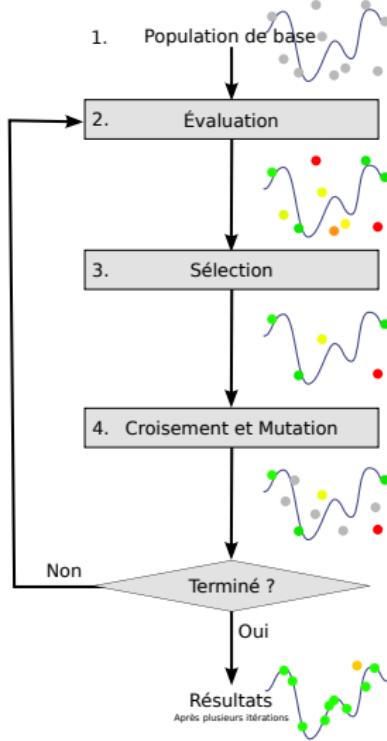
$$\alpha_{\mathcal{L}} = \frac{T_A}{T_C} (1 - \alpha_{\text{Tx}} - \alpha_{\text{Rx}}) \quad (21)$$

Phase de sommeil

$$\alpha_{\mathcal{S}} = \frac{T_C - T_A}{T_C} (1 - \alpha_{\text{Tx}} - \alpha_{\text{Rx}}) \quad (22)$$



Algorithme génétique



Validation expérimentale

Condition de trafic

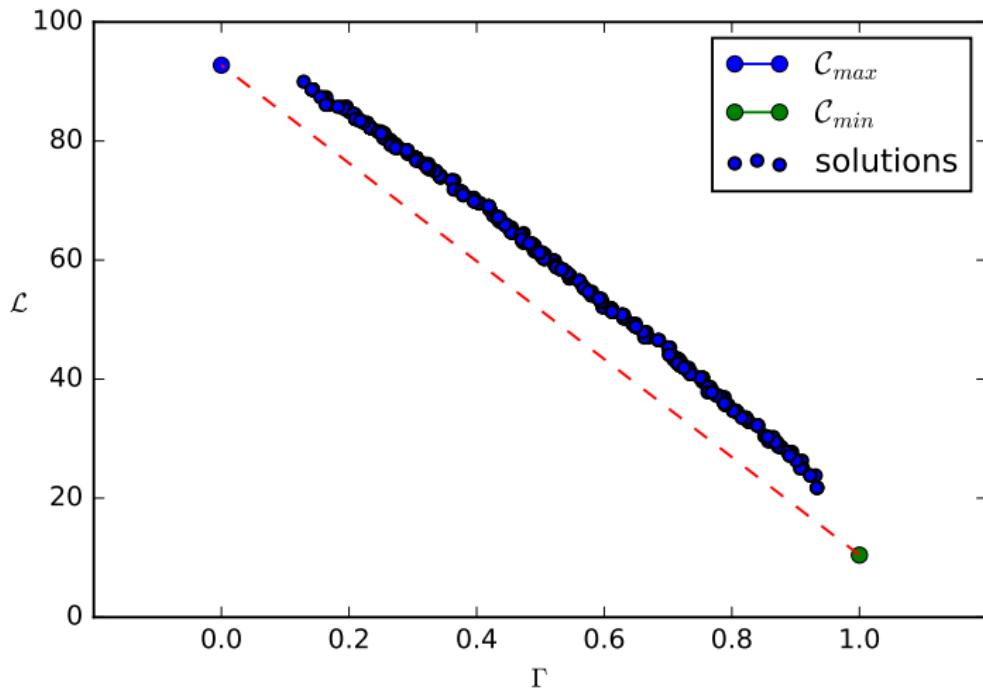
- ▶ Trafic poissonien en entrée
- ▶ Traduction HTTP / CoAP

Résolution multi-objective

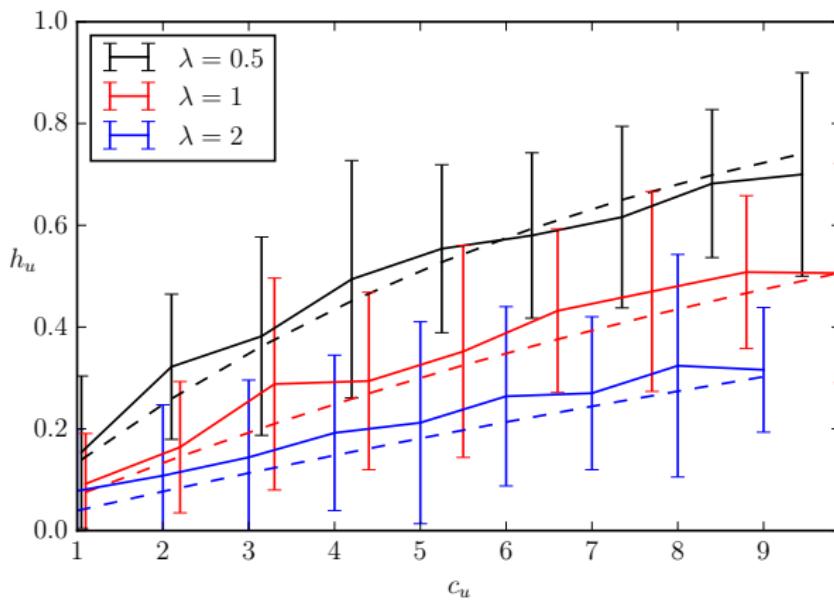
- ▶ Configuration NSGA-II par défaut
- ▶ Exécuté en offline puis déployée



Front de Pareto



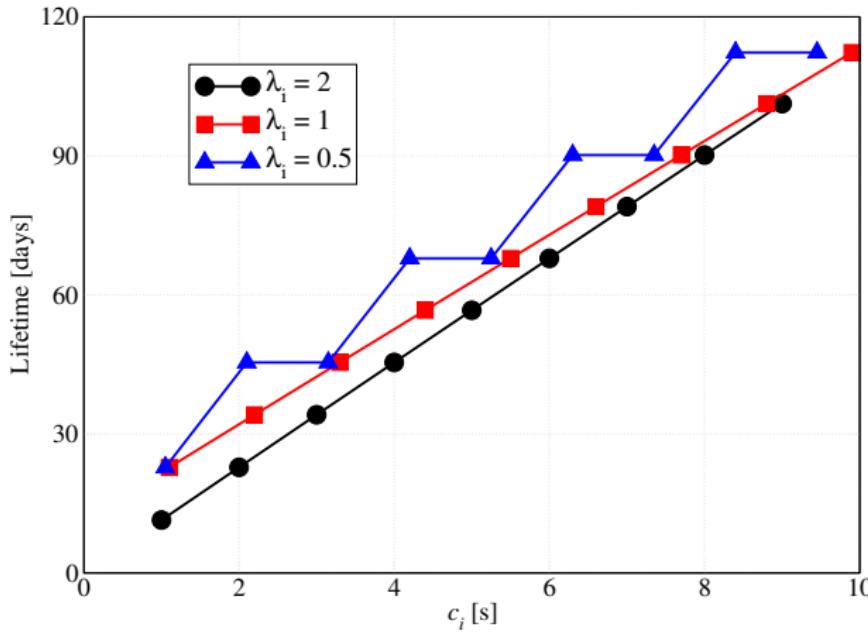
Cache hit ratio



Résultats: Durée de vie

Définition

Le réseau est considéré comme mort au premier noeud mort.



Conclusion

Dimensionnement des temps de vie

- ▶ Réguler la quantité de requêtes que l'on fait passer est un bon moyen de gérer la charge d'un réseau requêtes/réponse
- ▶ Dans un modèle d'hypothèses simples on peut avoir des estimations rapides de la durée de vie d'un réseau
- ▶ L'efficacité d'un cache n'est pas seulement liée au temps de vie d'une requête, mais également à son adéquation avec le trafic qu'il reçoit et les contraintes de l'application.

Améliorations possibles

- ▶ Méthodes convexes pour la résolution
- ▶ Différentes mesures de satisfaction
- ▶ Prise en compte du délai de réponse

Publications

- ▶ Rémy Leone, Paolo Medagliani et Jérémie Leguay. *Optimizing QoS in Wireless Sensors Networks using a Caching Platform.* *Sensornets 2013*, page 56, Barcelone, Espagne, Février 2013.
- ▶ Rémy Leone, Paolo Medagliani et Jérémie Leguay. *Optimisation de la qualité de service par l'utilisation de mémoire cache*
15èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications



Outline

Introduction & contexte

Passerelles pour les LLNs

Mesure implicite

Cache adaptatif

Conclusion

Conclusion

Contributions

- ▶ Les passerelles peuvent héberger des fonctionnalités réseau avancées
- ▶ La supervision passive peut fournir des estimations de consommation énergétique de manière transparente
- ▶ Un cache adaptatif peut adapter la quantité de requêtes entrantes dans un réseau contraint

Ouvertures

Raison du succès des passerelles

- ▶ Différents compromis (bande passante, consommation, portée)
- ▶ Plateformes hétérogènes

Fonctionnalités supplémentaires des passerelles

- ▶ Interopérabilité logicielle
- ▶ Ajout de services
- ▶ Aggrégation et découverte de services

Autres travaux

Découverte de service autoconfiguré

- ▶ Interconnexions de passerelles en pair à pair pour la découverte de services

Recherche reproductible dans les réseaux de capteurs

- ▶ Documentation et automatisation d'expériences sur les LLNs

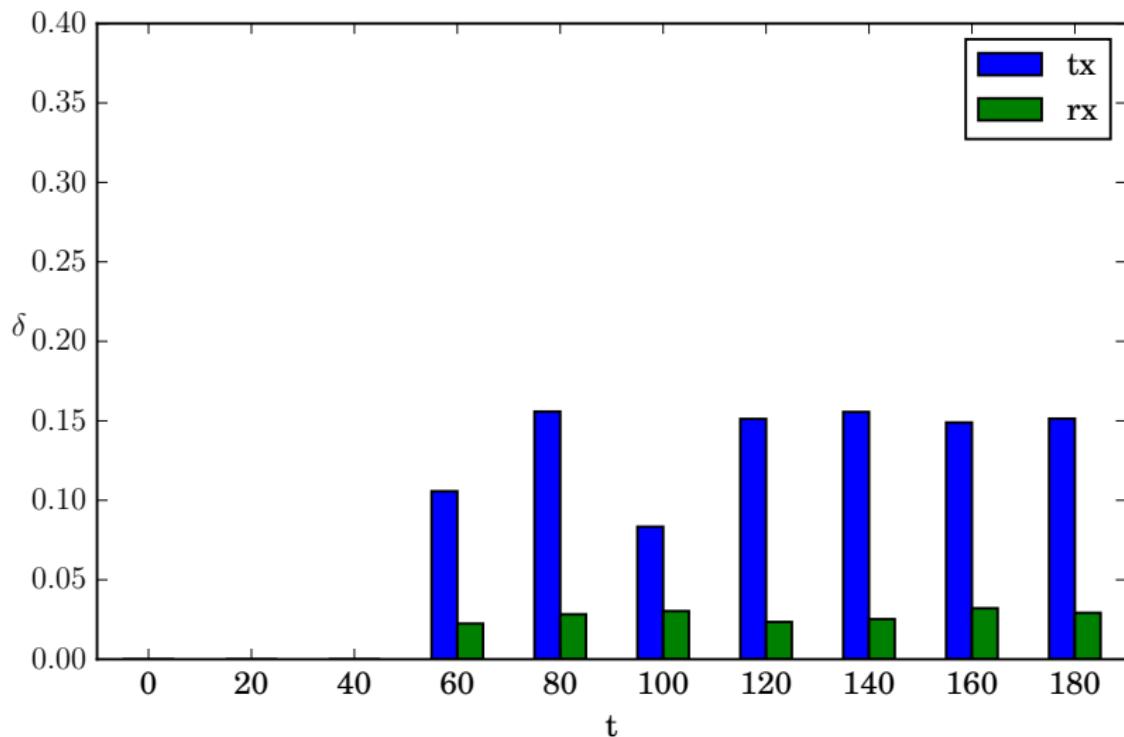
Remarques? Questions?

Merci pour votre attention.

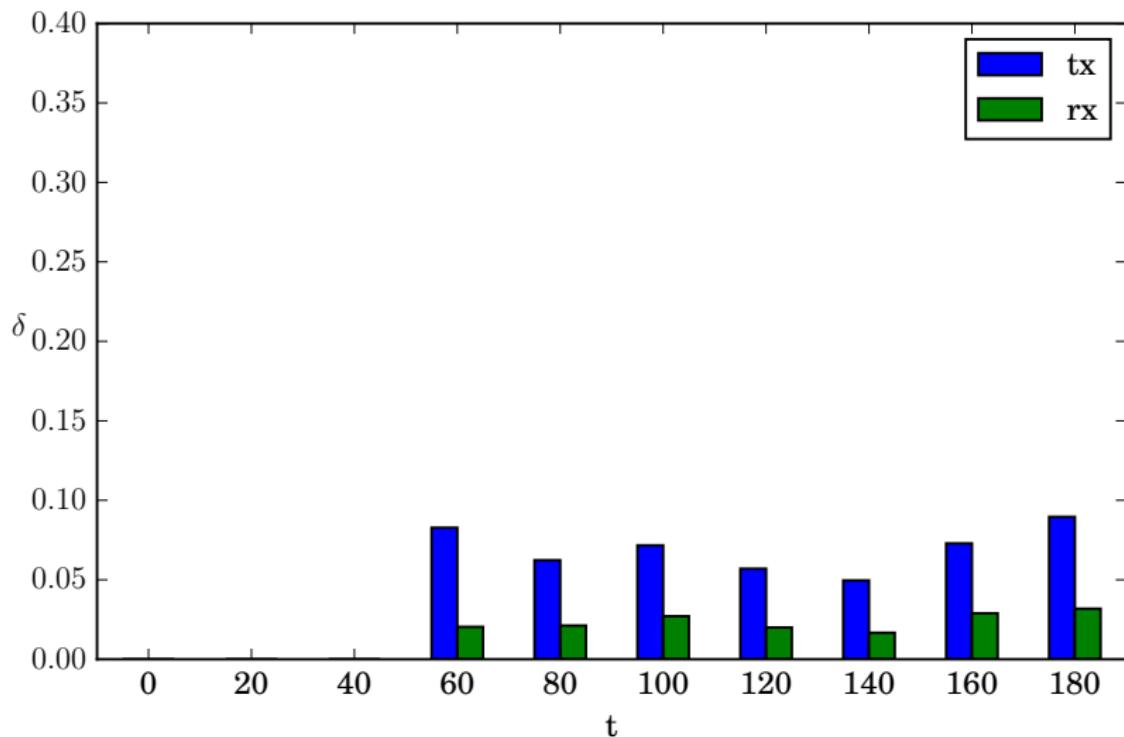
- ▶ remy.leone@telecom-paristech.fr



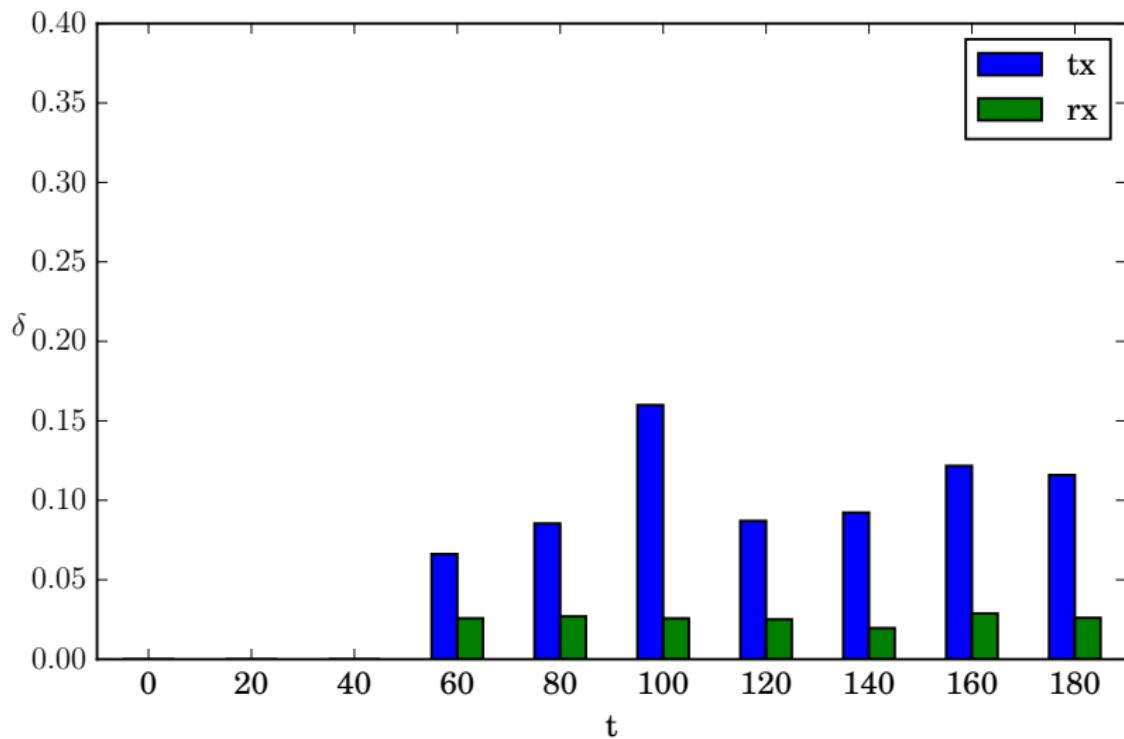
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 1



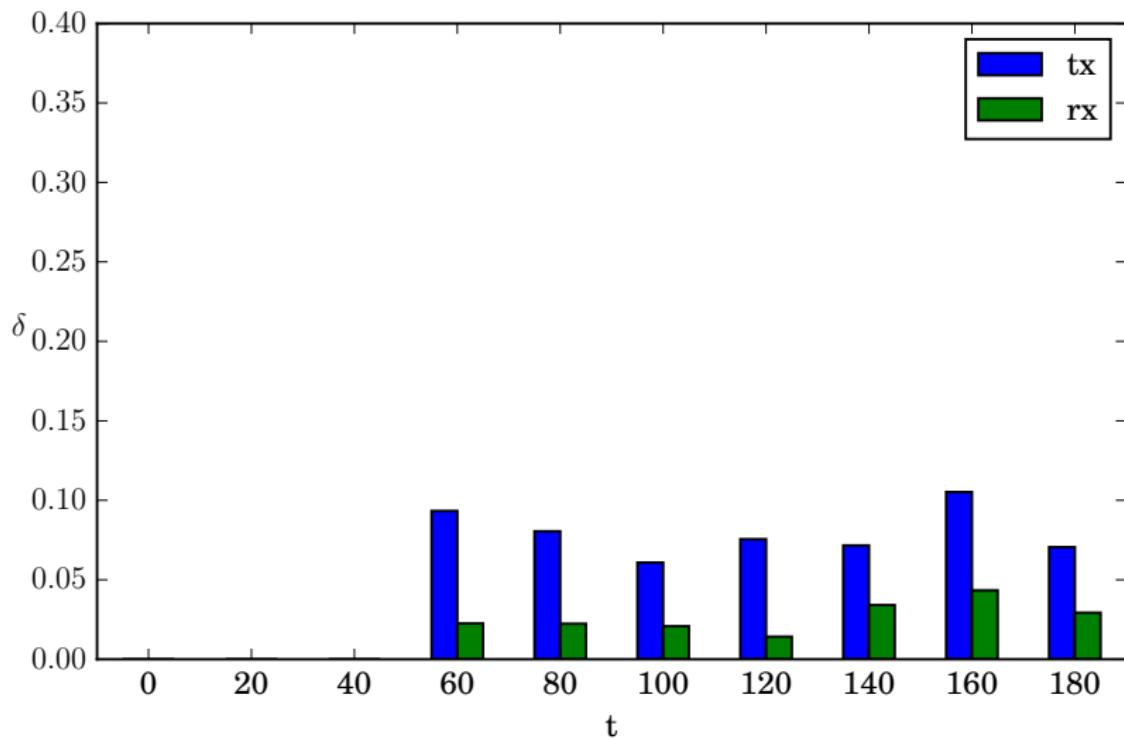
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 2



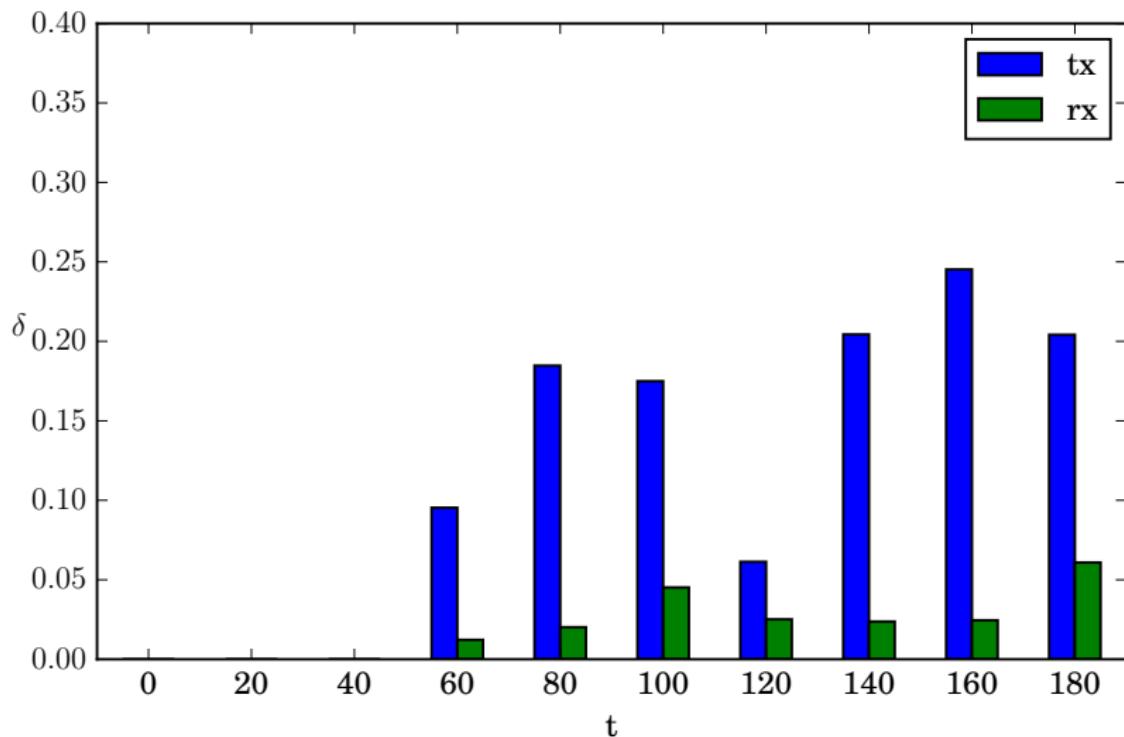
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 3



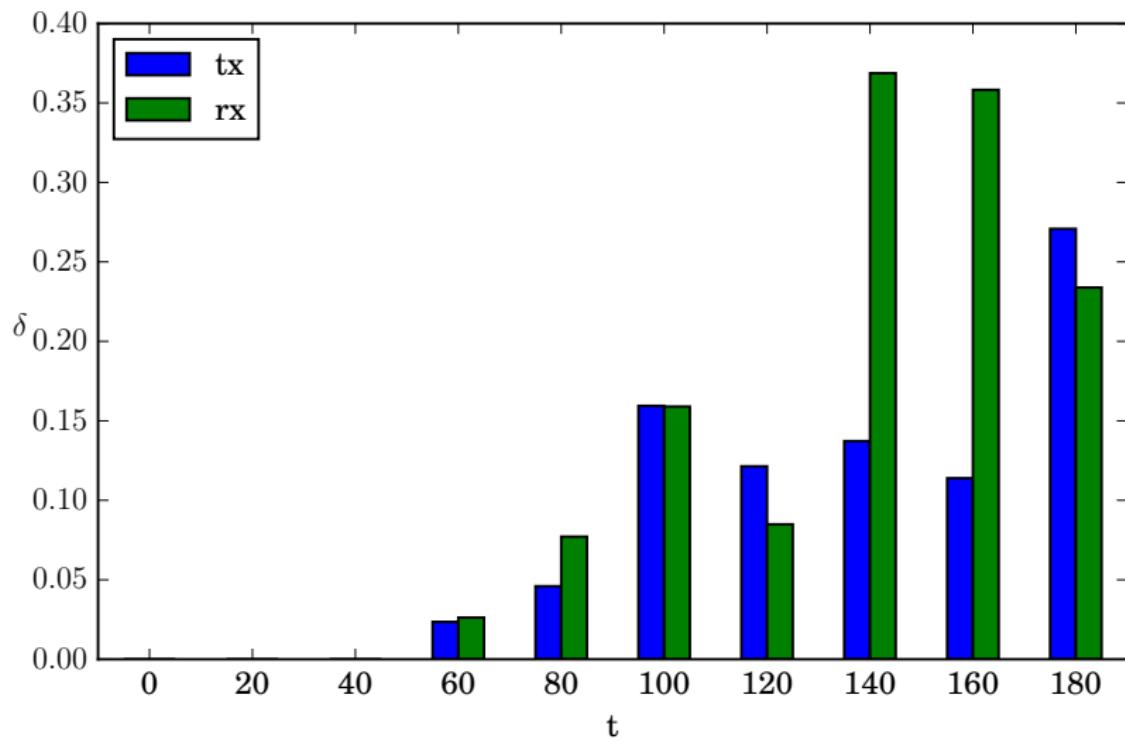
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 4



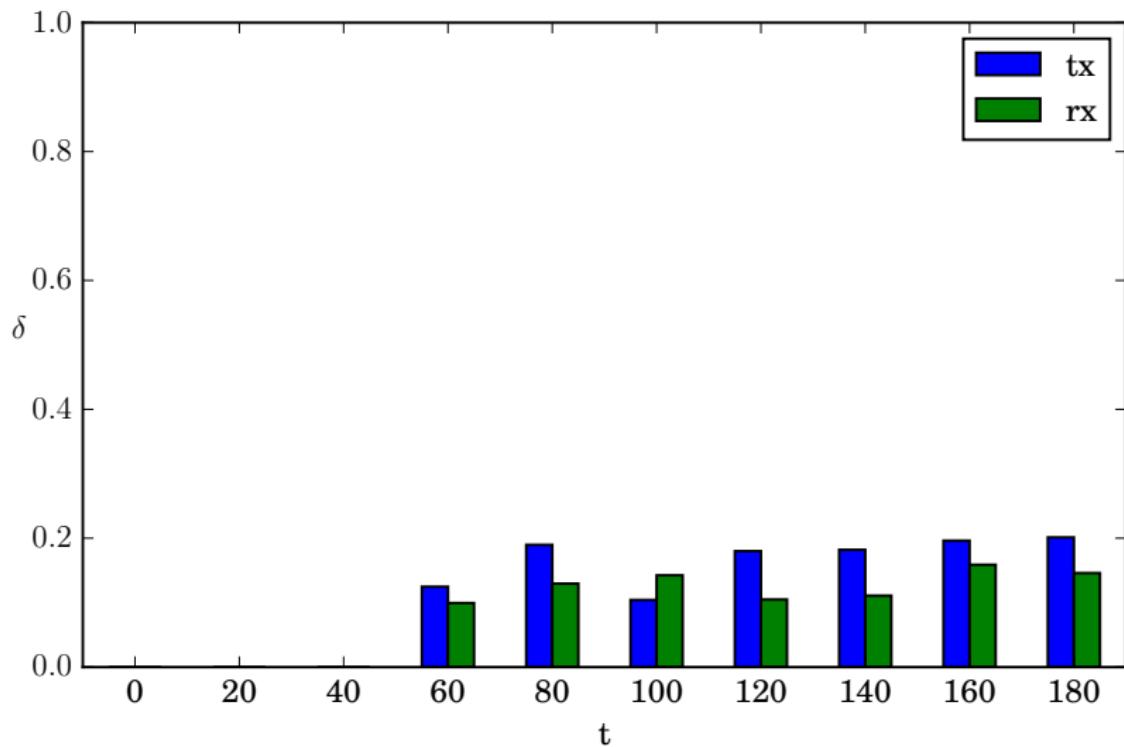
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 5



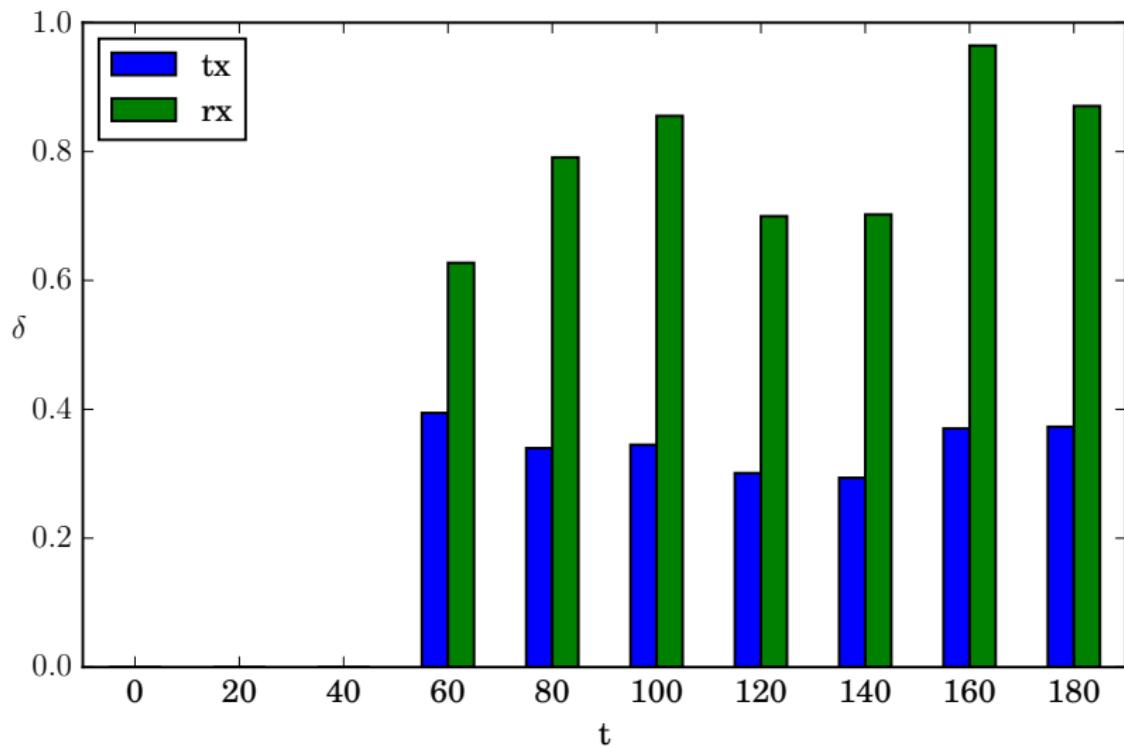
$\delta(t)$ - Estimation “étoilée” - 6



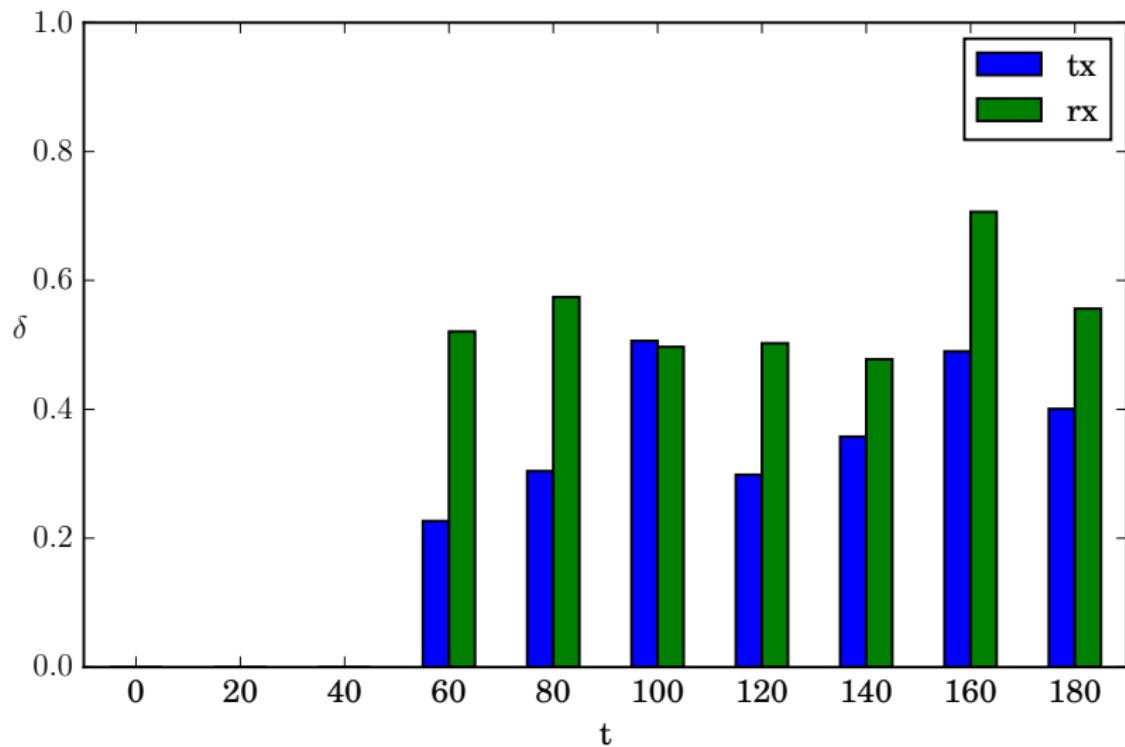
$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 1



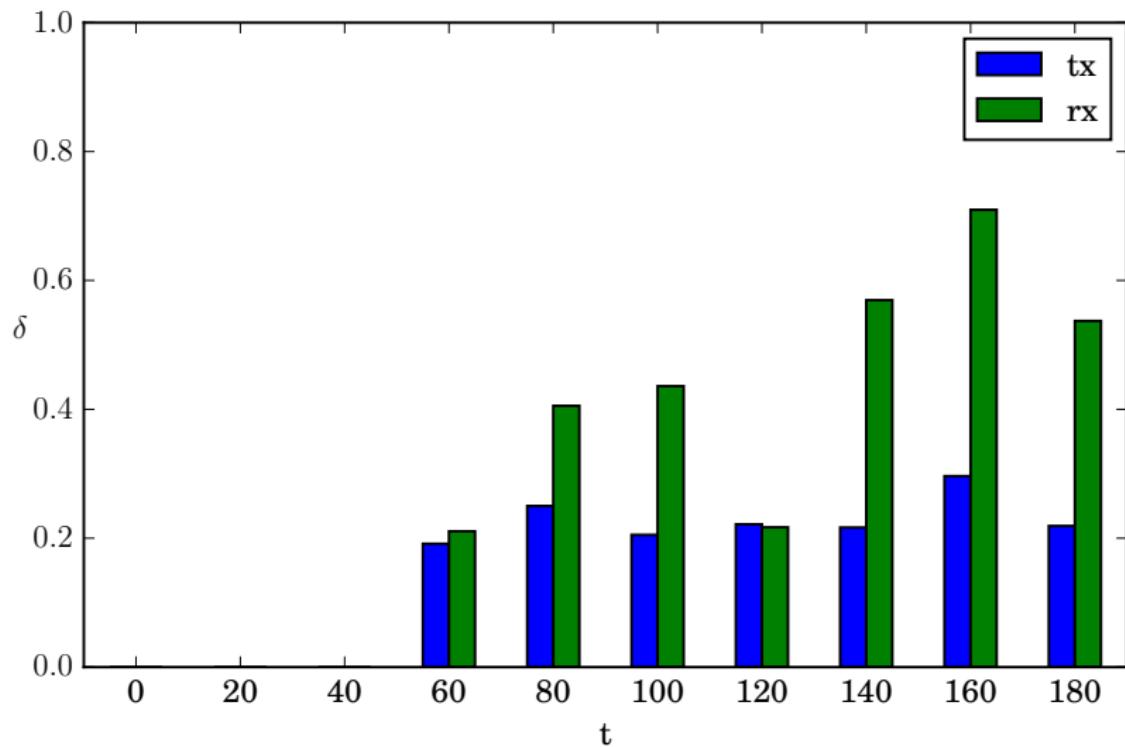
$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 2



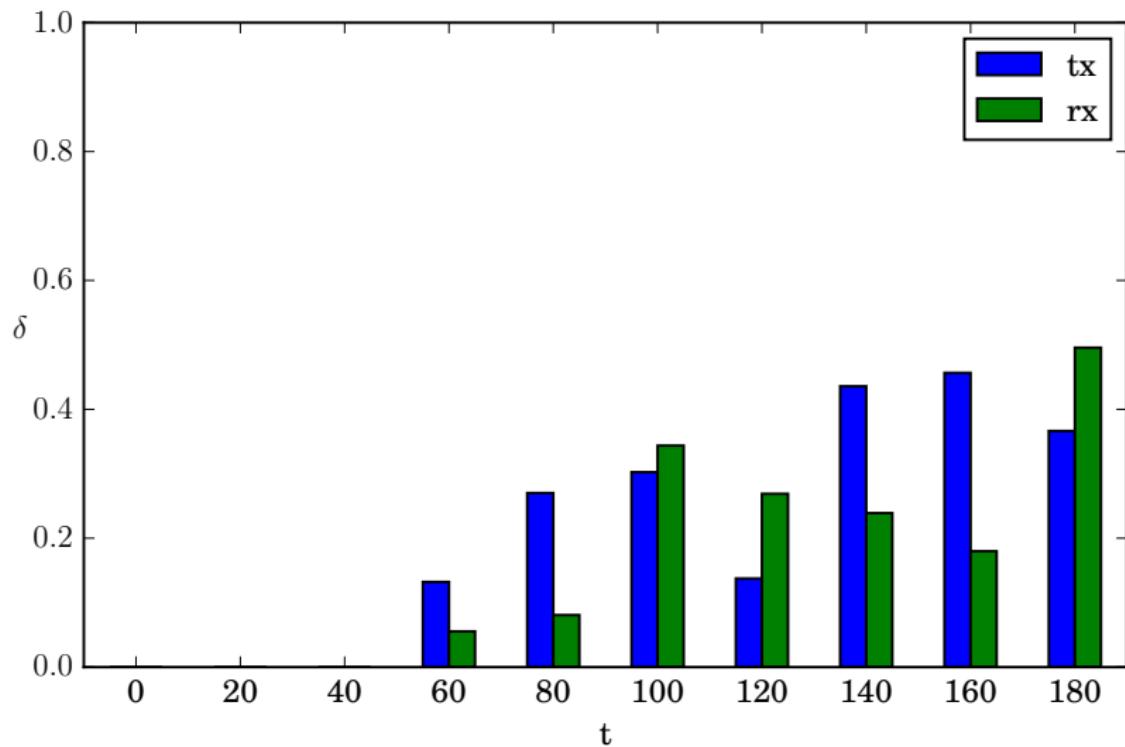
$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 3



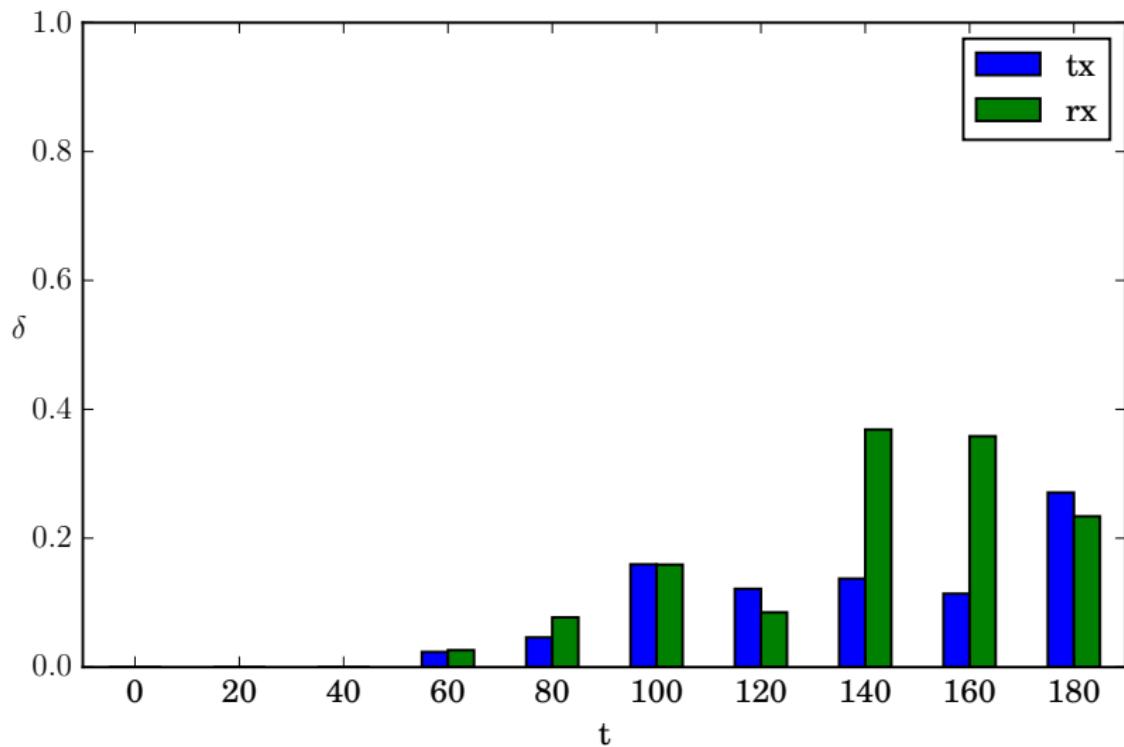
$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 4



$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 5



$\delta(t)$ - Estimation “maillée” - 6



Évaluation (Aptitude)

Overview

- ▶ Détermine à quelle point un individu est une bonne solution
- ▶ Modélisation la plus liée au problème
- ▶ Aucune hypothèse n'est faite sur cette fonction

$$f(\mathcal{C}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma(\mathcal{C}) - \Gamma(\mathcal{C}_{\min})}{\Gamma(\mathcal{C}_{\max}) - \Gamma(\mathcal{C}_{\min})} + \frac{\mathcal{L}(\mathcal{C}) - \mathcal{L}(\mathcal{C}_{\min})}{\mathcal{L}(\mathcal{C}_{\max}) - \mathcal{L}(\mathcal{C}_{\min})} \right) \quad (23)$$

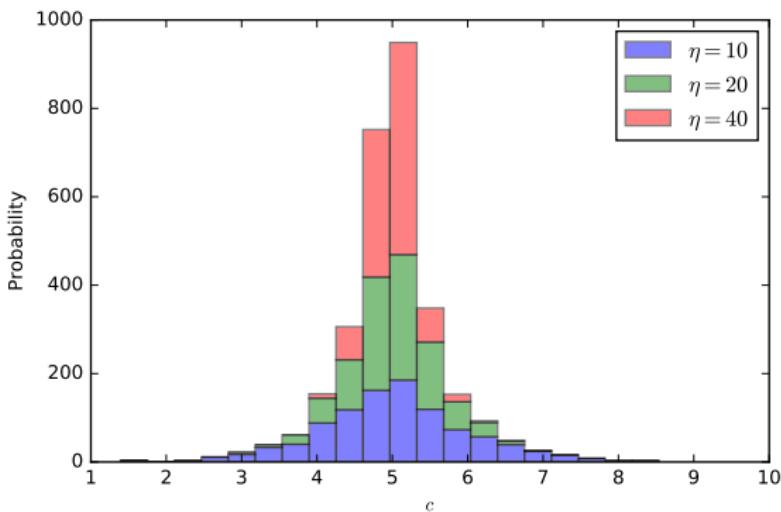
$$= \frac{1}{2} \left(\Gamma(\mathcal{C}) + \frac{\mathcal{L}(\mathcal{C}) - \mathcal{L}(\mathcal{C}_{\min})}{\mathcal{L}(\mathcal{C}_{\max}) - \mathcal{L}(\mathcal{C}_{\min})} \right) \quad (24)$$



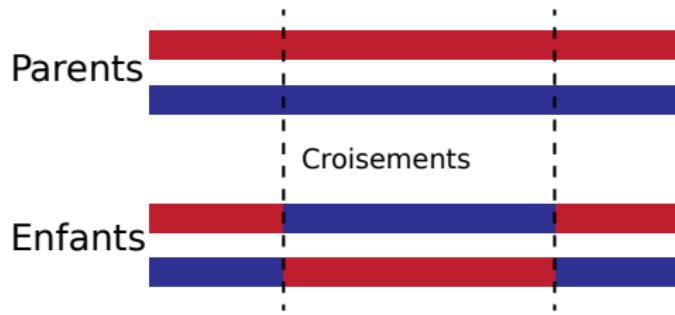
Mutation

Mutation polynomiale

- ▶ p_m : Probabilité que la mutation se produise (0.2)
- ▶ η_m : Index de la distribution (Valeur recommandée: 20)



Crossover



Qu'est ce que la reproductibilité ?

Définition

Une expérience est dite reproductible si elle peut être reproduite par son auteur ou un tiers de manière indépendante et arriver aux mêmes conclusions.

Intérêt

- ▶ Fondation de la méthode scientifique.
- ▶ Accélérateur de recherche: permet de construire sur des résultats établis.
- ▶ Visibilité: les résultats reproductibles sont plus cités
- ▶ Transparence: Résultats acceptés plus facilement
- ▶ Utile pour le transfert industriel



Contexte & État de l'art

Rapport de Collberg (2014)

- ▶ 8 conférences ACM et 4 journaux.
- ▶ 102 résultats reproductibles sur 515 (80% non-reproductible).

Besoins

- ▶ Accès libre à la publication
- ▶ Accès libre aux données
- ▶ Accès libre aux composants logiciels utilisés
- ▶ Environnement d'exécution
- ▶ Référence stables



Niveaux de réalité

Simulation

Contrôle total des conditions

Émulation

Prise en compte de l'architecture matérielle cible

Testbed

Passage à l'échelle

Environnement réel

Conditions réelles



Contexte & État de l'art dans les réseaux de capteurs

Contexte

- ▶ Simulation (COOJA)
- ▶ Émulation de plateforme contrainte (MSPSIM)
- ▶ Déploiement sur des nœuds réels dans un testbed (FIT IoT-lab)

État de l'art

- ▶ Modélisation d'une expérience (Simulation)
- ▶ Fédérations de testbed
- ▶ Difficile de passer d'une expérience sur simulation à un déploiement réel



Enjeux de la recherche reproductible

Recherche reproductible

- ▶ Refaire une expérience.
- ▶ Partager facilement une expérience.
- ▶ Réduire le temps de mise en place d'une expérience.



Contribution

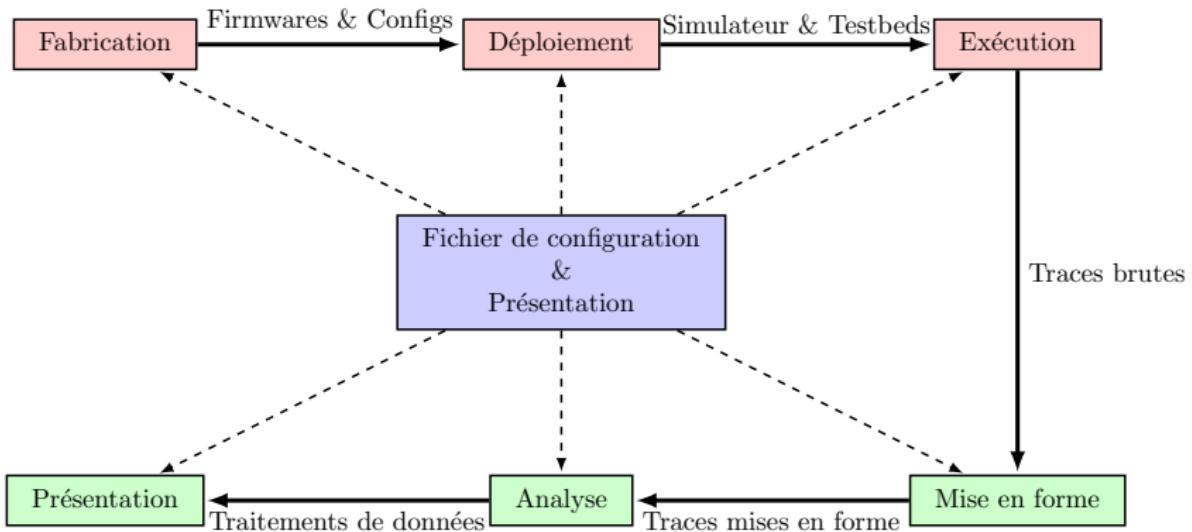
Makesense

- ▶ Décompose une étape en une série d'étapes indépendantes les unes des autres.
- ▶ Permet d'avoir une exécution commune dans des contextes différents.

Outils

- ▶ Notebook: Documentation & Runtime.
- ▶ Moteur de gabarit.
- ▶ Gestion de version & intégration continue.

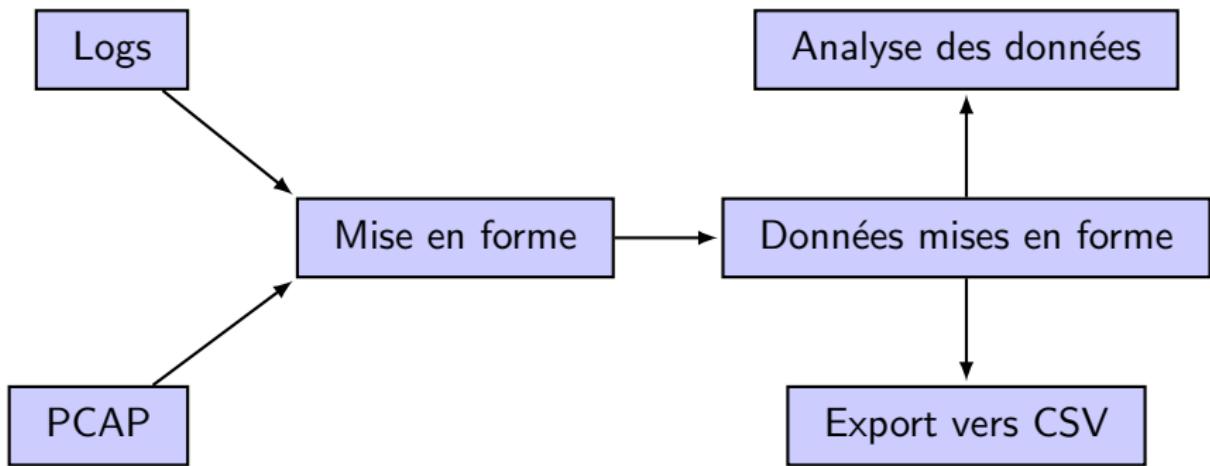
Makesense Workflow



Screenshot



Gestion des traces



Conclusion

Makesense

- ▶ Réduction du temps de démarrage
- ▶ Réduire le temps nécessaire pour migrer une simulation vers un testbed
- ▶ Eviter le Not Invented Here
- ▶ Le notebook est une bonne interface pour présenter des résultats

Recherche Reproductible

- ▶ Nécessité de la méthode scientifique
- ▶ Des outils existent pour la rendre accessible.