

Soutenance de Doctorat (LMD) en Mathématiques Appliquées,
Option : Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision

Evaluation de performances des Réseaux de capteurs sans fil IEEE 802.15.4

Présenté par: Celia Ouanteur

Sous la direction de:

Pr. Djamil Aïssani & Pr. Louiza Bouallouche

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

Introduction

- Ces deux dernières décennies, les réseaux sans fil ont connu un engouement informatique comme jamais dans l'histoire.
- Un réseau sans fil permet de communiquer à distance et d'accéder à des applications ou à des informations sans nécessiter de connexion filaire.
- L'utilisateur jouit ainsi d'une réelle mobilité et d'une meilleure accessibilité aux services et applications réseau.



Introduction

- Ces deux dernières décennies, les réseaux sans fil ont connu un engouement informatique comme jamais dans l'histoire.
- Un réseau sans fil permet de communiquer à distance et d'accéder à des applications ou à des informations sans nécessiter de connexion filaire.
- L'utilisateur jouit ainsi d'une réelle mobilité et d'une meilleure accessibilité aux services et applications réseau.



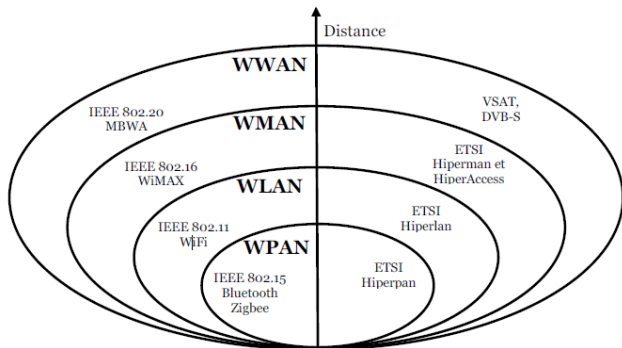
Introduction

- Ces deux dernières décennies, les réseaux sans fil ont connu un engouement informatique comme jamais dans l'histoire.
- Un réseau sans fil permet de communiquer à distance et d'accéder à des applications ou à des informations sans nécessiter de connexion filaire.
- L'utilisateur jouit ainsi d'une réelle mobilité et d'une meilleure accessibilité aux services et applications réseau.

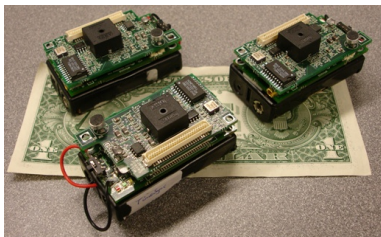


Classification des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil se déclinent en plusieurs catégories, selon la distance qu'ils couvrent :



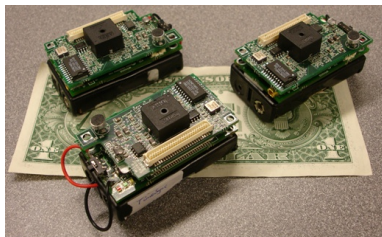
Généralité sur les RCSFs



capteur

- capture/ traitement de données physiques ;
- transmission sans fil ;

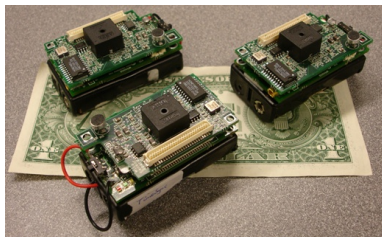
Généralité sur les RCSFs



capteur

- capture/ traitement de données physiques ;
- transmission sans fil ;
- énergie (batterie).

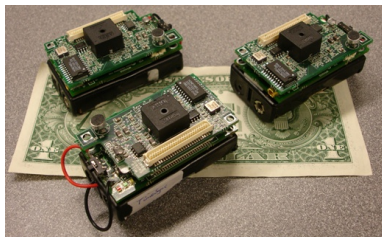
Généralité sur les RCSFs



capteur

- capture/ traitement de données physiques ;
- transmission sans fil ;
- énergie (batterie).

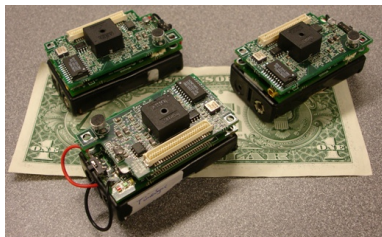
Généralité sur les RCSFs



capteur

- capture/ traitement de données physiques ;
- transmission sans fil ;
- énergie (batterie).

Généralité sur les RCSFs



capteur

- capture/ traitement de données physiques ;
- transmission sans fil ;
- énergie (batterie).

Caractéristiques des RCSFs

- auto-configuration des nœuds capteurs.
- scalabilité.
- consommation réduite d'énergie.

Généralité sur les RCSFs

Domaines d'application des RCSFs

- **Domaine militaire** : exemple, suivi des mouvements de l'ennemi ;
- **Domaine agricole** : exemple, surveillance des cultures ;
- **Domaine médicale** : exemple, suivi des personnes âgées ;
- **Domaine industriel** : exemple, suivi du procédé industriel.



Généralité sur les RCSFs

Domaines d'application des RCSFs

- Domaine militaire : exemple, suivi des mouvements de l'ennemi ;
- Domaine agricole : exemple, surveillance des cultures ;
- Domaine médicale : exemple, suivi des personnes âgées ;
- Domaine industriel : exemple, suivi du procédé industriel.



Agriculture de précision

Généralité sur les RCSFs

Domaines d'application des RCSFs

- Domaine militaire : exemple, suivi des mouvements de l'ennemi ;
- Domaine agricole : exemple, surveillance des cultures ;
- Domaine médicale : exemple, suivi des personnes âgées ;
- Domaine industriel : exemple, suivi du procédé industriel.



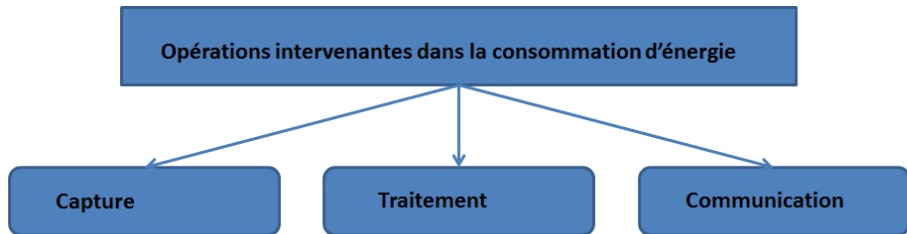
Généralité sur les RCSFs

Domaines d'application des RCSFs

- Domaine militaire : exemple, suivi des mouvements de l'ennemi ;
- Domaine agricole : exemple, surveillance des cultures ;
- Domaine médicale : exemple, suivi des personnes âgées ;
- Domaine industriel : exemple, suivi du procédé industriel.

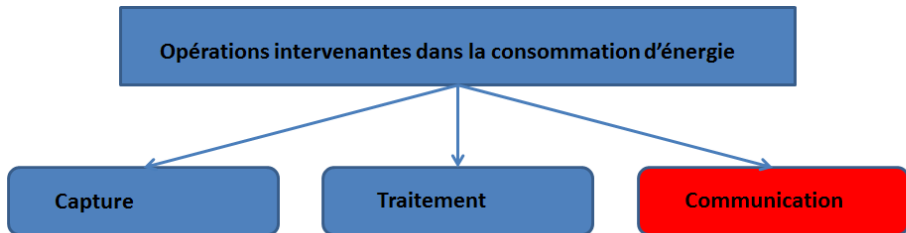


Généralité sur les RCSFs



Elle représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud capteur (70% environ)

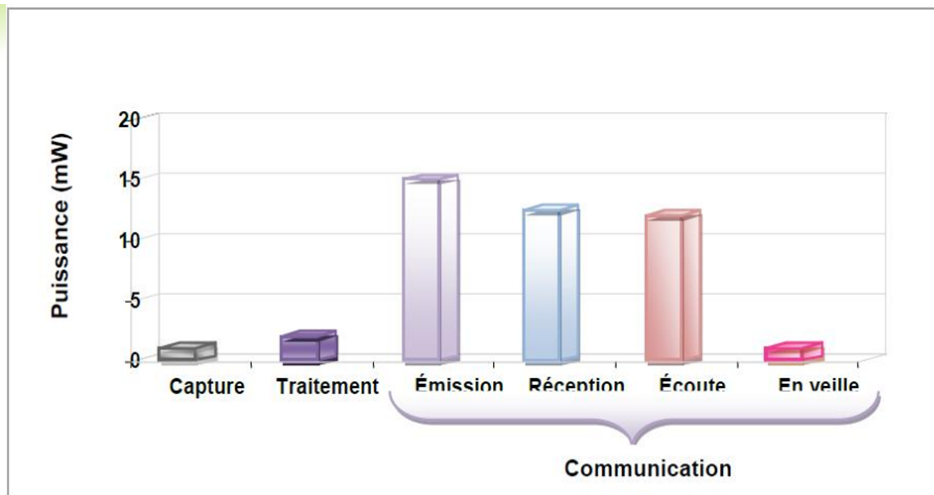
Généralité sur les RCSFs



Elle représente la plus grande proportion de l'énergie totale consommée au niveau d'un nœud capteur (**70% environ**)

Généralité sur les RCSFs

Généralité sur les RCSFs



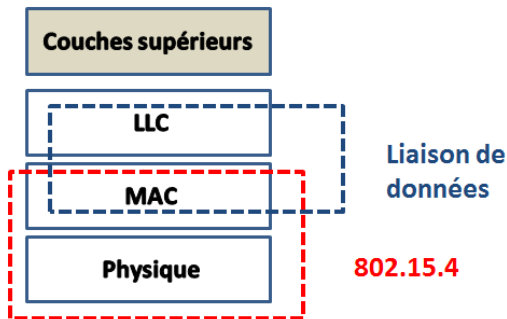
Généralité sur les RCSFs

Les standards de communication des RCSFs

Parmi les protocoles de haut niveau, basés sur la norme IEEE 802.15.4, il y a :



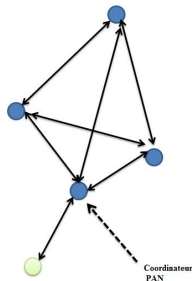
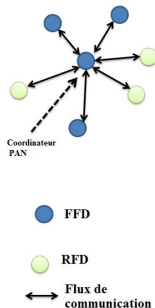
Description de la norme IEEE 802.15.4



Topologies du réseau

Deux topologies de base sont autorisées, depuis la définition des fonctionnalités des couches supérieures de la norme IEEE 802.15.4 :

- 1 La topologie en étoile ;
- 2 La topologie peer- to-peer.

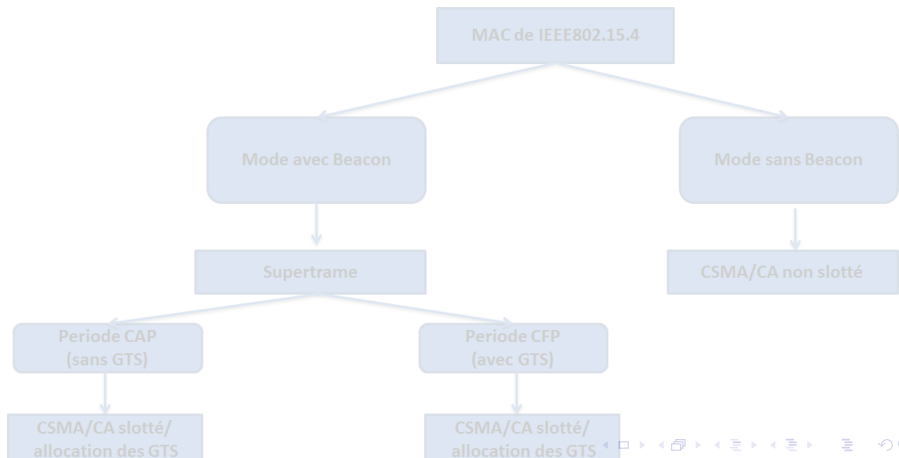


- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

La sous couche MAC

Parmi les fonctionnalités de gestion essentielles de la sous-couche MAC 802.15.4 nous citons :

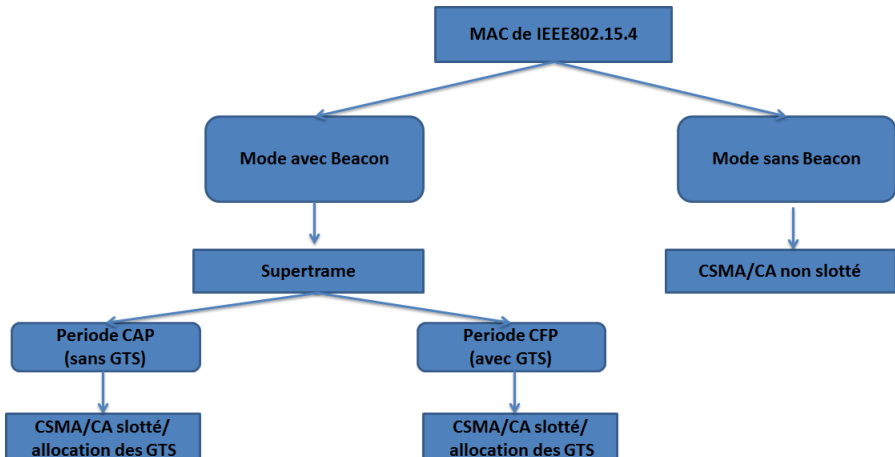
- l'accès au médium,



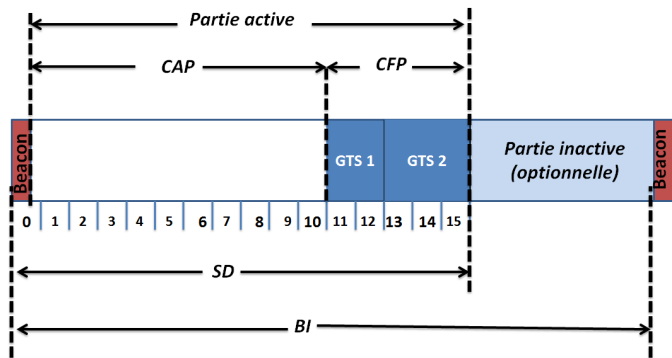
La sous couche MAC

Parmi les fonctionnalités de gestion essentielles de la sous-couche MAC 802.15.4 nous citons :

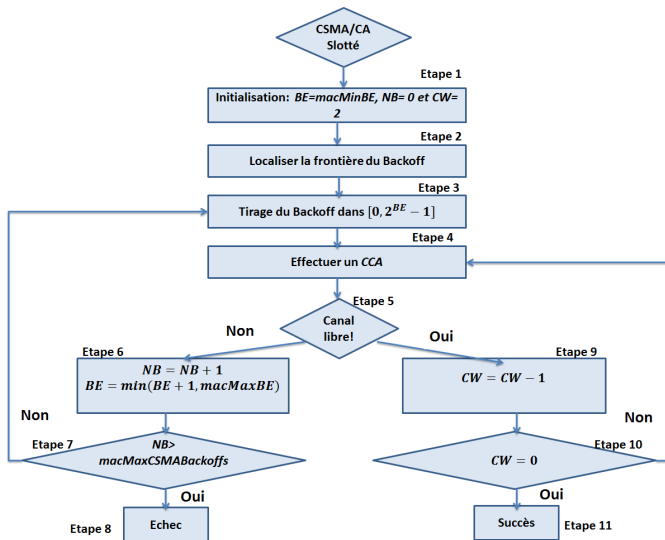
- l'accès au médium,



Structure de la supertrame





Algorithme du mécanisme CSMA/CA slotté







Synthèse sur les travaux existants

Travaux	Hypotheses				Métriques de performances					
	ACK	Ret	GTS	Inact	De	F	D	E	R	P
G. Lu (2004)			✓		✓		✓	✓	✓	
Misic (2004)	✓			✓	✓			✓		
T. Park (2005)	✓			✓			✓	✓		
Misic (2006)	✓	✓		✓			✓			
Koubaa (2007)	✓		✓	✓			✓	✓		
Ramachandran (2007)	✓	✓		✓			✓			
Patro (2007)	✓				✓					✓
Pollin (2008)	✓				✓			✓		
Sahoo (2008)	✓	✓			✓			✓		
Park (2009)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
Wen (2009)	✓				✓		✓	✓		✓
Jung (2009)	✓	✓		✓	✓					
Maratalo (2009)				✓	✓		✓			
Faridi (2010)	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
Park (2013)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		

Synthèse sur les travaux existants

Travaux	Hypotheses				Métriques de performances					
	ACK	Ret	GTS	Inact	De	F	D	E	R	P
 G. Lu (2004)			✓		✓		✓	✓	✓	
Misic (2004)	✓			✓	✓			✓		
T. Park (2005)	✓			✓			✓	✓		
Misic (2006)	✓	✓		✓			✓			
 Koubaa (2007)	✓		✓	✓			✓	✓		
Ramachandran (2007)	✓	✓		✓			✓			
Patro (2007)	✓				✓					✓
Pollin (2008)	✓				✓			✓		
Sahoo (2008)	✓	✓			✓			✓		
Park (2009)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
Wen (2009)	✓				✓		✓	✓		✓
Jung (2009)	✓	✓		✓	✓					
Maratalo (2009)				✓	✓		✓			
Faridi (2010)	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
Park (2013)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		

Synthèse sur les travaux existants

Travaux	Hypotheses				Métriques de performances					
	ACK	Ret	GTS	Inact	De	F	D	E	R	P
 G. Lu (2004)			✓		✓		✓	✓	✓	
Misic (2004)	✓			✓	✓			✓		
T. Park (2005)	✓			✓			✓	✓		
Misic (2006)	✓	✓		✓			✓			
 Koubaa (2007)	✓		✓	✓			✓	✓		
Ramachandran (2007)	✓	✓		✓			✓			
Patro (2007)	✓				✓					✓
Pollin (2008)	✓				✓			✓		
Sahoo (2008)	✓	✓			✓			✓		
 Park (2009)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
Wen (2009)	✓				✓		✓	✓		✓
Jung (2009)	✓	✓		✓	✓					
Maratalo (2009)				✓	✓		✓			
Faridi (2010)	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
 Park (2013)	✓	✓		✓		✓	✓	✓		

Synthèse sur les travaux existants

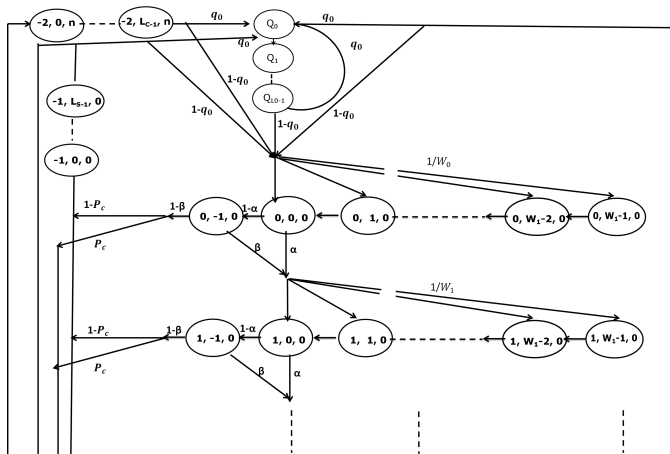


FIGURE 1: Le modèle de Park et al.

Synthèse sur les travaux existants

Le modèle de Park et al.

- Fiabilité

$$R = 1 - P_{cf} - P_{cr} \quad (1)$$

- Délai

$$D = \sum_{j=0}^n P(A_j/A_t) D_j \quad (2)$$

- Energie

$$E_{tot} = P_i \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_i-1} \sum_{j=0}^n b_{i,k,j} + P_{sc} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (b_{i,0,j} + b_{i,-1,j} \\ + P_t \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{L-1} (b_{-1,k,j} + b_{-2,k,j}) + \sum_{i=0}^n \sum_{k=L+1}^{L+L_{ack}+1} (Prb_{-1,k,j} + P_i b_{-2,k,j}) \quad (3)$$

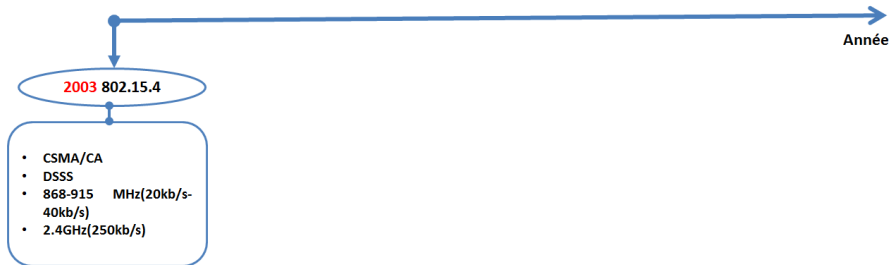
- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 **Description de la norme IEEE 802.15.4**
 - La sous couche MAC
 - **Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution**
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

Limites de la norme IEEE 802.15.4

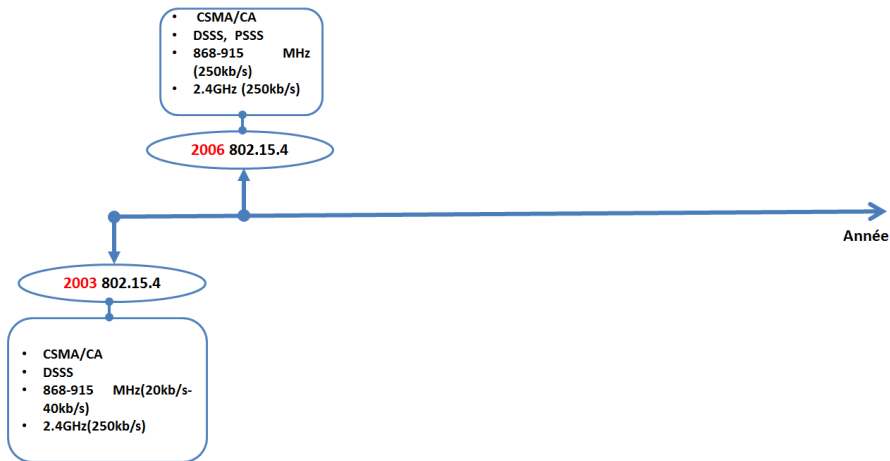
La norme IEEE 802.15.4 beacon présente quelques limites en termes de :

- **Délai non borné**
- **Fiabilité de communication limitée**
- **Non protection contre les interférences et l'évanouissement du signal**

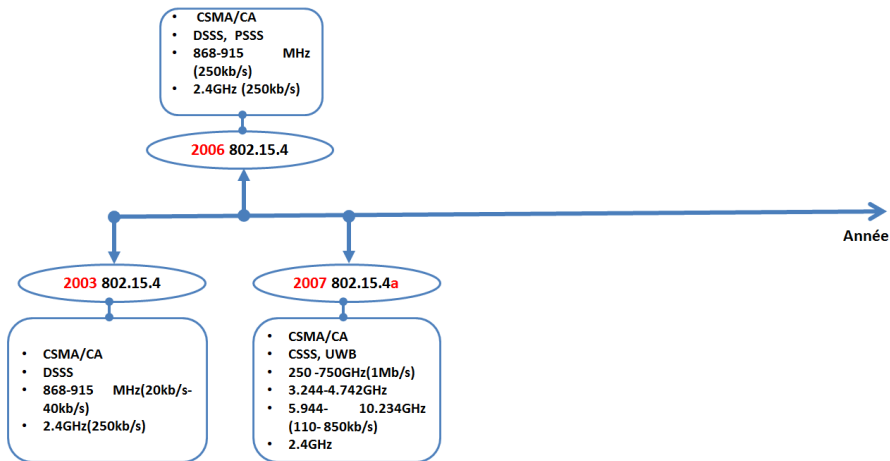
Evolution de la norme IEEE 802.15.4



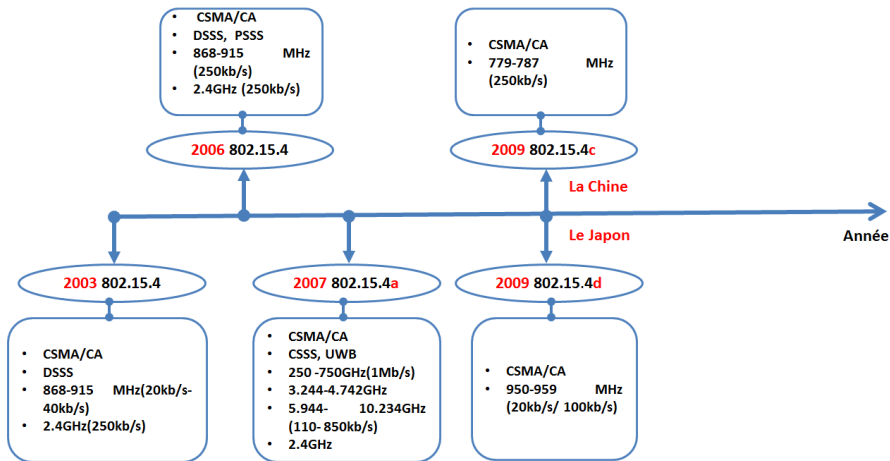
Evolution de la norme IEEE 802.15.4



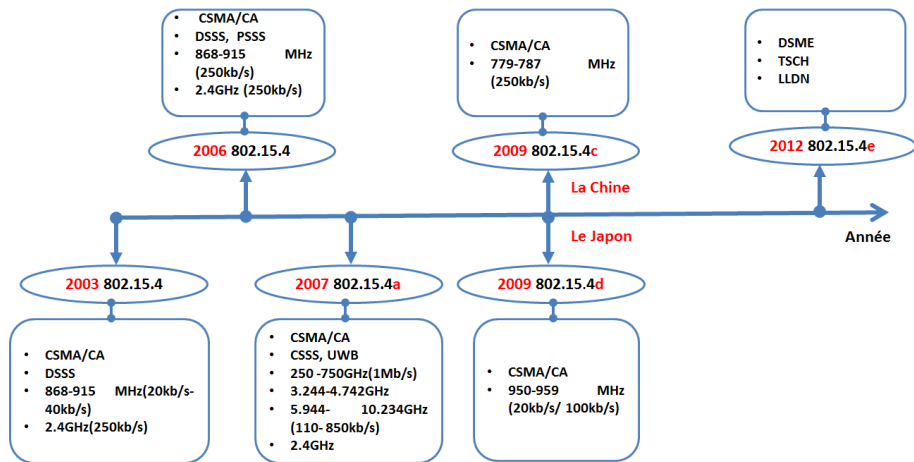
Evolution de la norme IEEE 802.15.4



Evolution de la norme IEEE 802.15.4



Evolution de la norme IEEE 802.15.4



- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 **Description de la norme IEEE 802.15.4**
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - **L'amendement IEEE 802.15.4e**
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

L'amendement IEEE 802.15.4e

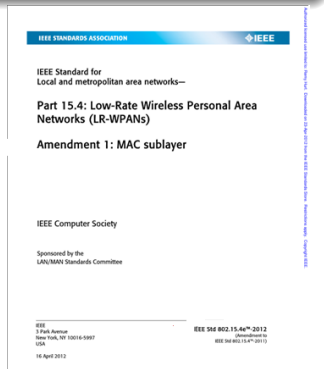
BUT : redéfinir le standard existant, afin de supporter les applications industrielles.

Le groupe de travail

802.15.4e a été créé par l'organisme **IEEE** en 2008 pour remodeler le protocole MAC existant.

Le résultat final était le document :

" IEEE 802.15.4e MAC Enhancement Standard",
approuvé en 2012.



L'amendement IEEE 802.15.4e

BUT : redéfinir le standard existant, afin de supporter les applications industrielles.

Le groupe de travail

802.15.4e a été créé par l'organisme **IEEE** en 2008 pour remodeler le protocole MAC existant.

Le résultat final était le document :

" **IEEE 802.15.4e MAC Enhancement Standard**",
approuvé en **2012**.

The screenshot shows the IEEE Standards Association website. At the top, it says "IEEE STANDARDS ASSOCIATION" with the IEEE logo. Below that, it reads "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)". A red box highlights "Amendment 1: MAC sublayer". Below this, it says "IEEE Computer Society" and "Sponsored by the LAN/MAN Standards Committee". At the bottom left, the IEEE address is listed: "IEEE, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA" with a date of "16 April 2012". At the bottom right, a red box highlights "IEEE Std 802.15.4e™-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4™-2011)".

L'amendement IEEE 802.15.4e

Le standard IEEE 802,15,4e a proposé d'intégrer les caractéristiques suivantes :

- Accès en slots (Slotted acces) ;
- Utilisation de slots dédiés et partagés (Shared and dedicated slots) ;
- Communication multicanaux ;
- Saut de canal ;
- Adaptation du canal.

Les mécanismes MAC proposés par cet amendement sont :

- Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) ;
- Low Latency Deterministic Network (LLDN) ;
- Time Slotted Channel Hopping (TSCH).

L'amendement IEEE 802.15.4e

Le standard IEEE 802,15,4e a proposé d'intégrer les caractéristiques suivantes :

- Accès en slots (Slotted acces) ;
- Utilisation de slots dédiés et partagés (Shared and dedicated slots) ;
- Communication multicanaux ;
- Saut de canal ;
- Adaptation du canal.

Les mécanismes MAC proposés par cet amendement sont :

- Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) ;
- Low Latency Deterministic Network (LLDN) ;
- Time Slotted Channel Hopping (TSCH).

L'amendement IEEE 802.15.4e

Le standard IEEE 802,15,4e a proposé d'intégrer les caractéristiques suivantes :

- Accès en slots (Slotted acces) ;
- Utilisation de slots dédiés et partagés (Shared and dedicated slots) ;
- Communication multicanaux ;
- Saut de canal ;
- Adaptation du canal.

Les mécanismes MAC proposés par cet amendement sont :

- Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) ;
- Low Latency Deterministic Network (LLDN) ;
- Time Slotted Channel Hopping (TSCH).

L'amendement IEEE 802.15.4e

Le standard IEEE 802,15,4e a proposé d'intégrer les caractéristiques suivantes :

- Accès en slots (Slotted acces) ;
- Utilisation de slots dédiés et partagés (Shared and dedicated slots) ;
- Communication multicanaux ;
- Saut de canal ;
- Adaptation du canal.

Les mécanismes MAC proposés par cet amendement sont :

- Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) ;
- Low Latency Deterministic Network (LLDN) ;
- Time Slotted Channel Hopping (TSCH).

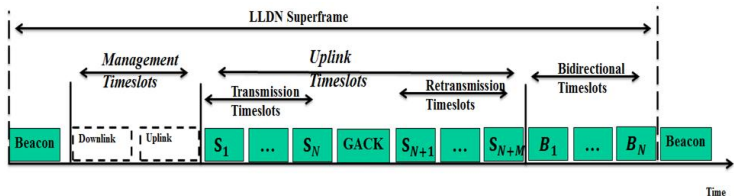
Low Latency Deterministic Network (LLDN)

Caractéristiques

- Conçu uniquement pour la topologie Etoile ;
- Utilisation d'un seul canal ;
- Utilisation de la supertrame LLDN.

Low Latency Deterministic Network (LLDN)

La supertrame LLDN



Durée d'un slot

L'amendement "e" définit la durée d'un slot de temps dans la supertrame LLDN par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{(p \times sp) + (hm + n) \times sm + IFSPeriod}{v} \quad (4)$$

Types de slots

Types de slots

- slots dédiés : transmission réussie
- slots partagés : ⇒ concurrence ⇒ Collisions ;

CSMA/CA simplifié

Afin de faire face au problème de collisions dans les timeslots partagés, le mécanisme LLDDN utilise le CSMA/CA simplifié pour accéder au canal, ce mécanisme n'est autre que le CSMA/CA, avec une modification à la retransmission qui est programmée sur un slot dédié.

Types de slots

Types de slots

- slots dédiés : transmission réussie
- slots partagés : ⇒ concurrence ⇒ Collisions ;

CSMA/CA simplifié

Afin de faire face au problème de collisions dans les timeslots partagés, le mécanisme LLDDN utilise le CSMA/CA simplifié pour accéder au canal, ce mécanisme n'est autre que le CSMA/CA, avec une modification à la retransmission qui est programmée sur un slot dédié.

Types de slots

Types de slots

- slots dédiés : transmission réussie
- slots partagés : \Rightarrow concurrence \Rightarrow Collisions ;

CSMA/CA simplifié

Afin de faire face au problème de collisions dans les timeslots partagés, le mécanisme LLDDN utilise le CSMA/CA simplifié pour accéder au canal, ce mécanisme n'est autre que le CSMA/CA, avec une modification à la retransmission qui est programmée sur un slot dédié.

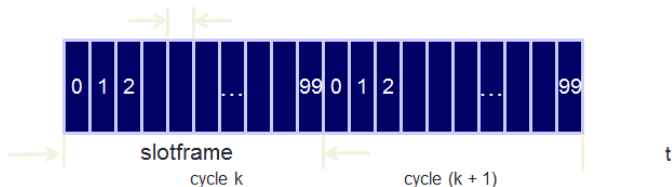
Time Slotted Channel Hopping (TSCH)

Parmi les mécanismes proposés par l'amendement IEEE 802.15.4e, le TSCH s'avère le plus complexe, il combine :

- l'accès en timeslot ;
- le saut de canal (channel hopping) ;
- la communication multicanaux.

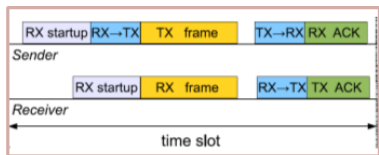
TSCH, TimeSlotted (Synchronized)

- Temps divisé en slots
- Les nœuds sont synchronisés à un "slotframe" donné
- Slotframe : groupe de time slots qui se répète dans le temps

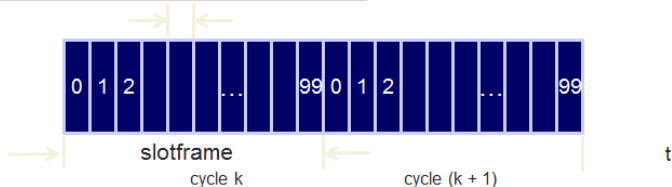


TSCH, TimeSlotted (Synchronized)

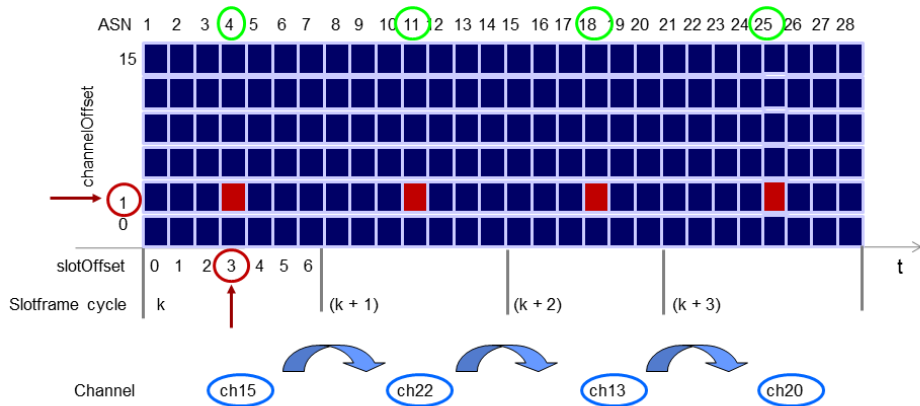
- Temps divisé en slots
- Les nœuds sont synchronisés à un "slotframe" donné
- Slotframe : groupe de time slots qui se répète dans le temps



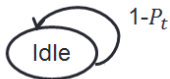
Un slot est suffisant pour transmettre et recevoir un ACK d un paquet de donnée



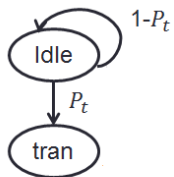
TSCH, Channel Hopping (saut de canal)



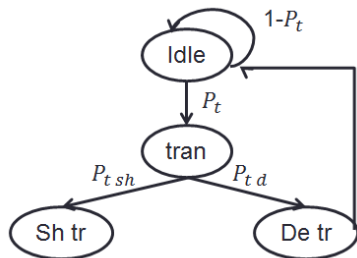
Types de liens



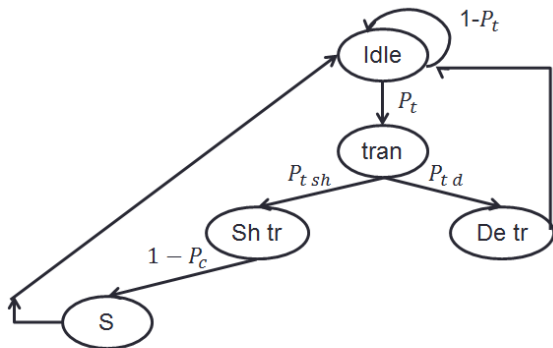
Types de liens



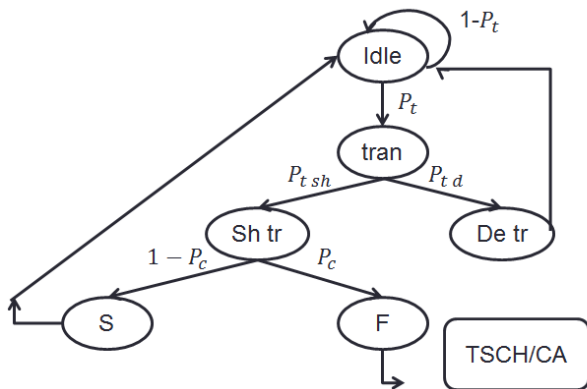
Types de liens



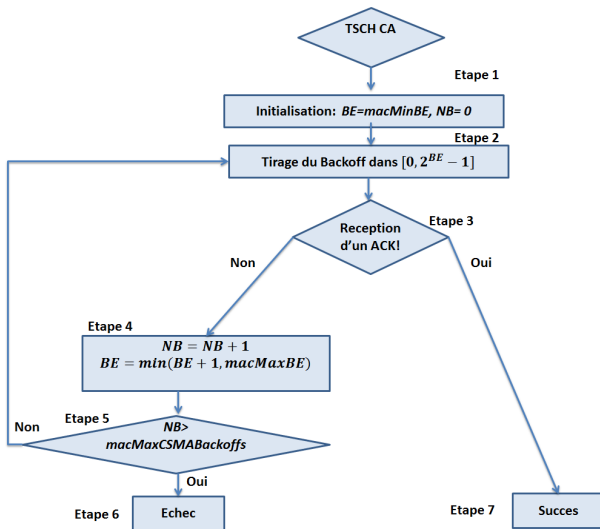
Types de liens



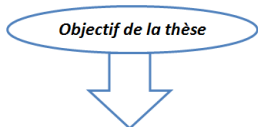
Types de liens



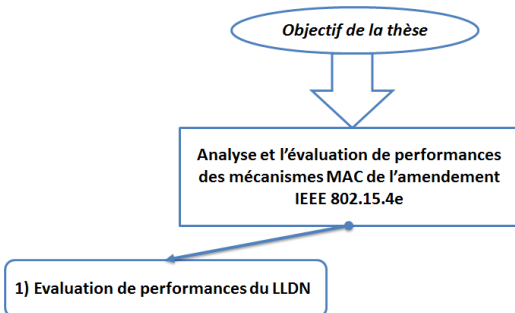
Algorithme TSCH/CA



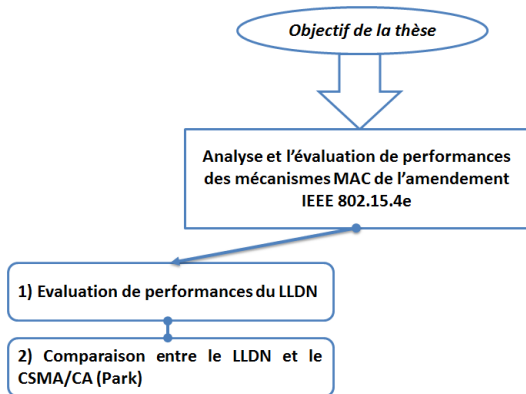
Objectif de la thèse



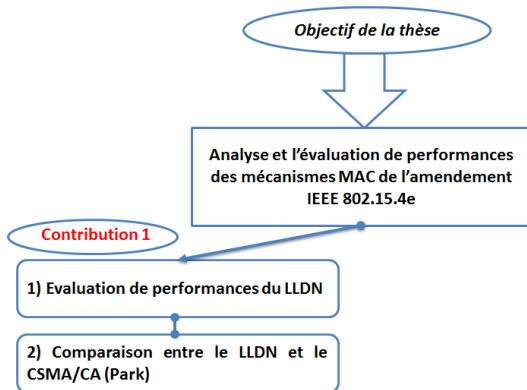
Objectif de la thèse



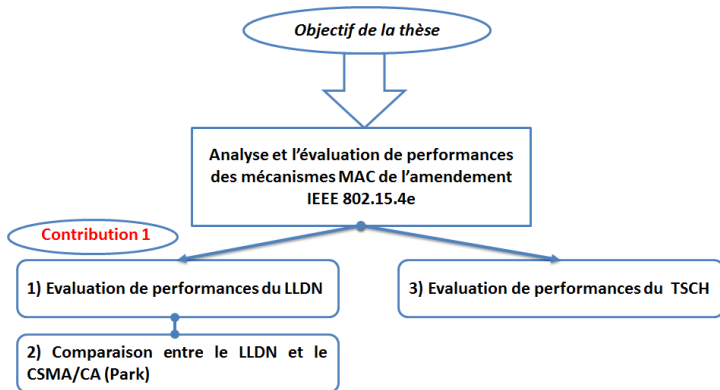
Objectif de la thèse



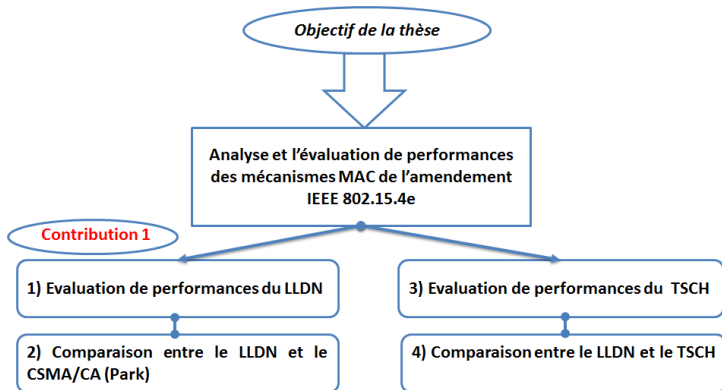
Objectif de la thèse



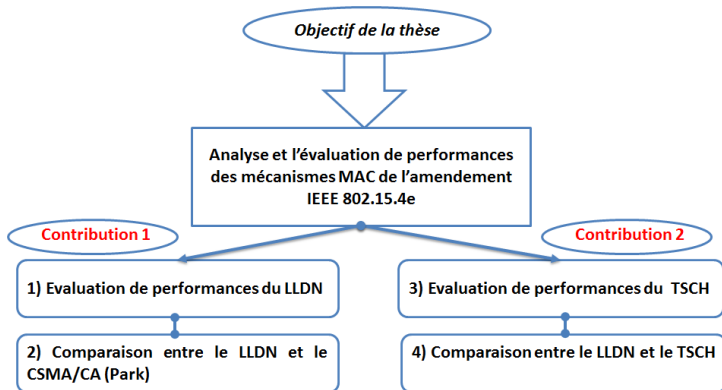
Objectif de la thèse



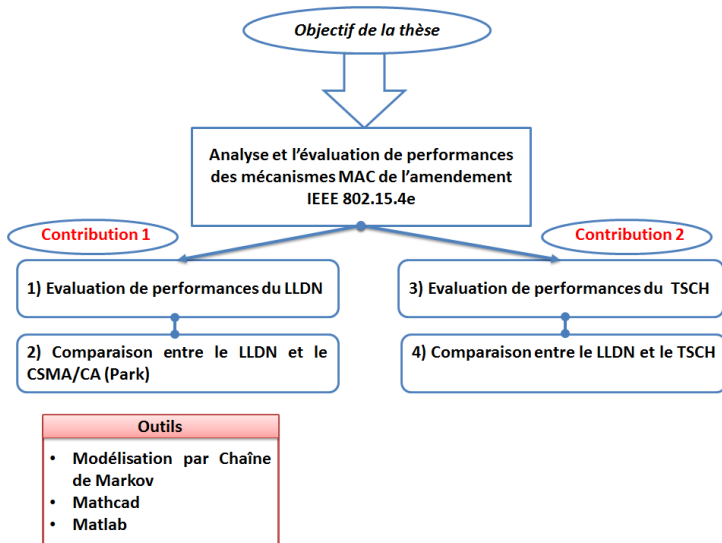
Objectif de la thèse



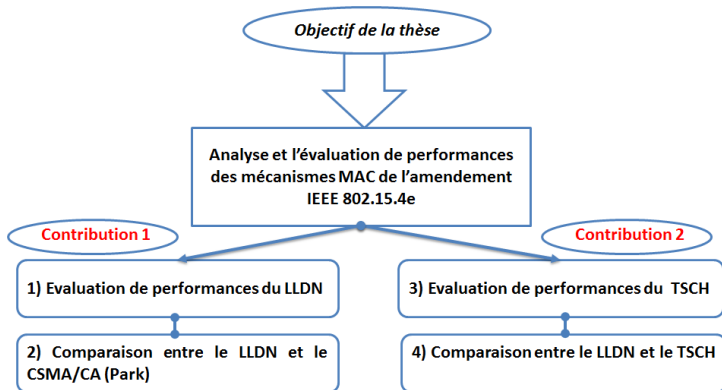
Objectif de la thèse



Objectif de la thèse



Objectif de la thèse



Outils	Métriques de performances
<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation par Chaîne de Markov • Mathcad • Matlab 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité • Energie • Débit • Délai..

Plan

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - **Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN**
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH
- 5 Conclusion et perspectives

Contribution1 : Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN

Contexte

Modélisation du mécanisme LLDN de l'amendement IEEE 802.15.4e (utilisant la méthode d'accès CSMA/CA simplifiée pour accéder aux slots partagés) et comparaison des performances avec le mode beacon de la norme IEEE 802.15.4 (utilisant la méthode CSMA/CA slotté) sous les conditions d'un canal idéal.

objectif

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'effet de la retransmission déterministe puis quantifier le niveau d'amélioration des performances du réseau 802.15.4e LLDN par rapport au réseau 802.15.4 Beacon.

Modélisation

Chaîne de Markov proposée

La chaîne de Markov que nous proposons est une chaîne discrète à trois dimensions. Elle est définie par son graphe de transitions illustré dans la Figure 2 et son ensemble d'états $E = \{s(t), w(t), r(t)\}$.

Modélisation

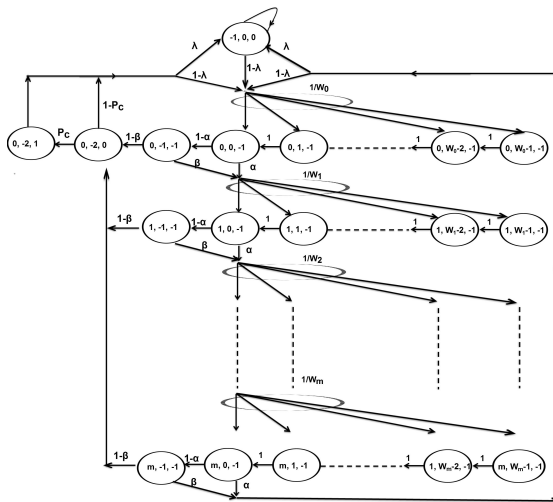


FIGURE 2: Graphe de transition de la chaîne de Markov du mécanisme LLDN

Modélisation

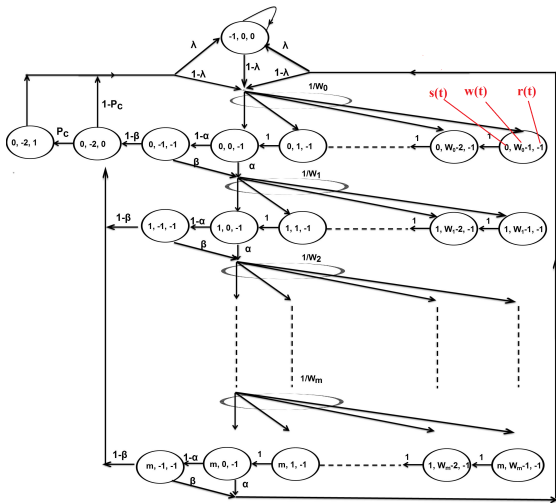


FIGURE 2: Graphe de transition de la chaîne de Markov du mécanisme LLDN



Résolution

Soit $\pi_{i,k,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, w(t) = k, r(t) = j\}$,
 $i \in (-2, m), k \in (-1, W_i - 1), j \in (-1, 1)$ la probabilité stationnaire de la C.M.

$$\tau = \sum_{i=0}^m \pi_{i,0,-1} = \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \pi_{0,0,-1}. \quad (5)$$

Avec :

$$\pi_{0,0,-1} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} + W_0 \frac{1 - (2x)^{m+1}}{1 - 2x} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \right) + \frac{\lambda}{1 - \lambda} + (1 - Pc)(1 - x^{m+1}) \right]^{-1}; \quad (6)$$

Calcul des métriques de performances

Calcul de la fiabilité

$$R = 1 - (x \cdot \pi_{m,0,-1} = x^{m+1} \pi_{0,0,-1}) \quad (7)$$

Calcul de l'énergie consommée

$$E_1 = P_{idle} \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_i-1} \pi_{i,k,-1}. \quad (8)$$

$$E_2 = P_{cca} \sum_{i=0}^m (\pi_{i,0,-1} + \pi_{i,-1,-1}). \quad (9)$$

$$E_3 = P_{trans} \times \dot{L}(\pi_{0,-2,0} + \pi_{0,-2,1}). \quad (10)$$

$$E_4 = P_{rec} \times \dot{L}_{GACK}(\pi_{0,-2,0} + \pi_{0,-2,1}). \quad (11)$$

Calcul des métriques de performances

Calcul du débit

$$S = \frac{L \times Pr \times Ps}{(1 - Pr)\sigma + Ts \times Pr \times Ps + Tc(1 - Ps)Pr}. \quad (13)$$

Calcul du délai

$$E(D) = \sum_{j=0}^1 P(A_j/A_1) [T_{CCA} + Ts + jTc + jW_{ret} + \sum_{i=0}^m P(A_i/A_m) (iT_{CCA} + \sum_{k=0}^i \frac{W_k - 1}{2} \sigma)]. \quad (14)$$

Calcul des métriques de performances

Calcul de la gigue

$$J = \sqrt{E(D^2) - (E(D))^2}. \quad (15)$$

$$E(D^2) = \sum_{j=0}^1 \frac{(1 - P_C)P_C^j}{(1 - P_C)^j} E(D_j)^2. \quad (16)$$

Evaluation de performances

Valeurs des paramètres utilisés

- taille du paquet= $8B$;
- variation de la taille du réseau ;
- comparaison aux résultats analytiques de Park pour le 802.15.4 CSMA/CA.

Evaluation de performances

FIGURE 3: Variation de la Fiabilité en fonction de la taille du réseau

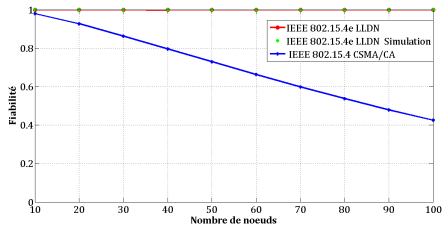
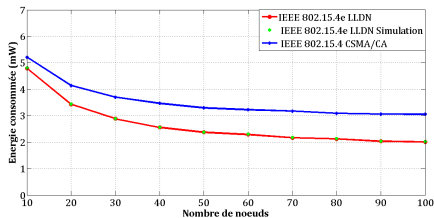


FIGURE 4: Variation de l'énergie en fonction de la taille du réseau



Evaluation de performances

FIGURE 3: Variation de la Fiabilité en fonction de la taille du réseau

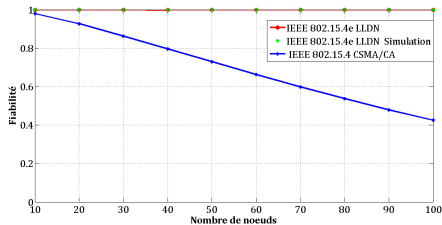
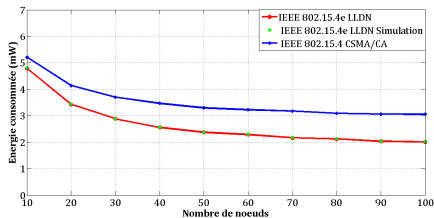


FIGURE 4: Variation de l'énergie en fonction de la taille du réseau



Evaluation de performances

FIGURE 5: Variation du débit en fonction de la taille du réseau

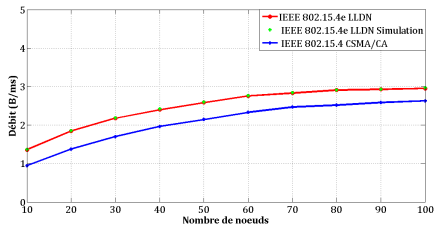
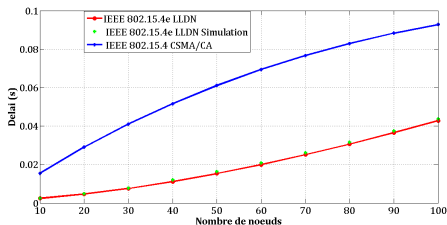


FIGURE 6: Délai en fonction de la taille du réseau



Evaluation de performances

FIGURE 5: Variation du débit en fonction de la taille du réseau

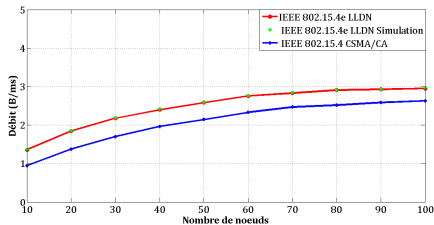
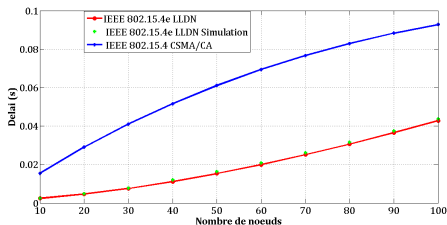


FIGURE 6: Délai en fonction de la taille du réseau



L'effet de la taille du paquet sur la fiabilité et le délai

FIGURE 7: Fiabilité en fonction de la taille du réseau pour les tailles de paquet $L = 4$ octets, $L = 8$ octets, $L = 16$ octets et $L = 32$ octets

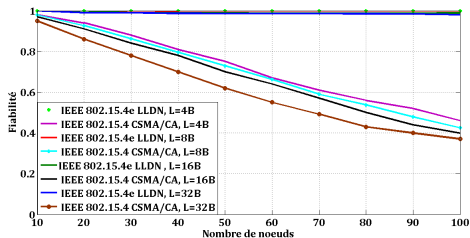
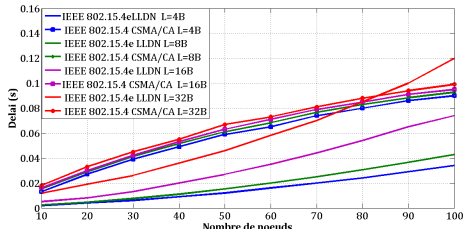


FIGURE 8: Délai en fonction de la taille du réseau pour les tailles de paquet $L = 4$ octets, $L = 8$ octets, $L = 16$ octets et $L = 32$ octets



L'effet de la taille du paquet sur la fiabilité et le délai

FIGURE 7: Fiabilité en fonction de la taille du réseau pour les tailles de paquet $L = 4$ octets, $L = 8$ octets, $L = 16$ octets et $L = 32$ octets

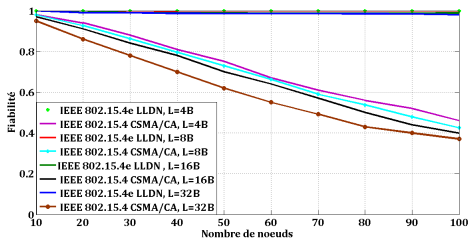
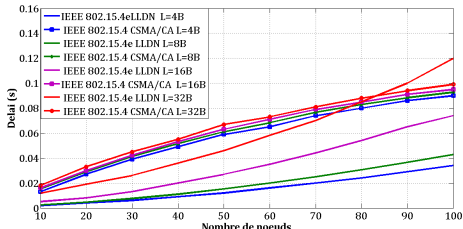


FIGURE 8: Délai en fonction de la taille du réseau pour les tailles de paquet $L = 4$ octets, $L = 8$ octets, $L = 16$ octets et $L = 32$ octets



Plan

- 1 Introduction et Généralités sur les Réseaux sans fil (RCSFs)
- 2 Description de la norme IEEE 802.15.4
 - La sous couche MAC
 - Limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution
 - L'amendement IEEE 802.15.4e
 - Description du mécanisme LLDN
 - Description du mécanisme TSCH
- 3 Problématique et Objectif de la thèse
- 4 Contributions
 - Modélisation et évaluation de performances du mécanisme LLDN
 - **Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH**
- 5 Conclusion et perspectives

Modélisation et évaluation de performances du mécanisme TSCH

Contexte

Modélisation du mécanisme TSCH (utilisant la méthode TSCH/CA) et comparaison avec le mode LLDN (utilisant la méthode CSMA/CA simplifiée) sous les conditions d'un canal idéal.

objectif

L'objectif de ce travail est de mettre en exergue l'impact de la transmission simultanée et l'utilisation de plusieurs canaux.

Modélisation

La chaîne de Markov que nous proposons dans la Figure 9 est une chaîne de Markov à temps discret à deux dimensions, elle modélise le mécanisme TSCH/CA de la norme IEEE 802.15.4e. Notre modèle est général et prend en compte la possibilité de transmission sur un lien dédié ou partagé. Dans cette chaîne, nous définissons un sous ensemble d'états E composé de deux processus stochastiques, $E = \{s(t); c(t)\}$.

Modélisation

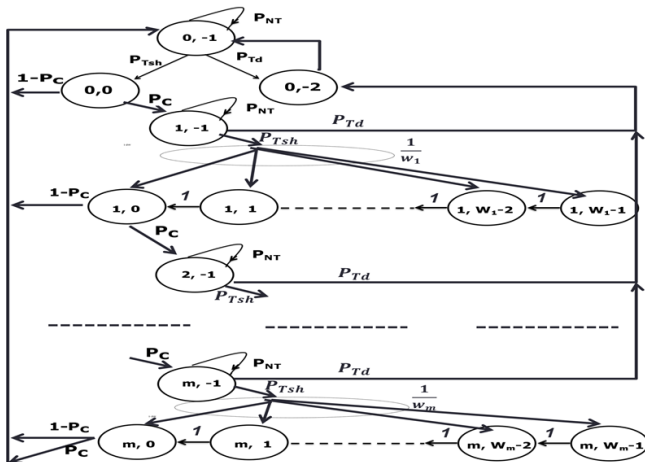


FIGURE 9: Graphe de transition de la chaîne de Markov du mécanisme 802.15.4e

Modélisation

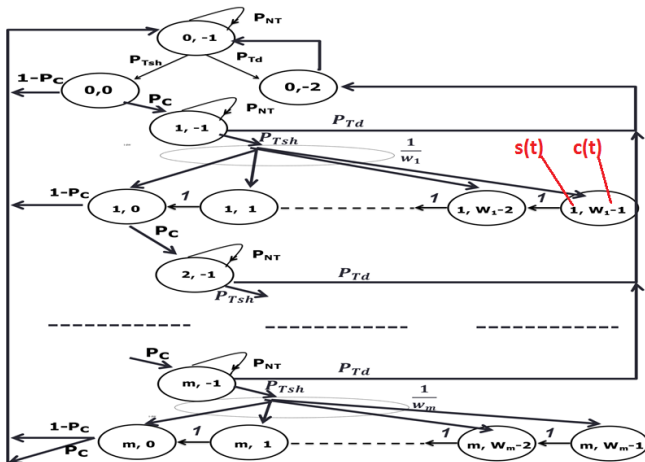


FIGURE 9: Graphe de transition de la chaîne de Markov du mécanisme 802.15.4e

Modélisation

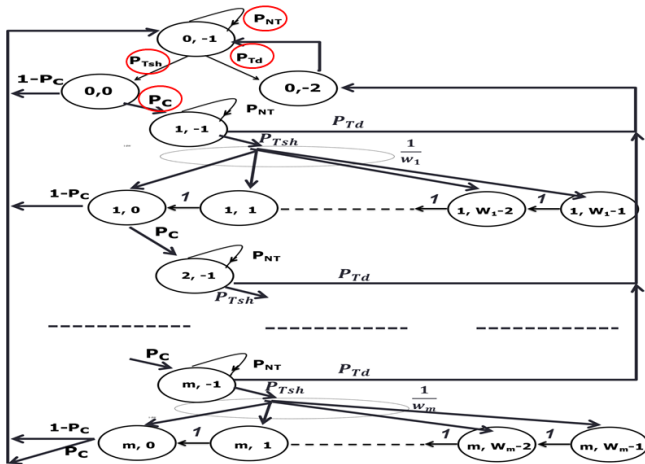


FIGURE 9: Graphe de transition de la chaîne de Markov du mécanisme 802.15.4e

Résolution

$$P_{Nt} = \frac{N - (Cd + Cp)}{N} \quad (17)$$

$$P_{Td} = Cd/N \quad (18)$$

$$P_{Tsh} = Csh/N \quad (19)$$

$$P_c = 1 - (1 - \tau_1)^{N - Nd - 1} \quad (20)$$

Résolution

Soit $\pi_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P(s(t) = i, c(t) = k)$, $i \in (0, m)$, $k \in (-2, W_i - 1)$ la probabilité stationnaire de la C.M.

$$\tau_1 = \sum_{i=0}^m \pi_{i,0} = P_{Tsh} \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \pi_{0,-1} \quad (21)$$

$$\tau_2 = \pi_{0,-2} = P_{Td} \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \pi_{0,-1} \quad (22)$$

Avec :

$$\pi_{0,-1} = \left[1 + P_{Td} \left(\frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \right) + P_{Tsh} + P_{Td} \left(\frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} \right) + \frac{1}{2} P_{Tsh} x \left(\frac{1 - x^m}{1 - x} + W_1 \frac{1 - (2x)^m}{1 - 2x} \right) \right]^{-1} \quad (23)$$

Calcul des métriques de performances

La fiabilité

$$R = 1 - (P_c \cdot \pi_{m,0}). \quad (24)$$

L'énergie consommée

$$E'_1 = P_{idle} \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{W_i-1} \pi_{i,k} + \sum_{i=0}^m \pi_{i,-1}. \quad (25)$$

$$E'_2 = P_{trans} \times \dot{L} \left(\sum_{i=0}^m \pi_{i,0} + \pi_{0,-2} \right). \quad (26)$$

$$E'_3 = P_{rec} \times \dot{L}_{ACK} \left(\sum_{i=0}^m \pi_{i,0} + \pi_{0,-2} \right). \quad (27)$$

$$E'_{tot} = E'_1 + E'_2 + E'_3. \quad (28)$$

Calcul des métriques de performances

Le débit

$$S' = C_d \cdot \frac{Lp \cdot P's}{(1 - \tau_2)\sigma + \tau_2 T_s} + C_{sh} \cdot \frac{Lp \cdot P'_{Sh}}{(1 - P_{tp})\sigma + P_{tp} \cdot P'_{Sh} \cdot T_s + P_{tp} \cdot (1 - P'_{Sh}) \cdot T_c} \quad (29)$$

Le délai

$$E'(D) = P_{Td} \left(\sum_{i=0}^m P(A_i/A_m) [T_s + i \cdot T_c] \right) + P_{Tsh} \left(\sum_{i=0}^m P(B_i/B_m) [t_s + i \cdot t_c + \sum_{k=0}^i \frac{W_k - 1}{2} \sigma] \right) \quad (30)$$

Evaluation de performances

Valeurs des paramètres utilisés

- taille de paquet= 100B ;
- variation du nombre de canaux de 4 à 16 canaux ;
- variation de la taille du réseau ;
- comparaison aux résultats analytiques du TSCH et le LLDN ;

Evaluation de performances, Effet du nombre de canaux

FIGURE 10: Variation de la fiabilité en fonction du nombre de canaux

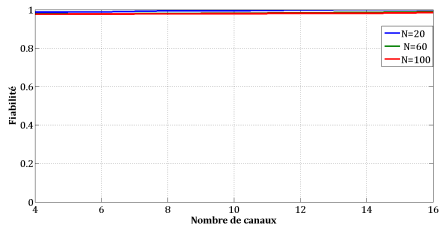
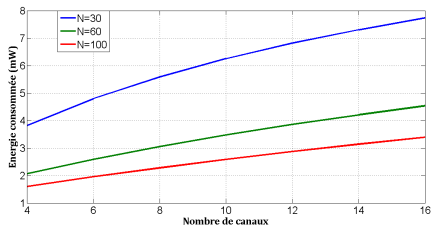


FIGURE 11: Variation de l'énergie en fonction du nombre de canaux



Evaluation de performances, Effet du nombre de canaux

FIGURE 10: Variation de la fiabilité en fonction du nombre de canaux

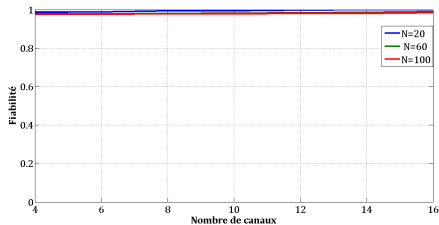
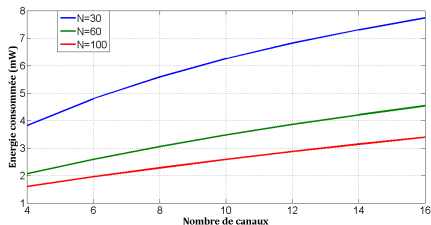


FIGURE 11: Variation de l'énergie en fonction du nombre de canaux



Evaluation de performances, Effet du nombre de canaux

FIGURE 12: Variation du débit en fonction du nombre de canaux

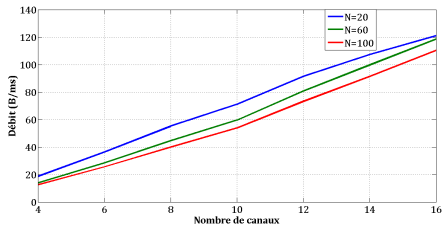
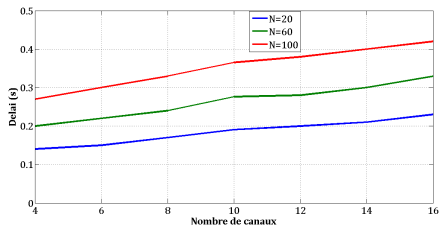


FIGURE 13: Variation du délai en fonction du nombre de canaux



Evaluation de performances, Effet du nombre de canaux

FIGURE 12: Variation du débit en fonction du nombre de canaux

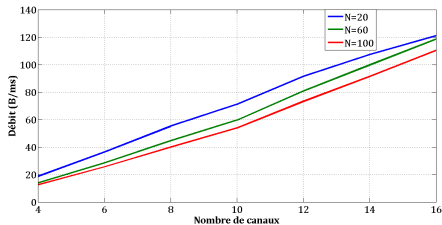
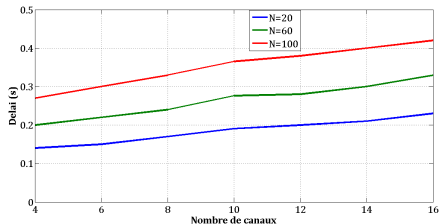
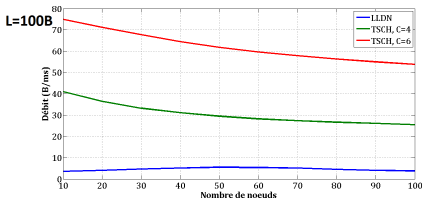
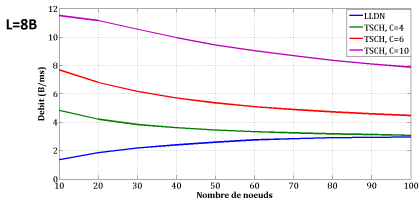
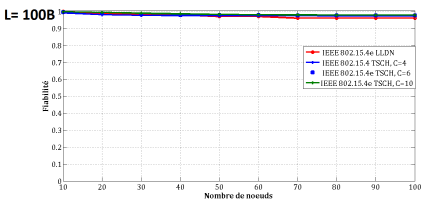
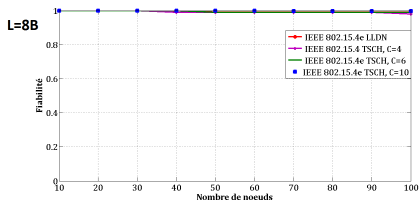


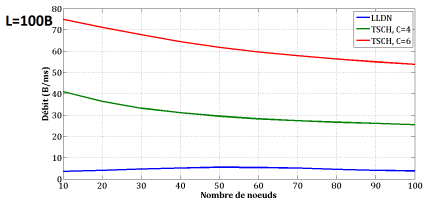
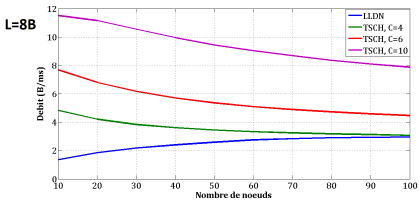
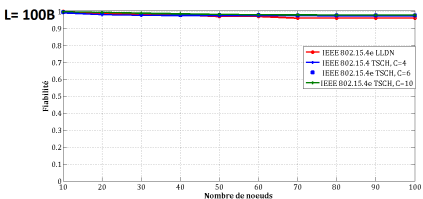
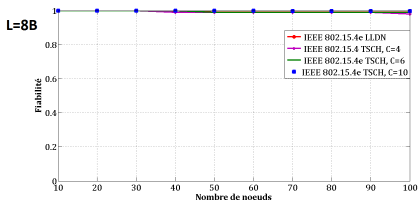
FIGURE 13: Variation du délai en fonction du nombre de canaux



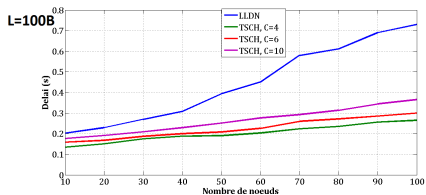
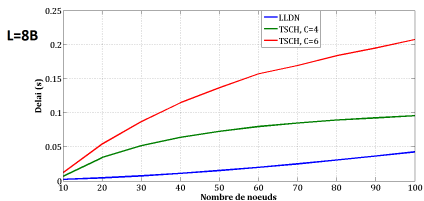
Comparaison du LLDN et TSCH pour $L = 8/100 \text{ octets}$



Comparaison du LLDN et TSCH pour $L = 8/100 \text{ octets}$



Comparaison du LLDN et TSCH pour $L = 8/100 \text{ octets}$



Conclusion et Perspectives

Pour conclure, dans cette thèse de doctorat :

- Nous avons montré l'impact de la retransmission sur un lien dédié sur les performances du réseau 802.15.4 ;
- Nous avons comparé les performances des méthodes d'accès CSMA/CA simplifié du mode LLDN et le CSMA/CA slotté du mode beacon.
- Nous avons montré l'influence de la taille du paquet sur le débit et la fiabilité pour le mode LLDN ;
- Nous avons montré l'effet de l'utilisation de plusieurs canaux et des transmissions simultanées sur les performances du réseau 802.15.4 TSCH ;
- Nous avons réalisé une analyse comparative entre les performances des modes LLDN et TSCH de l'amendement "e" ;

Conclusion et Perspectives

Pour conclure, dans cette thèse de doctorat :

- Nous avons montré l'impact de la retransmission sur un lien dédié sur les performances du réseau 802.15.4 ;
- Nous avons comparé les performances des méthodes d'accès CSMA/CA simplifié du mode LLDN et le CSMA/CA slotté du mode beacon.
- Nous avons montré l'influence de la taille du paquet sur le débit et la fiabilité pour le mode LLDN ;
- Nous avons montré l'effet de l'utilisation de plusieurs canaux et des transmissions simultanées sur les performances du réseau 802.15.4 TSCH ;
- Nous avons réalisé une analyse comparative entre les performances des modes LLDN et TSCH de l'amendement "e" ;

Conclusion et Perspectives

Pour conclure, dans cette thèse de doctorat :

- Nous avons montré l'impact de la retransmission sur un lien dédié sur les performances du réseau 802.15.4 ;
- Nous avons comparé les performances des méthodes d'accès CSMA/CA simplifié du mode LLDN et le CSMA/CA slotté du mode beacon.
- Nous avons montré l'influence de la taille du paquet sur le débit et la fiabilité pour le mode LLDN ;
- Nous avons montré l'effet de l'utilisation de plusieurs canaux et des transmissions simultanées sur les performances du réseau 802.15.4 TSCH ;
- Nous avons réalisé une analyse comparative entre les performances des modes LLDN et TSCH de l'amendement "e" ;

Conclusion et Perspectives

Pour conclure, dans cette thèse de doctorat :

- Nous avons montré l'impact de la retransmission sur un lien dédié sur les performances du réseau 802.15.4 ;
- Nous avons comparé les performances des méthodes d'accès CSMA/CA simplifié du mode LLDN et le CSMA/CA slotté du mode beacon.
- Nous avons montré l'influence de la taille du paquet sur le débit et la fiabilité pour le mode LLDN ;
- Nous avons montré l'effet de l'utilisation de plusieurs canaux et des transmissions simultanées sur les performances du réseau 802.15.4 TSCH ;
- Nous avons réalisé une analyse comparative entre les performances des modes LLDN et TSCH de l'amendement "e" ;

Conclusion et Perspectives

Pour conclure, dans cette thèse de doctorat :

- Nous avons montré l'impact de la retransmission sur un lien dédié sur les performances du réseau 802.15.4 ;
- Nous avons comparé les performances des méthodes d'accès CSMA/CA simplifié du mode LLDN et le CSMA/CA slotté du mode beacon.
- Nous avons montré l'influence de la taille du paquet sur le débit et la fiabilité pour le mode LLDN ;
- Nous avons montré l'effet de l'utilisation de plusieurs canaux et des transmissions simultanées sur les performances du réseau 802.15.4 TSCH ;
- Nous avons réalisé une analyse comparative entre les performances des modes LLDN et TSCH de l'amendement "e" ;

Conclusion et Perspectives

Donc l'utilisation du LLDN ou du TSCH dépend des besoins des applications. Par exemple, si une application nécessite un bon débit c'est le TSCH qui est recommandé. Si par contre c'est le délai qui importe, cela dépend de la taille du paquet. Ainsi, si le paquet est petit c'est le LLDN qui est préconisé, sinon c'est le TSCH. Concernant la fiabilité, les deux mécanismes fournissent de très bons résultats.

Conclusion et Perspectives

Dans la continuité de nos travaux de recherche, nous envisageons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une modification de la supertrame LLDN afin d'améliorer ses performances lorsque la taille du paquet augmente ;
- Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai, le débit et l'énergie pour le mécanisme TSCH ;
- Modélisation et évaluation de performances du mécanisme DSME ;
- Analyse comparative des trois mécanismes proposés dans l'amendement IEEE 802.15.4e, à savoir : le LLDN, le TSCH et le DSME ;
- Simulation sous un simulateur réseau (Contiki, OpenWSN).

Conclusion et Perspectives

Dans la continuité de nos travaux de recherche, nous envisageons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une modification de la supertrame LLDN afin d'améliorer ses performances lorsque la taille du paquet augmente ;
- Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai, le débit et l'énergie pour le mécanisme TSCH ;
- Modélisation et évaluation de performances du mécanisme DSME ;
- Analyse comparative des trois mécanismes proposés dans l'amendement IEEE 802.15.4e, à savoir : le LLDN, le TSCH et le DSME ;
- Simulation sous un simulateur réseau (Contiki, OpenWSN).

Conclusion et Perspectives

Dans la continuité de nos travaux de recherche, nous envisageons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une modification de la supertrame LLDN afin d'améliorer ses performances lorsque la taille du paquet augmente ;
- Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai, le débit et l'énergie pour le mécanisme TSCH ;
- Modélisation et évaluation de performances du mécanisme DSME ;
- Analyse comparative des trois mécanismes proposés dans l'amendement IEEE 802.15.4e, à savoir : le LLDN, le TSCH et le DSME ;
- Simulation sous un simulateur réseau (Contiki, OpenWSN).

Conclusion et Perspectives

Dans la continuité de nos travaux de recherche, nous envisageons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une modification de la supertrame LLDN afin d'améliorer ses performances lorsque la taille du paquet augmente ;
- Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai, le débit et l'énergie pour le mécanisme TSCH ;
- Modélisation et évaluation de performances du mécanisme DSME ;
- Analyse comparative des trois mécanismes proposés dans l'amendement IEEE 802.15.4e, à savoir : le LLDN, le TSCH et le DSME ;
- Simulation sous un simulateur réseau (Contiki, OpenWSN).

Conclusion et Perspectives

Dans la continuité de nos travaux de recherche, nous envisageons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une modification de la supertrame LLDN afin d'améliorer ses performances lorsque la taille du paquet augmente ;
- Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai, le débit et l'énergie pour le mécanisme TSCH ;
- Modélisation et évaluation de performances du mécanisme DSME ;
- Analyse comparative des trois mécanismes proposés dans l'amendement IEEE 802.15.4e, à savoir : le LLDN, le TSCH et le DSME ;
- Simulation sous un simulateur réseau (Contiki, OpenWSN).

[← Retour.](#)

Merci pour votre attention



Des questions !!