

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministre d'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Abderrahmane Mira de Béjaia**

**Faculté des Sciences Exactes**

**Département de Recherche Opérationnelle**

---

**Mémoire de fin de cycle**

**Pour l'obtention du diplôme de Master en mathématiques appliquées**

**Thème**

**Modélisation d'un protocole de contrôle de congestion dans les réseaux de  
capteur sans fil**

**Réalisé par :**

**Bouzebra Linda**

**Ouaffi Rachida**

**Encadré par :**

**OUYAHIA SAMIRA**

**devant le jury composé de :**

**Président : REBOUH NADJETTE**

**Examineurs : BELKHIRI LOUIZA**

2015 – 2016

# Dédicaces

---

Ce modeste travail est dédié à nos très chers parents pour tout les sacrifices, et les encouragements durant toute la période de nos études, que Dieu les protège et leur donne tout le bonheur du monde qu'ils méritent.

À mon mari qui toujours à côté de moi avec son soutien.

À mon très cher frère YAZID.

À mes sœurs et belles sœurs en leur souhaitant un avenir radieux et plein de réussite.

À tous nos amis qui nous avons partagés les meilleurs moments de notre vie.

À notre encadreur et à tous les enseignants et le personnel de l'université de Bejaia.

**B. Linda**

# Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener ce travail à terme.

Un grand merci à nos familles pour leur présence, leur préoccupation et le souci qu'ils se sont fait pour nous, leur encouragement et leur suivi, avec patience, du déroulement de notre projet. Surtout nos parents qui nous ont toujours soutenus .

Nous sommes très reconnaissants envers *M<sup>me</sup>* S. OUYAHIA, notre promotrice pour l'honneur qu'ils nous ont fait en assurant la direction du présent mémoire. Nous les remercions pour leurs précieux conseils et orientation.

Présider notre soutenance.

Nous remercions aussi aux examinateurs, *M<sup>me</sup>* L. BELKHIRI et *M<sup>me</sup>* N. REBOUH pour avoir accepté de juger notre travail.

Finalement, il nous est particulièrement agréable d'exprimer ici notre reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de notre travail.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>III</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>V</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Un nœud capteur . . . . .	3
1.2.1 Définition . . . . .	3
1.2.2 Architecture matérielle d'un capteur . . . . .	4
1.2.2.1 Unité de captage . . . . .	5
1.2.2.2 Unité de traitement . . . . .	5
1.2.2.3 Unité de communication . . . . .	5
1.2.2.4 Unité d'énergie . . . . .	5
1.3 Réseaux de capteurs . . . . .	6
1.3.1 Définition . . . . .	6
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	6
1.4 Classification des RCSFs . . . . .	7
1.4.1 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base . . . . .	7
1.4.2 Selon la distance entre les nœuds capteurs et la station de base . . . . .	7
1.4.3 Selon le modèle de mobilité dans les réseaux . . . . .	8
1.4.4 Selon les capacités des nœuds du réseau . . . . .	8

1.5	Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF . . . . .	8
1.5.1	Contraintes conceptuelles . . . . .	9
1.5.2	Contraintes matérielles . . . . .	10
1.6	Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	10
1.6.1	Les application militaires . . . . .	10
1.6.2	Les applications environnementales . . . . .	11
1.6.3	Les applications médicales . . . . .	11
1.6.4	Les applications de sécurité . . . . .	12
1.6.5	Les applications domestiques . . . . .	12
1.6.6	Les applications commerciales . . . . .	12
1.7	La communication dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	13
1.7.1	La pile protocolaire . . . . .	13
1.8	Conclusion . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Problème de congestion dans les RCSFs et état de l'art sur les solutions</b>	<b>16</b>
2.1	Introduction . . . . .	16
2.2	Définition de la congestion . . . . .	17
2.2.1	La congestion d'un réseau informatique . . . . .	17
2.2.2	La congestion dans les RCSFs . . . . .	17
2.3	Classification des approches de contrôle de congestion . . . . .	18
2.3.1	Mécanisme de détection de congestion . . . . .	18
2.3.2	L'objective du contrôle de congestion . . . . .	19
2.3.3	Les mécanismes de contrôle de taux de transfert . . . . .	19
2.3.4	Modèle de l'application cible . . . . .	20
2.3.5	Equité et / ou qualité de service QoS . . . . .	20
2.4	Quelques protocoles de contrôle de congestion dans les RCSFs . . . . .	21
2.4.1	COngestion Detection and Avoidance "CODA" . . . . .	21
2.4.2	Pivot Routing for Alarm Transmission "PiRAT" . . . . .	22
2.4.3	Fair Rate Allocation "FRA" . . . . .	23
2.4.4	Event-to-Sink Reliable Transport "ESRT" . . . . .	24
2.4.5	Prioritized Heterogeneous Traffic-oriented Congestion Control Proto- col "PHTCCP" . . . . .	27
2.4.6	Priority Based Congestion Control Protocol "PCCP" . . . . .	27

2.4.7	Adaptive Congestion Control Protocol "ACCP" . . . . .	28
2.5	Conclusion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Présentation et modélisation du protocole de contrôle de congestion CLCD</b>	<b>30</b>
3.1	Introduction . . . . .	30
3.2	Objectif . . . . .	30
3.3	Présentation du protocole de congestion CLCD . . . . .	30
3.3.1	Application par les chaînes de Markov . . . . .	32
3.3.2	Adaptation du taux de transmission . . . . .	33
3.4	Exemple Illustratif . . . . .	34
3.4.1	Le modèle en réseau de file d'attente . . . . .	36
3.5	Implémentation du modèle proposé . . . . .	39
3.6	Présentation Java Modelling Tools v.0.9.2 (JMT) . . . . .	39
3.7	Conclusion . . . . .	43
	<b>Conclusion générale</b>	<b>44</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>45</b>

# Table des figures

1.1	Architecteur d'un nœud capteur . . . . .	4
1.2	Architecteur d'un réseau de capteur sans fil . . . . .	6
1.3	La surveillance militaire utilisant les RCSFs . . . . .	11
1.4	La surveillance médicale utilisant les RCSFs . . . . .	12
1.5	La pile protocolaire de communication dans les RCSFs . . . . .	13
2.1	FIFO multiples pour assurer la délivrance équitable de données dans FRA . . . . .	25
2.2	Diagramme de transition du protocole ESRT . . . . .	26
3.1	Les étapes de l'approche de contrôle de congestion . . . . .	32
3.2	Le graphe de transition . . . . .	33
3.3	La topologie de l'exemple . . . . .	34
3.4	Le scénario d'envoi de quelques paquets . . . . .	34
3.5	La relation d'arrivée et de départ entre les nœuds . . . . .	36
3.6	Le graphe de transition . . . . .	38
3.7	Le principe générale de notre simulation . . . . .	40
3.8	Tableau2 : Le nombre moyen de clients dans la file d'attente . . . . .	41
3.9	Tableau3 : Le taux de perte des paquets . . . . .	41
3.10	Nombre moyen de clients . . . . .	42
3.11	Taux de perte . . . . .	42

# Liste des abréviations

**ACK** : **ACK**nowledgment

**CAN** : **C**onvertisseur **A**nalogique **N**umérique

**CTS** : **C**lear **T**o **S**end

**CSMA/CA** : **C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess with **C**ollision **A**voidance

**CLCD** **C**ross **L**ayer **C**ongestion **D**etection

**FIFO** : **F**irst **I**n **F**irst **O**ut

**IEEE** : **I**nstitu of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers

**LLC** : **L**ogical **L**ink **C**ontrol

**MAC** : **M**edium **A**ccess **C**ontrol

**NC** : **N**otification **C**ongestion

**OSI** : **O**pen **S**ystem **I**nterconnection

**QoS** : **Q**uality of **S**ervice

**RF** : **R**adio **F**réquence

**RTS** : **R**equest **T**o **S**end

**TCP** : **T**ransport **C**ontrol **P**rotocol

**WSN** : **W**ireless **S**ensor **N**etwork



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les progrès récents dans le domaine de la micro-fabrication et des technologies de communication sans fil, ont donné naissance à une nouvelle génération de réseaux, il s'agit des réseaux de capteur sans fil ( RCSF ou WSN : Wireless Sensor Network).

Les réseaux sans fil ad hoc, sont des réseaux dont la topologie ne bénéficie d'aucune infrastructure préexistante. Ces réseaux sont auto-adaptatifs ( Capable de s'organiser par eux mêmes) [1].

Un réseau de capteurs sans fil est un type particulier des réseaux ad hoc, il est constitué d'un grand nombre de dispositifs physiques appelés capteurs, pouvant relever des données de l'environnement surveillé ( température, vibration, mouvement des objets, etc) et de les transmettre vers une station de base. Les applications de ce type de réseaux sont très diverses, elles incluent le domaine militaire, la domestique, le contrôle du trafic routier, les espaces sanitaires, le diagnostic industriel et autres.

Les capteurs sont dotés de batteries de taille très réduite, à faible autonomie et qui ne sont pas remplaçables. De ce fait, le réseau doit accomplir sa mission tout en conservant l'énergie des nœuds. Cette dernière est consommée dans trois fonctions : la capture, le traitement et la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions, on cite : le type d'applications, le protocole de routage, la politique d'accès au canal de transmission, etc [2].

Le but d'un réseau de capteurs est défini par la capacité de faire router une grande quantité d'informations, à une station de base, en assurant une longue période de vie du réseau. La congestion est l'une des problématiques majeures d'un réseau de capteurs. L'une des conséquences de cette congestion est la dégradation des performances du réseau, ainsi une perte de données et une consommation inutile de la bande passante. Pour avoir une performance optimale, les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs, principalement les protocoles de routage, doivent être capables de contrôler la congestion, et la mise en place des techniques capables d'éviter ce type de congestion, devient donc une nécessité dans le domaine de la recherche.

L'objectif de notre travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans ce domaine et vise à modéliser un nouveau protocole de contrôle de congestion, nommé CLCD pour Cross Layer Congestion Detection. CLCD utilise une nouvelle technique basée sur la sur-écoute des messages de contrôle de la couche MAC, à savoir RTS et CTS, pour détecter et prévenir la congestion.

Ce mémoire est composé de trois chapitres

Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux de capteurs : leur architecture, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'applications.

Le deuxième chapitre est organisé comme suit : premièrement, nous donnerons une définition de la congestion dans les réseaux informatiques, et quelques notions sur la détection et le contrôle de congestion dans les RSCFs, ensuite, nous ferons un état de l'art sur les techniques de contrôle de congestion dans les RSCFs.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter le nouveau protocole CLCD et son modèle basé sur les chaîne de Markov et les réseau de file d'attente.

# Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

## 1.1 Introduction

Les progrès réalisés ces dernières décennies dans le domaine de la technologie de communication sans fil permettent de produire des composants de quelques millimètres cube de volume appelés micro capteur. Ces derniers sont dotés de moyens qui leurs permettent de collecter, de stocker, de traiter et de transmettre les données collectées à un centre de collecte via le canal sans fil. Ainsi, mener un travail de recherche dans ce domaine nécessite la connaissance d'un certains nombres de concepts généraux.

Dans la suite de ce chapitre, nous verrons ces concepts à travers un certain nombre de points et plan méthodologique que nous avons adopté. Nous commençons par définir un capteur, leur architecture matérielle et comment ces capteurs sont déployés pour former des réseaux de capteurs sans fil, qui seront classifiés et comparés aux réseaux Ad hoc classiques. Ensuite, les facteurs et contraintes de conception des RCSFs ainsi que les domaines d'applications de ces réseaux seront étudiés.

## 1.2 Un nœud capteur

### 1.2.1 Définition

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat comme la pression, la luminosité, la température, les vibrations. . .

Puisque ses applications sont diverses, une approche de conception modulaire est utilisée pour avoir une plate-forme flexible [3] [4]. Leurs architectures diffèrent d'un capteur à un autre.

L'utilisation de ces capteurs n'a rien d'une nouveauté, ceux-ci sont utilisés depuis longtemps dans des domaines comme l'aéronautique ou l'automobile.

### 1.2.2 Architecture matérielle d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché : les capteurs de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture matérielle similaire.

Un capteur est composé, principalement, d'unités de captage, traitement, communication, stockage, et énergie. Suivant le domaine d'application, un capteur peut contenir également des éléments supplémentaires, tel qu'un système de localisation ou bien un système générateur d'énergie (cellules solaires). On peut même trouver des capteurs un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le capteur en cas de nécessité. Le schéma de la figure 1.1 fournit une vue globale d'une architecture d'un nœud capteur [4] [5].

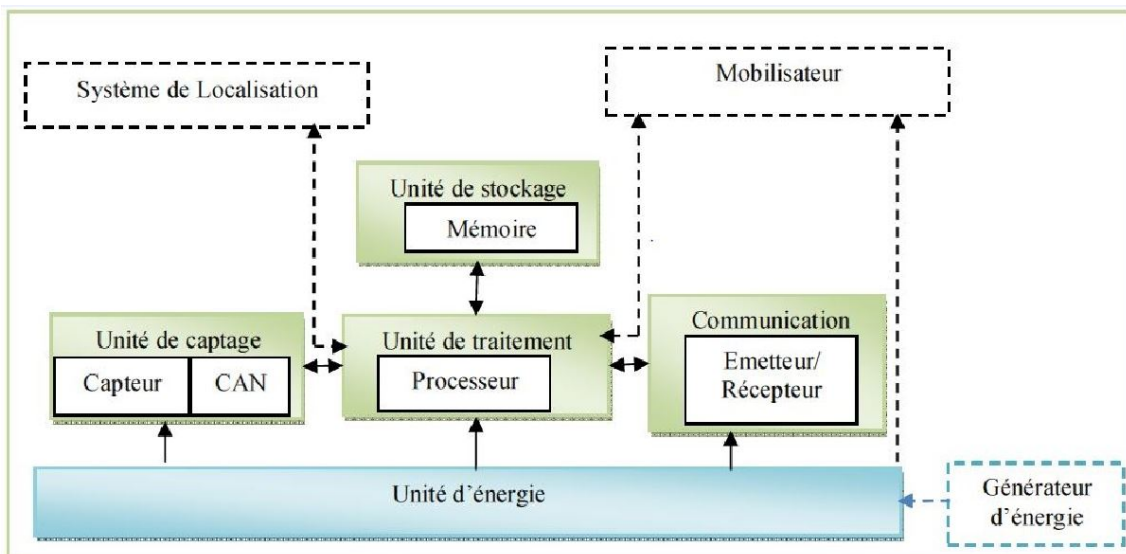


FIGURE 1.1 – Architecture d'un nœud capteur

### **1.2.2.1 Unité de captage**

La fonction principale de cette unité est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Elle est composée de deux sous unités : un dispositif qui intercepte les données du monde physique et les transforme en signaux analogiques, capteur et un convertisseur analogique/numérique (CAN) qui transforme ces signaux analogiques en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [6].

### **1.2.2.2 Unité de traitement**

Elle recueille les données de l'unité de captage ou d'autres capteurs, effectue un traitement sur ces données (si nécessaire) et décide quand et où les envoyer. Elle est constituée d'un microcontrôleur associé généralement à une petite unité de stockage (mémoire). Cette unité est chargée d'exécuter les protocoles de communications qui permettent la collaboration entre les capteurs du réseau. Comme elle peut aussi effectuer des semi traitements sur les données captées. Le microcontrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité à être relié à d'autres composants, de son bon prix et sa faible consommation énergétique [5] [6] [7].

### **1.2.2.3 Unité de communication**

Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil à faible portée [5]. Elle se base sur les différents médias de transmission comme la Radiofréquence (RF), le Laser et l'infrarouge .

### **1.2.2.4 Unité d'énergie**

Un capteur est muni d'une source, généralement une batterie responsable de l'alimentation de tous les composants du capteur. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou de remplacer une batterie, ce qui a rendu l'énergie comme contrainte principale pour un capteur [5] [9].

## 1.3 Réseaux de capteurs

### 1.3.1 Définition

Un réseau de capteur sans fil (RCSF), ou Wireless Sensor Network (WSN) en anglais, est un type particulier des réseaux ad hoc. C'est un réseau de nœuds multi fonctionnel de petite taille, placés d'une manière plus ou moins aléatoire, dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d'une manière autonome. Les nœuds capteurs communiquent généralement pour former une infrastructure de communication, rassemblent des mesures et envoient les résultats à une station de base [5].

### 1.3.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de captage. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs stations de base (puits). Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau. Cette architecture est illustrée dans la figure 1.2.

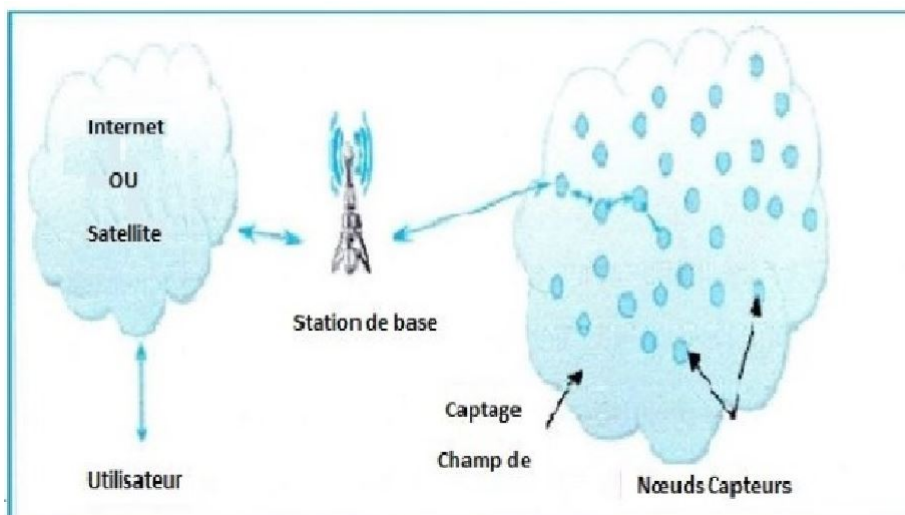


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteur sans fil

## 1.4 Classification des RCSFs

Il existe plusieurs critères pour classer les réseaux de capteurs [10]. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base, la distance entre les nœuds capteurs et la station de base, le modèle de mobilité dans les réseaux, les capacités des nœuds de réseau, etc. [11].

### 1.4.1 Selon le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données à la station de base dépend de l'application et ses exigences. Il peut être : continu (time-driven), événementiel (event-driven), à base de requête (query-driven), ou hybride.

Dans le modèle continu, les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées à la station de base. Le type d'application visé concerne les applications de type "surveillance" où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée [9].

Dans le modèle orienté événement, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'événements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'événement le plus rapide possible.

Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base.

Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents. Par exemple, dans un réseau conçu pour suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (time-driven) et un réseau de collecte de données par événement (event-driven) [12].

### 1.4.2 Selon la distance entre les nœuds capteurs et la station de base

Dans cette classification, on distingue les réseaux à un saut (single-hop) des réseaux multi sauts (multi-hop). Dans un réseau de capteurs à un seul saut, les nœuds capteurs sont dans le

voisinage immédiat de la station de base. Ils envoient alors leurs données captées directement à la station de base sans passer par aucun autre nœud intermédiaire. Tandis que dans un réseau de capteurs multi-saut, les nœuds peuvent envoyer leurs données à la station de base via des nœuds intermédiaires. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais difficile à mettre en œuvre [12].

### **1.4.3 Selon le modèle de mobilité dans les réseaux**

Cette classification consiste en une combinaison entre la mobilité des nœuds capteurs et celle de la station de base. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer des grandes catégories de réseaux : réseaux statiques et les réseaux dynamiques (ou mobile). On peut, par exemple, avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'une station de base fixe (réseau à station de base statique et à nœuds capteurs mobiles). Le but de tels réseaux est la plupart du temps l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses [13].

### **1.4.4 Selon les capacités des nœuds du réseau**

Dans cette classification, on distingue les réseaux homogènes des réseaux hétérogènes [12]. Dans un réseau de capteur homogène, tous les nœuds de réseau (nœuds capteurs, les stations de base, les passerelles) ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Alors que dans un réseau de capteurs hétérogène, il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie du réseau [13].

## **1.5 Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF**

La conception et la mise en place des RCSFs sont influencées par plusieurs contraintes (conceptuelles ou matérielles) [5]. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs : ils sont considérés également comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine [14].



### 1.5.1 Contraintes conceptuelles

La conception des RCSFs, leurs protocoles et algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs [15] :

- **La tolérance aux pannes** : la défaillance ou le blockage de certains nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendré par plusieurs causes, notamment la puissance d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement. Ces problèmes ne devraient pas affecter le reste du réseau. C'est le principe de la tolérance aux pannes.
- **L'extensibilité (passage à l'échelle)** : L'une des caractéristiques des RCSFs est qu'ils peuvent contenir un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmission inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues [16].
- **Le coût de production** : Le coût de fabrication d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation de coût globale de réseau, il faut que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier la faisabilité des réseaux de capteurs sans fil [18].
- **Consommation énergétique** : Les nœuds capteurs, étant des dispositifs microélectroniques, peuvent être équipés seulement d'une source d'énergie limitée, la retransmission des données, la réorganisation de réseau ainsi que le changement de sa topologie rendent la gestion et la conservation d'énergie d'une haute importance. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de réaliser les tâches de captage, traitement de données et communication, C'est cette dernière qui consomme le plus d'énergie.
- **La topologie du réseau** : En raison de leur forte densité dans la zone à observer, il faut que les nœuds capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée.

On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau :

- **Déploiement** : Les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie soit de manière aléatoire (lancés en masse depuis un avion). Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome.
- **Post-déploiement-Exploitation** : Durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des nœuds

ou bien à des pannes.

- Redéploiement : L'ajout de nouveaux capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

## 1.5.2 Contraintes matérielles

Parmi les contraintes matérielles liées aux RCSFs, on cite :

- **La dimension** : La taille réduite des capteurs peut présenter de nombreux avantages, elle permet un déploiement flexible et simple de réseau. Cependant, la puissance des batteries utilisées pour alimenter les nœuds capteurs est limitée par la taille de ces derniers.
- **La puissance de calcul** : Les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classiques. Car, ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faibles fréquences.
- **L'énergie** : un nœud capteur est généralement muni d'une ou plusieurs piles difficilement remplaçables. De ce fait, la faible consommation d'énergie est une exigence principale pour les applications où une longue durée de vie du réseau est nécessaire [8].

## 1.6 Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous pouvons citer les domaines suivants : militaire, environnemental, ou domestique, mais aussi de la santé (médicale), de commerce, de la sécurité etc. Des exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines sont exposés dans [4] [5].

### 1.6.1 Les application militaires

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des RCSFs, comme c'est le cas pour plusieurs technologies [17]. Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux panne des RCSFs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine, ils sont utilisés pour la surveillance de l'armée, la surveillance du champ de bataille, estimation des dégâts de la bataille, et pour la détection et reconnaissance

des attaques nucléaires, biologiques, et chimiques un exemple de ces applications est illustré sur la figure 1.3 [18].



FIGURE 1.3 – La surveillance militaire utilisant les RCSFs

## 1.6.2 Les applications environnementales

Dans ce domaine, les micros capteurs disposés à partir d'un avion dans une zone difficile d'accès, peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux des forêts, séisme, éruptions volcaniques), surveiller des phénomènes météorologiques, détecter de la pollution (qualité des eaux, taux d'ensoleillement, taux de CO<sub>2</sub>), et pour suivre aussi le mouvement des animaux.

## 1.6.3 Les applications médicales

Parmi ces applications, on peut trouver des applications qui fournissent des interfaces pour les handicapés, la surveillance intégrée d'un patient et le taux de médicaments qui leur ont été administrés, la surveillance des mouvements et les processus internes des insectes et les petits animaux, et la télésurveillance des données physiologiques de l'être humain qui est montré sur la figure 1.4 [17].

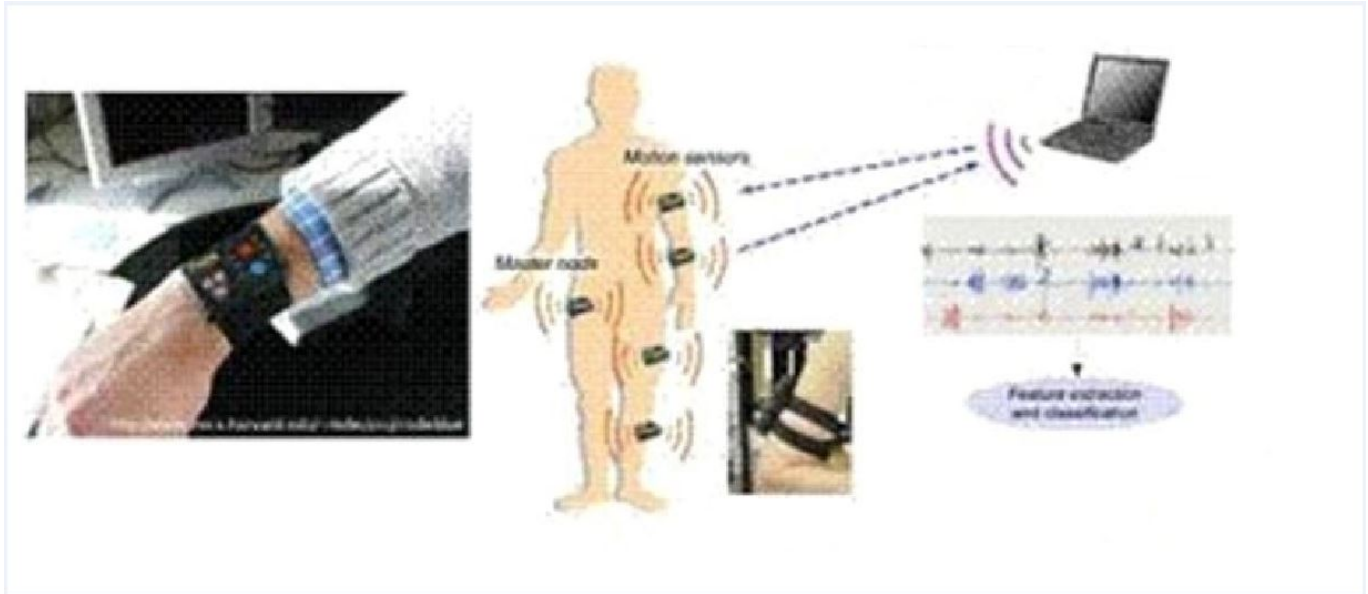


FIGURE 1.4 – La surveillance médicale utilisant les RSCSFs

#### 1.6.4 Les applications de sécurité

L'application des réseaux de capteurs dans ce domaine pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats. Par exemple, les dégradations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, pourrait être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton [19].

#### 1.6.5 Les applications domestiques

Comme la technologie progresse, les nœuds capteurs intelligents et actionneurs peuvent être embarqués dans des dispositifs, comme l'aspirateur, micro-onde, réfrigérateurs. Ces capteurs dans les dispositifs domestiques peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe par internet ou satellite. Ils permettent à l'utilisateur final de gérer les dispositifs domestiques localement ou à distance plus facilement [4].

#### 1.6.6 Les applications commerciales

Les capteurs peuvent être utilisés pour le contrôle et l'automatisation du processus de fabrication, pour permettre une meilleure gestion des ressources à faible coût. Grâce à ces réseaux,

les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service [5].

## 1.7 La communication dans les réseaux de capteurs sans fil

### 1.7.1 La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est présentée dans la figure 1.6. Cette pile est composée de cinq couches : la couche physique, liaison de données, réseaux, transport et application. Ainsi que trois niveaux : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches. Ces plans surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements, et la distribution des tâches entre les nœuds capteur. Ils aident aussi les nœuds à coordonner les tâches de détection et à réduire l'ensemble de la consommation d'énergie [4] [9] [20].

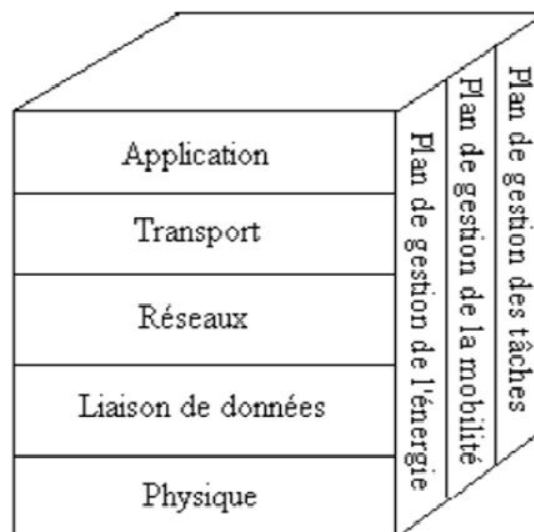


FIGURE 1.5 – La pile protocolaire de communication dans les RCSFs

- **La couche physique** : Cette couche s'occupe de la transmission des bits de façon brute sur un canal de communication. Elle répond aux besoins d'une modulation simple mais robuste, et de technique de transmission et de réception.
- **La couche liaison de données** : La tâche principale de cette couche est le multiplexage des flux de données, l'accès au médium, et le contrôle des erreurs de transmission. Elle gère aussi la communication entre deux machines physiquement connectées par un support. Elle fractionne les données d'entrée en trames (de quelques centaines d'octets)

avant leur transmission, si le service est fiable, le destinataire confirme la réception correcte de chaque trame en renvoyant une trame accusé de réception. Elle est composée d'une couche de contrôle des liens logique LLC (Logical Link Control) et une couche de contrôle d'accès au médium MAC (Médium Access Control).

LLC encapsule les segments venant de la couche réseau par l'ajout des en-têtes nécessaires, rassemble et fragmente les trames MAC, gère les erreurs et l'adressage.

Puisque l'environnement est bruyant et les capteurs peuvent être mobiles, un protocole MAC doit connaître l'état de l'énergie résiduelle et être capable de réduire au minimum les collisions causées par l'émission simultanée de nœuds voisins [20].

- **La couche réseau :** La couche réseau permet de gérer le sous-réseau. Elle s'occupe de l'acheminement des données entre les nœuds du réseau et la station de base. Cet acheminement se fait à travers une route optimale pouvant être fondée sur des tables statiques ou dynamiques en appliquant des algorithmes spécifiques, selon la métrique, afin d'atteindre la destination. Cette couche a été réétudiée pour qu'elle soit adaptée aux réseaux de capteur.
- **La couche transport :** La fonction de base de la couche transport est la gestion du trafic de bout en bout, de l'émetteur au récepteur. Elle contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige. De plus, elle est spécialement nécessaire quand le système est planifié pour être consulté à travers l'internet. Une approche telle que le TCP (Transport Control Protocol) est nécessaire pour permettre l'interaction entre les réseaux de capteurs et d'autres réseaux externes.
- **La couche application :** Cette couche est le point de contact entre l'utilisateur et le réseau. Elle constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. [20].
- **Le niveau de gestion d'énergie :** Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [17].
- **Le niveau de gestion de mobilité :** Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers

l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [17].

- **Le niveau de gestion des tâches** : Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [17].

## 1.8 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant étant donnée la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif. Ainsi les réseaux de capteurs posent un certain nombre de défis scientifiques. En effet, la miniaturisation des batteries a entraîné un problème de limitation d'énergie. La consommation d'énergie représente ainsi un facteur majeur lors de la conception des réseaux de capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les différents problèmes de congestion qui influencent sur les réseaux de capteurs sans fil et présenterons quelques protocoles qui interviennent dans le contrôle de la congestion.

# Problème de congestion dans les RCSFs et état de l'art sur les solutions

## 2.1 Introduction

La communication dans les RCSFs est fréquemment affectée par des problèmes de lien ou de nœud, échecs provisoires, largeur de bande, congestion, etc. Les RCSFs souffrent souvent de la congestion, qui se traduit généralement par des dépassements du tampon des nœuds capteurs, lorsque les nœuds envoient plus de paquets que le réseau ne peut en gérer. Parmi les problèmes causés par la congestion, on peut citer : le retard de l'information, la perte des paquets qui contiennent parfois des informations critiques, gaspillage de la bande passante, etc. Il est facile de constater que la congestion dégrade les performances du réseau en l'empêchant de garantir certaines exigences de QoS comme le temps réel et la maximisation de la durée de vie du réseau. Ce problème motive le besoin de mise en place des mécanismes de contrôle de congestion pour améliorer la performance et prolonger la durée de vie du système [21] [22].

Dans ce chapitre, nous allons définir la congestion dans les réseaux informatiques, et quelques notions sur la détection et le contrôle de congestion dans les RCSFs, nous finirons par présenter quelques protocoles et techniques de contrôle de congestion.



## 2.2 Définition de la congestion

### 2.2.1 La congestion d'un réseau informatique

Dans le domaine des réseaux informatiques, on peut définir la congestion comme étant un état de certains éléments d'un réseau pour lequel les objectifs de performance fixés ne peuvent pas être atteints, on peut la définir aussi, comme étant la condition dans laquelle une augmentation du trafic provoque un ralentissement de celui-ci [5]. Elle se produit quand le flux (charge) en réseau est supérieur aux capacités des ressources. Parmi les causes majeures de congestion en réseau informatique nous citons : la faible bande passante, la performance des processeurs.

### 2.2.2 La congestion dans les RCSFs

L'encombrement du réseau se produit lorsque la charge du trafic dépasse la capacité disponible à tout moment dans un réseau. Dans les réseaux de capteurs sans fil, la congestion cause la dégradation de la qualité du canal global et l'augmentation du taux de perte, elle réduit la durée de vie du réseau due à une diminution de l'efficacité énergétique au niveau de chaque nœud capteur.

La congestion est provoquée par les sources excédant le lien de communication ou la capacité (de traitement ou de stockage) des éléments du réseau. Pour cela, deux types de congestion pourraient se produire dans un RCSF : la congestion au niveau du nœud "node level" et la congestion au niveau du lien "link level" [22].

1. **La congestion au niveau du nœud** qui est commune dans les réseaux conventionnels. Elle est provoquée par le débordement des tampons dans le nœud et peut avoir comme conséquence la perte et le retard des paquets.
2. **La congestion au niveau du lien** peut se produire quand plusieurs nœuds essaient de transmettre au même temps. Les paquets qui partent ne peuvent pas atteindre le prochain nœud, en raison de la collision. Ce type de congestion diminue l'utilisation de lien, tout en augmentant le retard des paquets et la perte d'énergie.

La limitation de congestion suit généralement deux étapes [21] : la détection de congestion et le contrôle de congestion.

La détection exacte et efficace de la congestion joue un rôle essentiel dans le contrôle de

congestion dans les RCSFs [5]. Généralement, il existe deux approches de contrôle de congestion, la gestion des ressources du réseau et la régulation du trafic :

- **La gestion des ressources du réseau**, qui essaie d'augmenter ses ressources (mémoire tampon, puissance d'émission de l'interface de communication, vitesse de traitement, etc) pour atténuer la congestion quand elle se produit.
- **La régulation du trafic**, qui implique le contrôle de congestion par ajustement du taux de circulation des paquets afin qu'il s'adapte aux nœuds sources ou intermédiaires.

La plupart des protocoles de contrôle de congestion existant appartiennent à ce type. La régulation du trafic peut être " bout-en-bout " (end-to-end) où " saut-par-saut " (hop-by-hop).

Dans le " **bout-en-bout** " [22], la régulation s'effectue au niveau de nœud source pour simplifier la tâche aux nœuds intermédiaires ; il en résulte une réponse lente et dépend fortement du temps d'aller-retour. Elle se fait au niveau de la couche transport du modèle OSI. Son rôle essentiel est le contrôle du flux qui consiste à s'assurer que le débit de la source n'est pas trop important pour le récepteur. En " **saut-par-saut** " se fait au niveau de la couche réseau du modèle OSI, la réponse est très rapide. Il est généralement difficile d'ajuster le taux de transmission des nœuds intermédiaires car ce taux dépend du protocole MAC et peut être variable [23].

## 2.3 Classification des approches de contrôle de congestion

Ces dernières années, un nombre important de recherches ont été effectuées sur l'étude du problème de congestion dans les réseaux de capteurs sans fil, et plusieurs approches ont été proposées pour les gérer. Le contrôle de congestion est défini comme étant " les actions qui peuvent être prises par les réseaux pour minimiser l'intensité, l'étendue, et la durée de la congestion ".

Nous pouvons différencier les protocoles de contrôle de congestion à travers plusieurs critères qu'on va citer ci-dessous.

### 2.3.1 Mécanisme de détection de congestion

Le mécanisme de détection de congestion peut être local où globale [5] :

1. **La détection de congestion local** est réalisée aux nœuds intermédiaires en contrôlant les indicateurs locaux de congestion tels que l'occupation de la file d'attente ou l'état de

canal.

2. **La détection de congestion global** est réalisée au niveau de la station de base où les attributs de bout-en-bout tels que les retards inter-paquets (inter-packet delays) et la fréquence de pertes peuvent être utilisés pour détecter la congestion [22].

Se mécanisme utilise le protocole COngestion Detection and Avoidance " CODA " est une technique de détection et de contrôle de congestion pour les réseaux de capteurs sans fil, qui se base sur la charge du canal et l'occupation du tampon.

### 2.3.2 L'objectif du contrôle de congestion

L'objectif du contrôle de congestion est d'essayer de garantir une bonne qualité de service pour les usagers [9]. Dans leur nature, les RCSFs sont orientés application (application specific).

Donc, les protocoles de congestion seront différents selon l'application visée par un RCSFs où ils sont appliqués. Pour cette raison, les protocoles de contrôle de congestion sont aussi orientés application [5]. Lors d'un problème de congestion (charge du nœud trop élevé), les mémoires tampon des nœuds sont saturés, les nouveaux paquets reçus sont perdus entraînant des retransmissions, d'où la nécessité d'un contrôle de congestion [24].

### 2.3.3 Les mécanismes de contrôle de taux de transfert

Les mécanismes de contrôle de taux de trafic dans les RCSFs peuvent être contrôle de la source (unité centrale) ou "hop-by-hop backpressure" [9]. Le mécanisme de contrôle de la source est réalisé par la station de base. Essentiellement, quand la congestion (ou le premier signe de congestion) est découvert, la station de base donne l'ordre aux nœuds sources de régler leurs taux. Alors que, dans hop-by-hop backpressure le mécanisme est réalisé aux nœuds intermédiaires, dans lesquels le nœud intermédiaire donne l'ordre aux nœuds qui sont en son amont de régler leurs taux en se basant sur son état de congestion local [25].

Dans cette classe, nous trouvons le protocole Prioritized Heterogeneous Traffic-oriented Congestion Control Protocol (PHTCCP) dans lequel les nœuds ajustent le taux de transfert saut par saut.

### **2.3.4 Modèle de l'application cible**

Se modèle est compatible avec la plupart des protocoles de contrôle de congestion qui se basent sur le modèle de communication "many-to-one " par exemple le protocole ESRT et ACCP. Cependant, quelques protocoles diffèrent sur leurs hypothèses dans ce modèle, telles que la suppression du flux à haut débit, ou multiples requêtes à multiples stations de base, etc. Par exemple : ESRT est une nouvelle solution qui est proposée pour résoudre le problème de transport dans le RCSF, vise à réaliser une détection d'événements fiable avec une dépense énergétique minimale et la résolution de la congestion. Pour détecter la congestion, ESRT utilise la surveillance du niveau du tampon des nœuds capteurs.

ACCP utilise une commutation au niveau de la station de base pour basculer entre le contrôle logique de la congestion du trafic et le contrôle logique de congestion des ressources [32].

### **2.3.5 Équité et / ou qualité de service QoS**

Les protocoles de contrôle de congestion sont chargés de réduire le taux de transmission afin d'éviter ou de réduire la congestion. En plus de cette tâche, d'autres exigences peuvent être envisagées. Cela inclut par exemple, les approches QoS essaient d'allouer les ressources selon l'importance du flux ou les niveaux de réservation du canal [9].

Par exemple le protocole Priority Based Congestion Control Protocol "PCCP" assure un contrôle de congestion et une équité efficace. En plus, il assure l'efficacité énergétique, une réduction du taux de perte de paquets et de la latence, il détecte la congestion au niveau nœud et au niveau lien.

Les différentes notions d'équité peuvent être utiles, selon l'application. Celle-ci peuvent être celles qui garantissent que tous les nœuds dans le réseau fournissent la même quantité de données, de l'équité maximum-minimum, de l'équité proportionnelle, etc [27].

## 2.4 Quelques protocoles de contrôle de congestion dans les RCSFs

### 2.4.1 COngestion Detection and Avoidance "CODA"

CODA est une technique de détection et de contrôle de congestion pour les réseaux de capteurs sans fil, en se basant sur la charge du canal et l'occupation du tampon qui comprend trois mécanismes [28] :

#### 1. Détection de congestion basée sur le récepteur (Receiver-based congestion detection) :

CODA détecte la congestion en observant la taille du tampon des nœuds capteurs et de la charge du canal sans fil. Si ces deux caractéristiques dépassent un seuil prédéfini, un nœud capteur informe son voisin pour diminuer le taux de transmission. Avant de transmettre un paquet, un nœud capteur divise le canal à des périodes fixes. Si il trouve que le canal est occupé dans les temps prédéfinis, il ajuste un bit de commande pour informer la station de base de la congestion [5].

CODA utilise un plan d'échantillonnage qui active la surveillance locale du canal au bon moment afin de minimiser les coûts tout en formant une estimation précise. Une fois que la congestion est détectée, les nœuds la signalent à leurs voisins en amont par l'intermédiaire d'un mécanisme de backpressure.

#### 2. Open-loop hop-by-hop backpressure :

Dans CODA, un nœud diffuse un signal " backpressure" dès qu'il détecte une congestion. Ce signal se propage en amont jusqu'à la source. Les nœuds qui reçoivent le "backpressure" contrôlent leurs taux de transmission en se basant sur la politique de congestion locale. Les nœuds en amont proches de la source qui reçoivent le "backpressure" décide de faire suivre la propagation de "backpressure" ou non en fonction des conditions du réseau mesurées localement.

#### 3. Closed-loop multi-source regulation :

Lorsque le taux d'événement source est inférieur à une certaine fraction du débit théorique maximum du canal, le nœud source se métrise, cependant, lorsque cette valeur est dépassée une source est plus susceptible de contribuer à la congestion et donc "la boucle fermée de contrôle de congestion" est déclenchée. À ce stade, une source nécessite un

accusé de réception (ACK) de la station de base pour maintenir son taux. En revanche, si la source ne reçoit pas ACK, elle doit réduire son propre taux de transmission [9] [23].

## 2.4.2 Pivot Routing for Alarm Transmission "PiRAT"

PiRAT est un protocole de routage basé sur des nœuds pivots pour la transmission d'un trafic d'alarme. Il peut être adapté pour tout type de trafic à haute priorité généré dans une zone déterminée. [29].

### – Description du protocole PiRAT

PiRAT vise à réduire la congestion créée par la transmission d'alarmes dans un réseau de capteurs sans fils. Pour réaliser ceci, PiRAT nécessite deux étapes [5].

1. La première étape consiste à sélectionner des nœuds spéciaux, appelés Pivots, pour chaque paire source-destination. Le rôle des pivots est de distribuer la charge du trafic sur plusieurs nœuds au lieu de surcharger le plus court chemin reliant les sources (généralement localisées dans une zone délimitée du réseau) à la destination.
2. La deuxième étape consiste à acheminer les paquets d'alarmes à travers un nœud pivot aléatoirement choisi parmi l'ensemble des pivots. Ainsi, PiRAT est donc un protocole proactif probabiliste.

PiRAT est basé sur la diversité des routes grâce à la nature probabiliste de la sélection des pivots. Il s'appuie sur le protocole de routage raccourci de l'arbre : les routes de la source jusqu'au pivot et du pivot jusqu'à la destination sont calculées selon le protocole de routage raccourci de l'arbre. PiRAT possède une autre caractéristique probabiliste : quand plusieurs voisins conduisent à la destination finale par un chemin de même distance, et que cette distance est minimale, PiRAT choisit aléatoirement un nœud parmi ces voisins afin de router l'alarme.

Le principal avantage de PiRAT est qu'il assure un routage multi-chemins jusqu'à la destination. En effet, il permet à un grand nombre de nœuds de participer à l'activité de routage. Ainsi, la consommation d'énergie est équilibrée entre les nœuds du réseau. Cette caractéristique a l'avantage de prolonger la durée de vie du réseau.

Dans [30], l'auteur propose une approche centralisée où  $k$  chemins sont établis de la source à la destination. Chaque chemin passe par plusieurs pivots, mais la distance entre les pivots est limitée par un seuil. Cet algorithme requiert une connaissance globale du réseau. PiRAT est un protocole de routage distribué. Dans PiRAT, il n'y a qu'un seul pivot

sur un chemin source-destination, mais le choix des pivots n'est pas limité au voisinage de la source.

Dans [31], les auteurs proposent un protocole de routage avec pivots qui contribue à réduire le nombre de message de contrôle et étendre la durée de vie du réseau. Les nœuds pivots sont déterminés comme suit. La destination propage une requête est sélectionne des nœuds candidats comme des pivots en se basant sur la distance. Un nœud est candidat si sa distance à la destination (ou au pivot précédent) dépasse un seuil. Chaque nœud maintient un chemin de retour au pivot précédent (ou bien à la destination). En outre, plusieurs chemins peuvent être maintenus entre les pivots. PiRAT utilise lui un seul pivot par chemin. L'objectif est de sélectionner des pivots de sorte que les chemins des sources à la destination se chevauchent peu pour limiter les risques de congestion.

- **Sélection des pivots** La performance de PiRAT est principalement liée à la sélection des nœuds pivots. Les nœuds pivots ne doivent pas être sur le chemin le plus court reliant la source à la destination, pour éviter que PiRAT ne se comporte comme le protocole de routage raccourci de l'arbre. Cependant, les pivots ne doivent pas être trop éloignés du plus court chemin, afin de ne pas augmenter inutilement le nombre de sauts qu'une alarme doit traverser pour arriver à la destination. En outre, les pivots ne doivent pas être trop proches de la source pour s'assurer que les chemins ne convergent pas trop tôt

### 2.4.3 Fair Rate Allocation "FRA"

Allocation équitable de taux de transmission "FRA" est une approche explicite au contrôle de congestion avec garantie d'équité proposée par Ee et Bajcsy [9]. Le mécanisme de FRA comprend trois démarches suivantes [32] :

1. Déterminer le taux moyen,  $r$ , de transmission d'un paquet : En supposant que les paquets ont la même taille, le taux de transmission du paquet peut être estimé comme l'inverse de l'intervalle de temps de transmission d'un seul paquet. L'intervalle est mesuré à partir du moment où la couche transport envoie le paquet à la couche réseau jusqu'au moment où la couche réseau signale que le paquet a été transmis.
2. Assigner le taux  $r$  aux nœuds en amont (c-à-d les nœuds fils dans l'arbre de collecte de données) : le taux moyen de transmission de paquet est divisé par le nombre  $n$ , de nœuds fils pour assigner le taux de génération de paquet de données comme

$$r_{data} = \frac{r}{n}$$

Pour calculer  $n$ , chaque nœud inclut la taille de son sous-arbre (le nombre de ses nœuds fils) dans un paquet et l'envoie au parent. Le parent décompte les nombres de ces descendants, y ajoute un (si le parent lui-même produit des données) et inclut le total dans le paquet avant de l'envoyer vers la station de base.

Quand les files d'attente débordent ou sont au point de déborder, le nœud assigne un taux de génération de paquet inférieur aux nœuds qui sont en son amont.

3. Obtenir le taux du nœud parent  $r_{data-parent}$  par l'écoute du canal ou via un message de contrôle. Comparer  $r_{data}$  avec  $r_{data-parent}$  et propager le plus petit taux aux nœuds du sous-arbre.

L'équité proportionnelle est obtenue en mesurant et en divisant le taux par le nombre de nœuds en aval. Il s'agit donc de l'équité proportionnelle. Pour réaliser cela, chaque nœud maintient une file d'attente de type FIFO pour chaque nœud fils comme le montre la FIGURE 2.2. Alors, un mécanisme de sélection probabiliste est employé pour mesurer le poids du choix des paquets. Le choix de la file d'attente à partir de laquelle le paquet sera transmis est proportionnelle au nombre de nœuds entretenus par cette file d'attente.

#### 2.4.4 Event-to-Sink Reliable Transport "ESRT"

ESRT est une solution dans la couche transport qui vise à réaliser une détection d'événements fiable avec une dépense énergétique minimale et la résolution de la congestion [26].

ESRT est une nouvelle solution qui est proposée pour résoudre le problème de transport dans le RCSF. Le but principal d'ESRT est d'atteindre et de maintenir un fonctionnement optimal. Par conséquent, le but est de configurer la fréquence des rapports  $f$  pour atteindre la précision de détection d'événement souhaité avec un minimum d'énergie. Pour atteindre cet objectif, il utilise un mécanisme de contrôle de congestion.

L'algorithme ESRT établit un diagramme de transition à cinq états comme le montre la Figure 2.2. Les états ont les significations suivantes [5] :

- **No Congestion, Low Reliability (NC, LR)** : Le réseau n'est pas congestionné, mais la fiabilité observée est inférieure à la fiabilité souhaitée. Dans ce cas, les sources doivent augmenter leurs taux d'activité pour augmenter la fiabilité c-à-d  $\eta < 1 - \varepsilon$  et  $f < f_{max}$ .
- **No Congestion, High Reliability (NC, HR)** : Le réseau n'est pas congestionné, mais la fiabilité observée est supérieure à la fiabilité souhaitée. Ainsi, la station de base ordonne



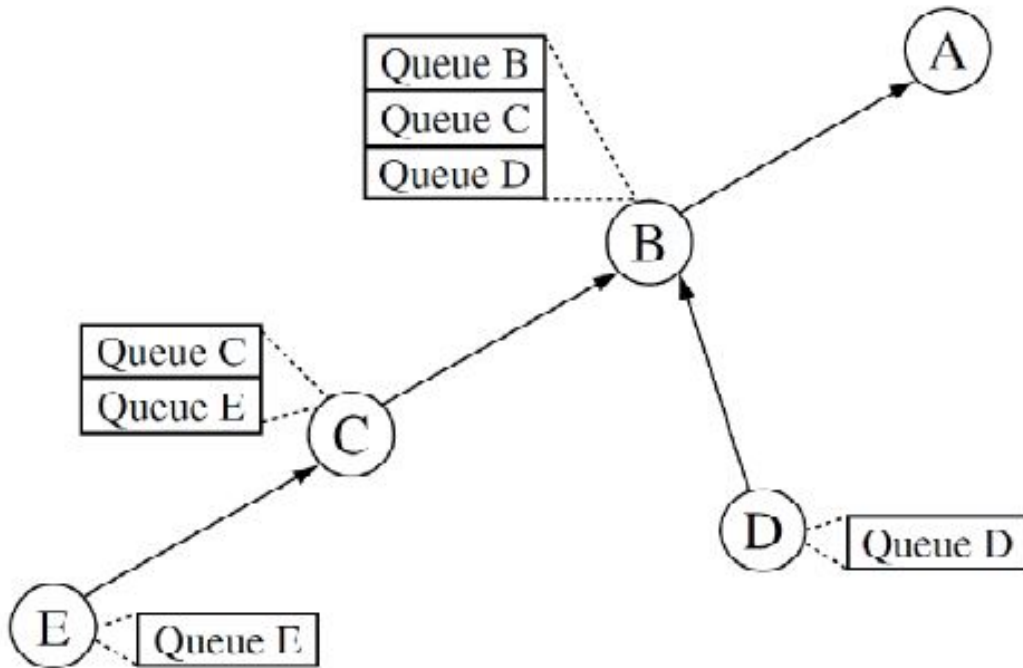


FIGURE 2.1 – FIFO multiples pour assurer la délivrance équitable de données dans FRA

aux nœuds sources de réduire leurs taux d'activité prudemment, pour maintenir la fiabilité exigée, mais avec moins d'overheads c-à-d  $\eta > 1 + \varepsilon$  et  $f \leq f_{\max}$ .

- **Congestion, Low Reliability (C, LR)** : C'est le pire état possible, car la fiabilité est faible, une congestion est détectée et l'énergie est perdue. Ainsi, ESRT réduit exponentiellement la fréquence d'activité pour alléger la congestion et améliorer la fiabilité c-à-d  $\eta \leq 1$  et  $f > f_{\max}$ .
- **Congestion, High Reliability (C, HR)** : Le réseau est congestionné et la fiabilité est supérieure à celle souhaitée. Dans ce cas, ESRT diminue la fréquence des rapports afin d'éviter la congestion et d'économiser l'énergie dans les nœuds capteurs. Comme précédemment, cette diminution doit être effectuée avec soin de telle sorte que la fiabilité soit toujours maintenue. Cependant, le réseau dans l'état (C, HR) est plus loin du point de fonctionnement optimal que dans l'état (NC, HR) Par conséquent, nous devons adopter une approche plus agressive afin de soulager la congestion et entrer dans l'état (NC, HR).
- **Optimal Operating Region (OOR)** : C'est la région d'exploitation optimale où le taux d'activité est suffisant juste pour atteindre la fiabilité souhaitée. Plus précisément,

$$1 - \varepsilon \leq \eta_i \leq 1 + \varepsilon$$

Où  $\varepsilon$  est une petite marge d'erreur utilisée pour assurer la stabilité. Le but de protocole ESRT est de maintenir toujours l'état du réseau dans OOR.

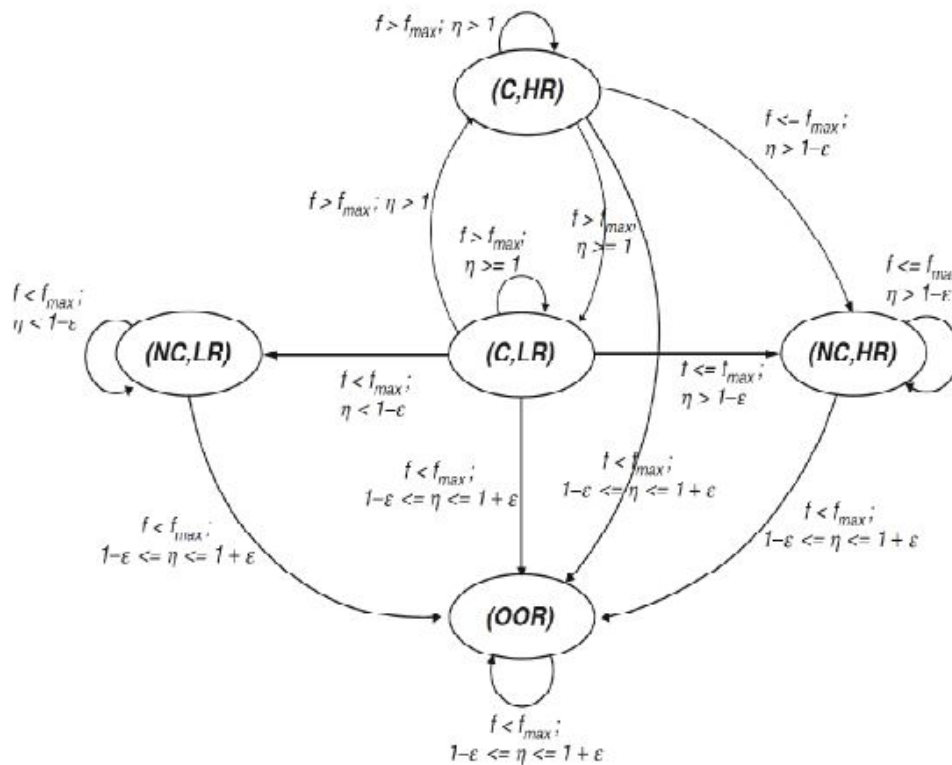


FIGURE 2.2 – Diagramme de transition du protocole ESRT

**Detection de la congestion :** Pour détecter la congestion, ESRT utilise la surveillance du niveau du tampon des nœuds capteurs. Chaque nœud dont le tampon des paquets à router est surchargé à cause de la réception excessive des paquets est dit congestionné et il informe la station de base.

En supposant que la fréquence des rapports d'événements des nœuds sources  $f$  est constant dans une période de rapport et le nombre de nœuds source  $n$  ne change pas significativement, alors le trafic généré dans la prochaine période de rapport aura une variation négligeable. Ainsi, le taux du trafic arrivant à n'importe quel nœud capteur est supposé être constant. De cette façon un nœud capteur peut estimer la charge de son tampon à la fin de chaque période de rapport en additionnant la charge de son tampon à la fin de la période avec le taux du trafic arrivant.

Si cette somme dépasse la capacité de son tampon, le nœud informe la station de base en mettant le bit de notification de congestion (CN) de l'entête des paquets envoyés à la station de base à '1'. De cette façon, le réseau doit prendre des décisions en se basant sur les règles expliquées précédemment.

## 2.4.5 Prioritized Heterogeneous Traffic-oriented Congestion Control Protocol "PHTCCP"

PHTCCP contrôle la congestion en ajustant le taux de transfert saut par saut et assure le taux efficace pour le trafic différencié. Il utilise aussi une approche inter-couche pour le contrôle de congestion.

Les principaux objectifs pour le PHTCCP sont les suivants :

- générer et transmettre les données hétérogènes en fonction des propriétés.
- Ajuster le taux de transmission lorsqu'une congestion survient et assurer une utilisation efficace de la capacité du lien lorsque des nœuds d'une route particulière sont inactifs.

**Pour la détection de la congestion**, ce protocole utilise le rapport du service des paquets  $r$  (i) pour mesurer le niveau de congestion au niveau de chaque nœud  $i$ . Le ratio du service de paquets est défini comme le rapport du taux de service moyen de paquets  $R_s^i$  et par le taux d'ordonnancement des paquets  $R_{sch}^i$  dans chaque nœud capteur  $i$  qui est défini par

$$R(i) = R_s^i / R_{sch}^i$$

PHTCCP utilise une notification de congestion implicite. Chaque nœud  $i$  greffe dans l'entête de ses paquets son taux d'ordonnancement de paquets  $R_{sch}^i$  nombre total d'enfants  $C(i)$  nombre d'enfants actifs à l'instant  $t$   $A_t(C(i))$  et la longueur de la file d'attente des moyennes pondérées de son enfant actif

Lorsque la valeur de  $r(i)$  est inférieur à un certain seuil (dépend de l'exigence de l'application), PHTCCP utilise l'ajustement saut par saut du taux de transmission [33].

## 2.4.6 Priority Based Congestion Control Protocol "PCCP"

L'algorithme PCCP utilise l'optimisation en inter-couche dans le routage à un seul chemin ou multichemin, PCCP assure un contrôle de congestion et une équité efficace. En plus, il assure l'efficacité énergétique, une réduction du taux de perte de paquets et de la latence. En utilisant le degré de congestion, il détecte la congestion au niveau nœud et au niveau lien.

**PCCP est composé de trois composantes** : détection intelligente de la congestion (ICD), notification implicite de la congestion (ICN), et ajustement du taux transmission basé sur les priorités (PRA) [34].

**ICD** détecte la congestion en se basant sur le temps inter-arrivées des paquets et le temps de service de ces derniers.

**ICN** greffe les informations concernant la congestion dans l'entête des paquets pour éviter la surcharge du réseau par des messages de contrôle supplémentaires.

**PRA** introduit un ordonnanceur avec deux files d'attente entre la couche réseau et la couche MAC et en ajustant le taux d'ordonnancement pour le garder inférieur au taux de transmission de la couche MAC, on évite la congestion.

## 2.4.7 Adaptive Congestion Control Protocol "ACCP"

ACCP utilise un algorithme de commutation au niveau de la station de base pour basculer entre le contrôle logique de la congestion du trafic (DelStatic) et le contrôle logique de congestion des ressources (DSR).

**ACCP est basé sur deux mécanismes :**

1. Détecter la congestion au niveau un nœud en utilisant la stratégie de l'occupation du tampon et l'utilisation du canal
2. Contrôle de la congestion détectée par l'initialisation de protocole ACCP

L'utilisation du canal est la fraction de temp que le canal est occupé en raison de la transmission des trames. Une utilisation élevée du canal est utilisé comme une indication de congestion. Lorsqu'un nœud a un paquet à envoyer, il échantillonne l'état de la voie à intervalles réguliers. Basé sur le nombre de fois que le canal se trouve à être occupé, le nœud calcule un facteur d'utilisation qui indique la congestion lorsqu'il est supérieur à un certain niveau .

**Détection de la congestion :** Pour détecter efficacement la congestion, ACCP met en œuvre un double mécanisme de détection de la congestion : stratégie d'utilisation du canal et l'occupation du tampon.

En effet, l'occupation du tampon des nœuds intermédiaires est comparée à un seuil. Si le seuil est atteint on détecte une collision. Pour éviter de détecter l'atteinte du seuil tardivement, la croissance de l'occupation du tampon est contrôlée [35].

## 2.5 Conclusion

La congestion lorsque'elle existe dans un réseau, dégrade les performances du système et peut causer beaucoup de problèmes.

Dans ce chapitre, nous avons identifié quelques problèmes parmi lesquels une perte des paquets parfois contenant une information critique ( par exemple, l'état de santé d'un patient), le gaspillage de la bande passante ainsi que d'énergie utilisés pour transmettre ces paquets perdus. Nous avons aussi étudié quelques protocoles proposés pour détecter et / ou contrôler la congestion dans les RCSFs.

Le point commun de ces protocoles, est que lorsqu'une congestion ou le premier signe de congestion est apparait au niveau d'un nœud, ce dernier procède à une régulation du taux d'activité des nœuds sources des messages dont il est le destinataire.

Malgré que ces protocoles ont proposé une amélioration significatives aux techniques classiques de contrôle de congestion qui se basaient presque uniquement sur le taux d'occupation du tampon de données au niveau du destinataire des messages pour détecter la congestion, ces protocoles peuvent ne pas garantir la non perte des paquets dans le cas où une congestion au niveau d'un nœud persiste. En effet, dans ce genre de protocoles lorsqu'une congestion au niveau d'un nœud persiste, quelques nœuds amont (fils dans l'arbre de collecte de données) peuvent réduire leur taux de transfert jusqu'à ne pas transmettre pendant un certain temps et si un capteur a généré plus d'un message pendant ce temps, l'information contenue dans les premiers messages ne serait plus valide.

Dans le chapitre qui suit, nous aborderons la présentation du modèle de congestion à évaluer et l'outil d'évaluation choisit pour l'évaluer.

# Présentation et modélisation du protocole de contrôle de congestion CLCD

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une modélisation d'un protocole de congestion CLCD (Pour Cross Layer Congestion detection) par réseau de file d'attente pour trouver les bons paramètres pour l'ajustement de taux de transmission de manière à éviter la congestion et utiliser le réseau efficacement.

## 3.2 Objectif

L'objectif de notre solution est de déterminer des seuils pour la congestion, tout en surveillant à chaque fois l'état de la file d'attente de chaque nœud. Cela va nous permettre alors de prévoir la congestion avant son arrivée et régler les taux de transmission si nécessaire.

## 3.3 Présentation du protocole de congestion CLCD

Dans cette section, nous allons présenter le protocole à modéliser CLCD. CLCD est un protocole de contrôle de congestion qui utilise une approche cross layer pour détecter la congestion pour réduire l'overhead causé par l'utilisation des messages de contrôle. Il peut être intégré dans n'importe quel protocole de routage multi-chemins et un protocole MAC basé sur la contention.

En fait, un nœud dans notre approche ne supprime pas les paquets de contrôle RTS et CTS qui ne sont pas destinés à lui comme est le cas dans les protocoles MAC basés sur CSMA / CA avec RTS / CTS. Notre proposition utilise cette sur-écoute pour calculer le nombre de paquets qui sont dans la file d'attente d'un nœud voisin. Comme l'envoi d'un CTS est suivi de la réception des données et l'envoi d'un RTS est suivi de l'envoi des données alors l'envoi du CTS implique l'ajout d'un paquet dans la file d'attente du nœud émetteur du CTS et l'envoi d'un RTS implique la suppression d'un paquet de la file d'attente du nœud émetteur du RTS. Ceci nous permet de calculer la charge des nœuds du réseau mais bien sûr en considérant que le réseau est sans collision. Comme nous le savons, les messages de contrôle RTS et CTS sont au niveau de la couche MAC et le choix du prochain saut est la fonction de la couche réseau, alors il faut que la couche MAC envoie à la couche réseau l'adresse du nœud voisin émetteur du RTS ou CTS et le type du message envoyé. A la réception de ces informations, la couche réseau calcule la nouvelle valeur de la charge du nœud voisin et à chaque fois qu'il y a un paquet de données à envoyer, le protocole de routage doit prendre en considération cette valeur calculée pour chaque voisin de la table de routage. En fait, le nœud choisi pour router les données est le voisin dont la file d'attente est la moins chargée [5].

Ceci va permettre d'équilibrer la charge des nœuds pour éviter la congestion au niveau des nœuds voisins. Mais, si tous les nœuds voisins ont des files d'attente pleines, alors une congestion va survenir inévitablement. Dans ce cas, on doit faire appel au mécanisme d'ajustement du taux de transmission.

Nous avons repris le modèle proposé dans [36] pour modéliser cette approche de contrôle de congestion. Ainsi, l'approche se déroulera en trois étapes. Comme présenté sur la figure 3.1. la première étape consiste à contrôler les files d'attente des nœuds voisins en utilisant CLCD. La deuxième étape consiste à utiliser les chaînes de Markov pour déterminer le niveau de congestion du nœud en fonction duquel nous allons ajuster le taux de transmission dans la troisième étape.

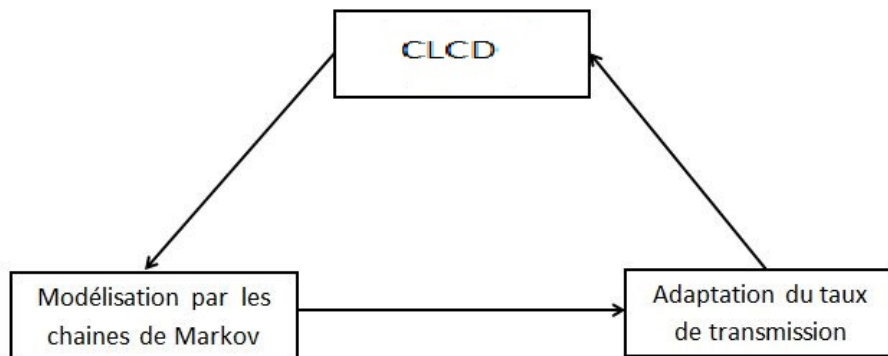


FIGURE 3.1 – Les étapes de l'approche de contrôle de congestion

Trois cas sont possible avec les seuils  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_{max}$  :

- Si la taille de la file d'attente est  $< T_1 \Rightarrow$  il n'y a pas de congestion  $\Rightarrow$  nous sommes à l'état "0", ici on augmente le taux de transmission.
- Si la taille de la file d'attente est entre  $T_1$  et  $T_2 \Rightarrow$  il y'a une congestion moyenne  $\Rightarrow$  nous sommes à l'état "1", ici on diminue le taux de transmission.
- Si la taille de la file d'attente est entre  $T_2$  et  $T_{max} \Rightarrow$  il y'a une forte congestion  $\Rightarrow$  nous sommes à l'état "2", ici on diminue le taux de transmission doit être considérablement (faible).

### 3.3.1 Application par les chaînes de Markov

Dans cette étape, nous utilisons les chaînes de Markov pour estimer le niveau de congestion. Après cette estimation, nous décidons de l'adaptation du taux de transmission. Nous observons le niveau de congestion pendant des intervalles de temps  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ . Les résultats sont donnés par  $X_0, X_1, X_2 \dots X_n$  pour  $t_0, t_1, t_2 \dots t_n$ , tel que  $X_t$  est une variable aléatoire.

$X_t$  est représentée par une chaîne de Markov à temps discret. Elle représente le niveau de congestion au moment  $t$ . Nous avons trois états  $S = 0, 1, 2$

0 si  $1 < X_t < T_1$  ;

1 si  $T_1 < X_t < T_2$  ;

2 si  $T_2 < X_t < T_{max}$ .



Les probabilités de transition de la chaîne de Markov  $X_t$  avec l'espace d'état  $\{0, 1, 2\}$  sont données sous forme de la matrice suivante :

$$P_{ij} = \{X_{t+1}=j / X_t=i\}.$$

$P_{ij}$  : est une probabilité de passage de l'état  $i$  vers l'état  $j$ .

ou  $i \in \{0, 1, 2\}$  et  $j \in \{0, 1, 2\}$ .

$$\begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}$$

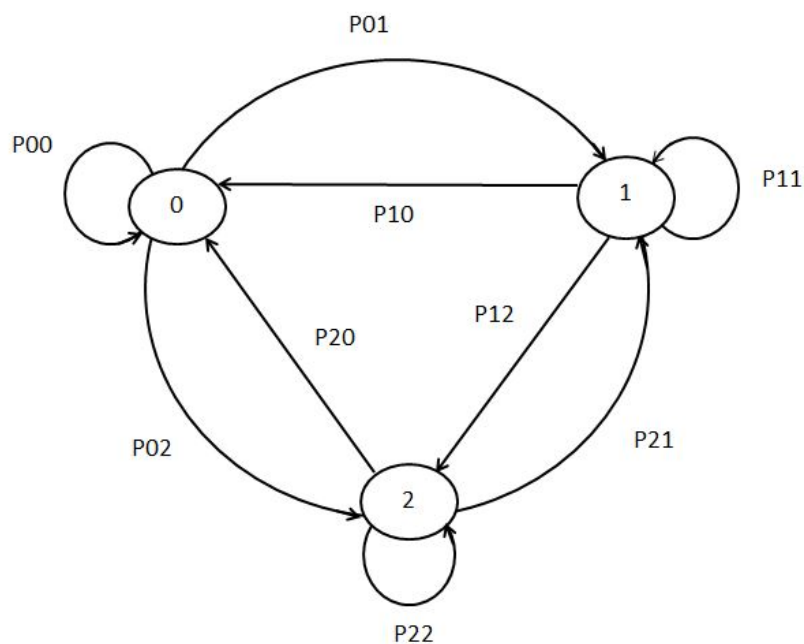


FIGURE 3.2 – Le graphe de transition

### 3.3.2 Adaptation du taux de transmission

A ce niveau et selon le résultat obtenu par le modèle de chaîne de Markov et l'état de congestion du réseau, nous adaptons le taux de transmission de la manière suivante :

- Si le système est à l'état "0", nous augmentons le taux de transmission au maximum.
- Si le système est à l'état "1", nous diminuons le taux de transmission linéairement.
- Si le système est à l'état "2", nous réduisons le taux de transmission au minimum.

### 3.4 Exemple Illustratif

Soit le réseau de la FIGURE 3.3.

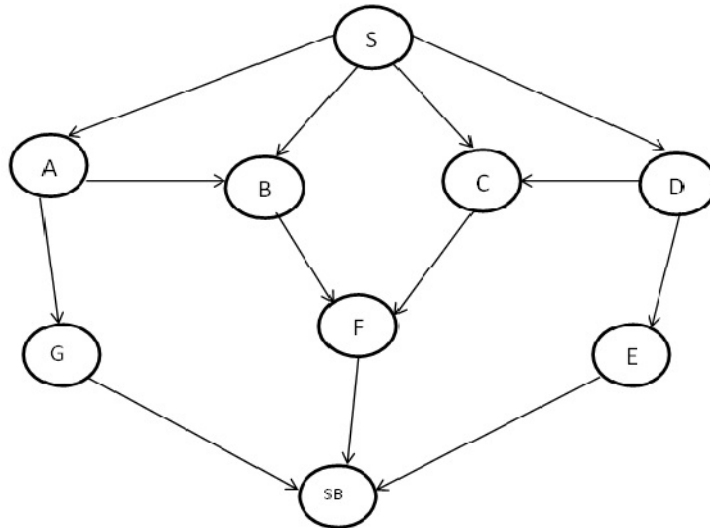


FIGURE 3.3 – La topologie de l’exemple

Notre exemple contient une source (S), une destination (SB) et sept nœuds intermédiaires. Nous supposons que la source envoie plusieurs paquets en continu chaque une période de temps T.

Nous expliquons dans le tableau 3.1 le fonctionnement du protocole à chaque envoi des paquets

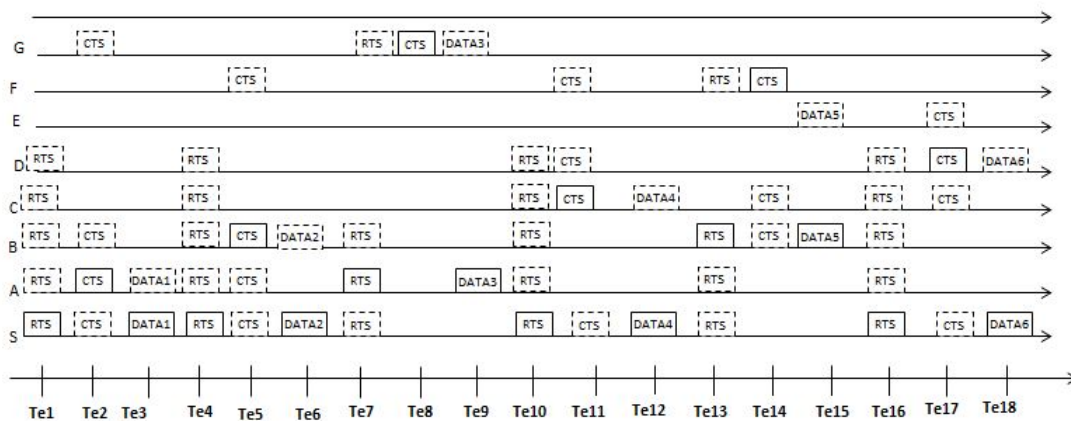


FIGURE 3.4 – Le scénario d’envoi de quelques paquets

RTS et CTS entre les nœuds [5]. Comme il sont illustré sur la figure 3.4.

Te <sub>1</sub>	Pour le nœud S, charge (A) = charge (B) = charge (C) = charge (d) = 0. alors, il envoie RTS à A alors B, C et D reçoivent ce RTS.
Te <sub>2</sub>	A répond par CTS, B et G reçoivent ce CTS et ces derniers envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (A) = 1
Te <sub>4</sub>	Pour S, charge (A) = 1 et charge (B) = charge (c) = charge (d) = 0. alors, il envoie RTS à B alors A, C, et D reçoivent ce RTS
Te <sub>5</sub>	B répond par CTS, A et F reçoivent ce CTS et ce derniers envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (B) = 1
Te <sub>7</sub>	Pour A, charge (B) = 1 et charge (G) = 0. A envoie RTS à G et B et S reçoivent ce RTS Ces derniers envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (A) = 0
Te <sub>8</sub>	G répond par CTS, SB reçoit ce CTS et ces dernier envoient à sa couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (G) = 1
Te <sub>10</sub>	Pour S, charge (B) = 1 et charge (A) = charge (C) = charge (D) = 0. alors, il envoie RTS à C après A, B, et D reçoivent ce RTS
Te <sub>11</sub>	C répond par CTS, D et F reçoivent ce CTS et ces derniers envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (C) = 1
Te <sub>13</sub>	Pour S, charge (C) = charge (B) = 1 et charge (A) = charge (D) = 0 alors, il envoie RTS à D alors A, B et C reçoivent ce RTS
Te <sub>14</sub>	D répond par CTS, E, C reçoit ce CTS et ce dernier envoient à sa couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (D) = 1
Te <sub>16</sub>	Pour D, charge (C) = 1 et charge (E) = 0. D envoie RTS à E alors C et S reçoivent ce RTS Ces derniers envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (D) = 0
Te <sub>17</sub>	E répond par CTS, SB reçoit ce CTS et ces dernier envoient à leurs couches réseaux l'information qui met à jour la valeur charge (E) = 1

Table 3.1 - Exemple illustratif

### 3.4.1 Le modèle en réseau de file d'attente

Nous avons repris le modèle en réseau de file d'attente présenté dans [36]. La figure 3.5 présente le modèle en réseau de file d'attente de la topologie présentée dans la Figure 3.3.

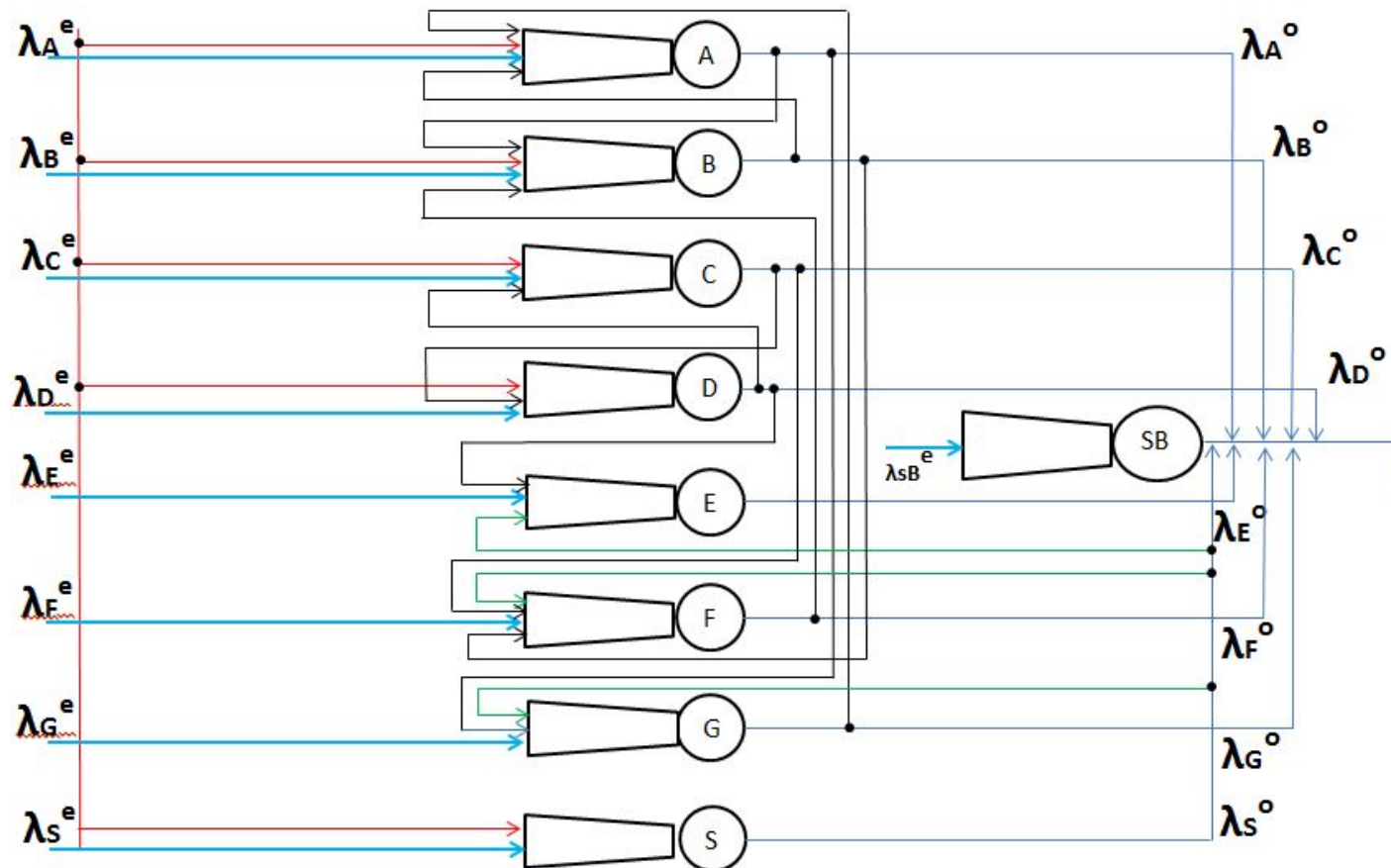


FIGURE 3.5 – La relation d'arrivée et de départ entre les nœuds

où,  $\lambda_i^e$  : le taux d'arrivée poissonien externe independant de  $i$ .

$\lambda_i^o$  : le taux d'abandon après le service accompli du nœud  $i$  où le taux de création du message [10].

On calcule les taux d'arrivés de chaque nœud de l'exemple illustratif. En utilisant la relation suivante.

$$P_{ij} = \frac{\frac{1}{N_j}}{\sum_{k \in TR_i} \frac{1}{N_k}} \quad (3.1)$$

avec :

$N_j$  : est le nombre de nœuds voisins utilisant le nœuds j comme relais.

$TR_i$  : est la table de routage du nœud i.

Par exemple :  $TR_S = A, B, C, D$  avec

A est utilisé par le nœud S, donc  $N_A = 1$

B est utilisé par les nœuds S et A, donc  $N_B = 2$

C est utilisé par les nœuds S et D, donc  $N_C = 2$

D est utilisé par le nœud S, donc  $N_D = 1$

Alors :

$$P_{SA} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} = \frac{1}{3} \quad (3.2)$$

$$P_{SB} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} = \frac{1}{6} \quad (3.3)$$

$$P_{SC} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} = \frac{1}{6} \quad (3.4)$$

$$P_{SD} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{1}} = \frac{1}{3} \quad (3.5)$$

Pour le nœud A :  $TR_A = G, B$ , avec

G est utilisé par le nœud A, donc  $N_G = 1$

B est utilisé par les nœuds S et A, donc  $N_B = 2$

Alors :

$$P_{AB} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = \frac{1}{3} \quad (3.6)$$

$$P_{AG} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = \frac{2}{3} \quad (3.7)$$

Pour le nœud B :  $TR_B = F$ , avec

F est utilisé par le nœud B, C donc  $N_F = 2$

Alors :

$$P_{BF} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3.8)$$

Pour cela nous donnons la matrice de transition suivante :

$$\begin{pmatrix} & S & A & B & C & D & E & F & G & SB \\ S & 0 & 0.33 & 0.17 & 0.17 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & 0 \\ B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ D & 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0 & 0.67 & 0 & 0 & 0 \\ E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ G & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On remarque bien qu'il y a un certain équilibrage entre les nœuds du même niveau.

Le graphe de transitions est montré ci-dessous avec des probabilités d'état. C'est un graphe connexe et la chaîne de Markov n'est pas irréductible.

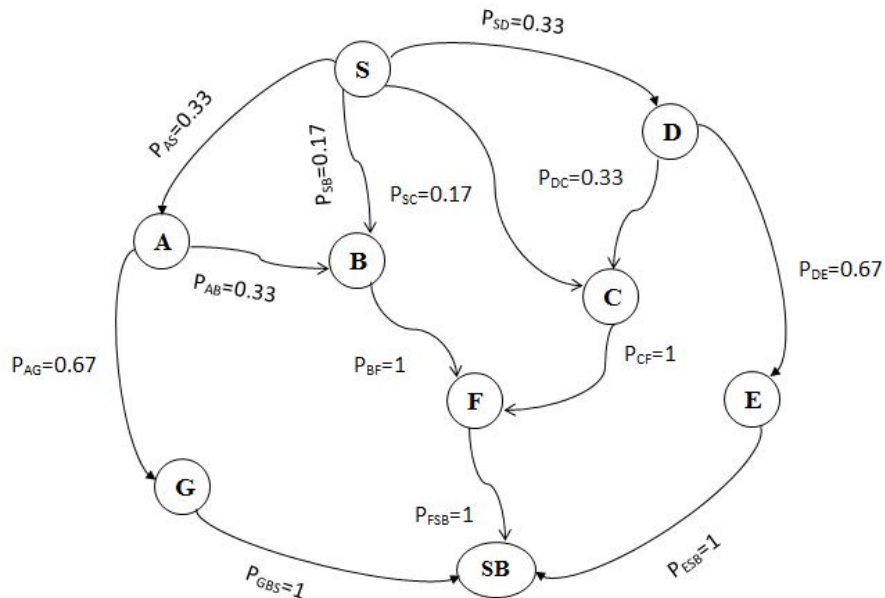


FIGURE 3.6 – Le graphe de transition

### 3.5 Implémentation du modèle proposé

Pour avoir des résultats analytiques, on a opté pour une simulation d'un scénario des réseaux de capteur sans fil. Pour arriver à notre objectif, nous avons développé une interface, qui nous permettra de faire la simulation, et tester l'efficacité de la proposition qu'on a apporté dans ce travail. Cela est effectué à l'aide d'un logiciel de programmation appelé Java Modelling Tools v.0.9.2 (JMT).

### 3.6 Présentation Java Modelling Tools v.0.9.2 (JMT)

Java Modelling Tools est un logiciel OpenSource, il consiste en six outils pour l'évaluation de performance, la modélisation des systèmes avec des techniques d'analyse, il permet de développer et déployer rapidement et gratuitement des applications graphiques. Les six outils sont SIMwiz, SIMgraph, MVA, MCA, ABA, WAT.

JMT est un simulateur d'évènement discret pour analyser des modèles de réseau de file d'attente, il contrôle la durée de la simulation qui a été automatique dans un environnement fortement personnalisable.

Dans cette partie, nous allons effectuer une simulation de notre réseaux de files d'attente par le simulateur JMTgraph.

#### **Une vue globale de l'application :**

Nous avons modéliser, surveillé et géré un RCSF suivant un scénario définit. Une interface graphique représente des informations sur les capteurs et ses états de fonctionnement. La figure illustre le principe général de notre simulation.

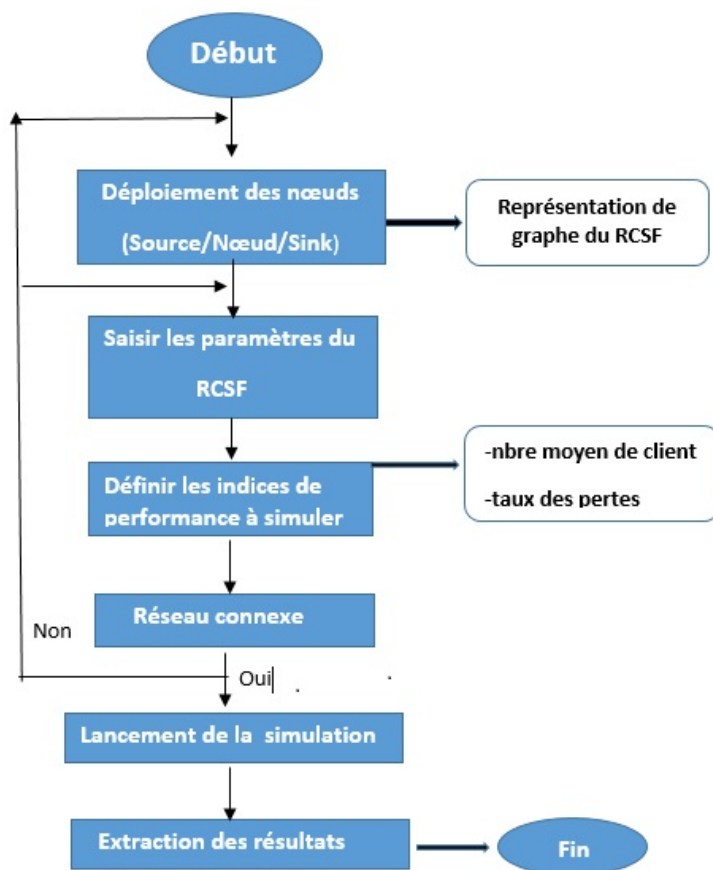


FIGURE 3.7 – Le principe générale de notre simulation

Premièrement, l'utilisateur doit introduire son graphe représentant le RCSF, en saisissant par la suite ses paramètres tel que le temps de la simulation, les temps de service pour chaque capteur etc.

Le déploiement du réseau est suivi par la connectivité de l'ensemble des nœuds capteurs. Une fois l'exécution est lancée, les résultats sont représentés avec des tableaux et des courbes.

On s'intéresse dans notre simulation à calculer le nombre moyen de client dans chaque station, et au taux de pertes des paquets des données s'ils existent.

Pour cela, nous ferons varier les temps de services à chaque essaie, en donnant un même temps de service pour tous les nœuds de même niveau les paramètres de simulation utilisés sont récapitulés dans le tableau 1.



Durée maximale de simulation	60 s
La taille de l'échantillon	100,000
Nombre maximum de client à chaque station	5
Temps moyen des inters arrivées	14s
Temps moyens de service	∈ 0,5,10,15,20,25,30,40,45,60,80

Tableau1 - Les paramètres de simulation

**Résultats numériques :**

Paramètre/Nbr Client	p0(0,0)	p1(5,10)	p2(10,5)	p3(15,15)	p4(20,5)	p5(25,20)	p7(30,10)	p8(40,25)	p9(45,30)	P10(60,20)	P11(80,80)
A	0	0,113	0,308	0,545	0,829	1,162	1,566	2,296	2,644	3,469	4,011
B	0	0,11	0,249	0,42	0,626	0,895	1,133	1,699	1,964	2,587	3,23
C	0	0,11	0,245	0,415	0,629	0,881	1,146	1,719	1,955	2,576	3,229
D	0	0,134	0,306	0,522	0,823	1,152	1,57	2,347	2,67	3,449	4,022
E	0	0,188	0,085	0,309	0,084	0,43	0,173	0,484	0,592	0,35	1,372
F	0	0,636	0,242	1,179	0,24	1,814	0,586	2,132	2,526	1,538	4,004
G	0	0,188	0,086	0,314	0,084	0,432	0,173	0,49	0,595	0,354	1,377

FIGURE 3.8 – Tableau2 : Le nombre moyen de clients dans la file d'attente

paramètre/TP	p0(0,0)	p1(5,10)	p2(10,5)	p3(15,15)	p4(20,5)	p5(25,20)	p7(30,10)	p8(40,25)	p9(45,30)	P10(60,20)	P11(80,80)
A	0	0	0,000014	0,0000838	0,000291	0,000713	0,00141	0,00334	0,00453	0,0079	0,011
B	0	0	0,00000536	0,0000311	0,00019	0,000283	0,000562	0,00133	0,00178	0,00315	0,00465
C	0	0	0,00000512	0,0000315	0,000117	0,000288	0,000552	0,00134	0,00178	0,0031	0,0047
D	0	0	0,0000129	0,0000837	0,000293	0,000706	0,00139	0,00341	0,00451	0,0079	0,011
E	0	0	0	0,00000807	0	0,0000191	0	0,00273	0,0000383	0,00000436	0,000337
F	0	0,00024	0,00000983	0,00124	0,00000818	0,00301	0,000147	0,00373	0,0052	0,00144	0,011
G	0	0	0	0,00000766	0	0,0000188	0	0,0000214	0,0000388	0,00000506	0,000341

FIGURE 3.9 – Tableau3 : Le taux de perte des paquets

Avec  $p_i$  (a, b) et le paramètre i qui affecte la valeur "a" pour le temps moyen de service des nœuds A,B,C et D et la valeur "b" pour le temps moyen de service des nœuds E, F et G. Les tableaux Tab2 et Tab3 enregistrent les résultats trouvés par simulation. On représente ses résultats par deux figures 3.10 et figures 3.11 ci-dessous.

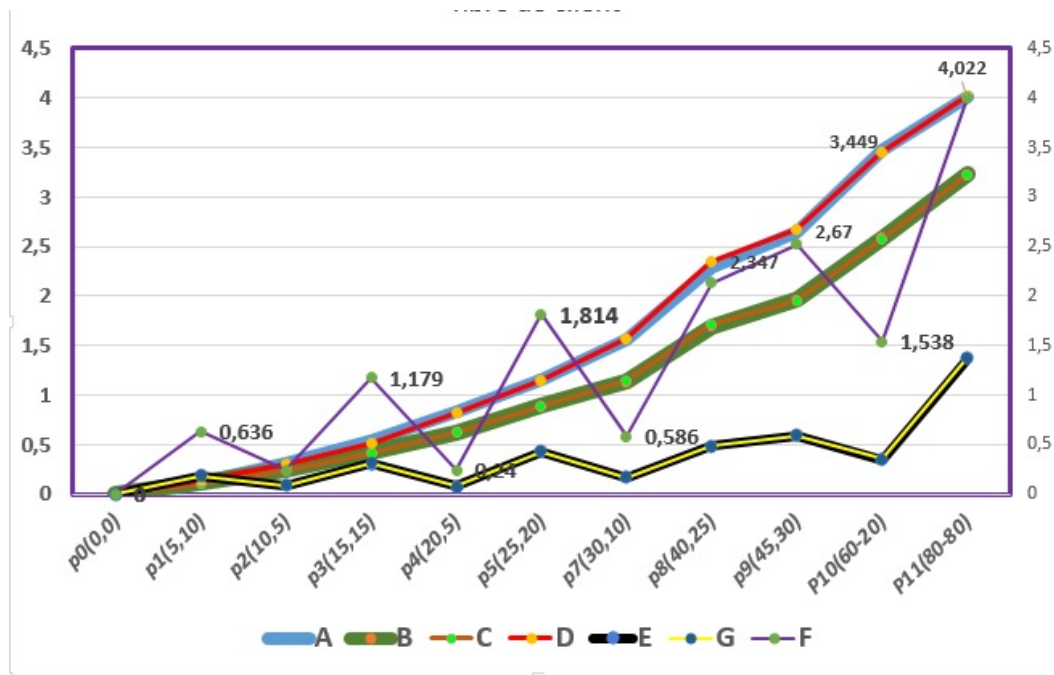


FIGURE 3.10 – Nombre moyen de clients

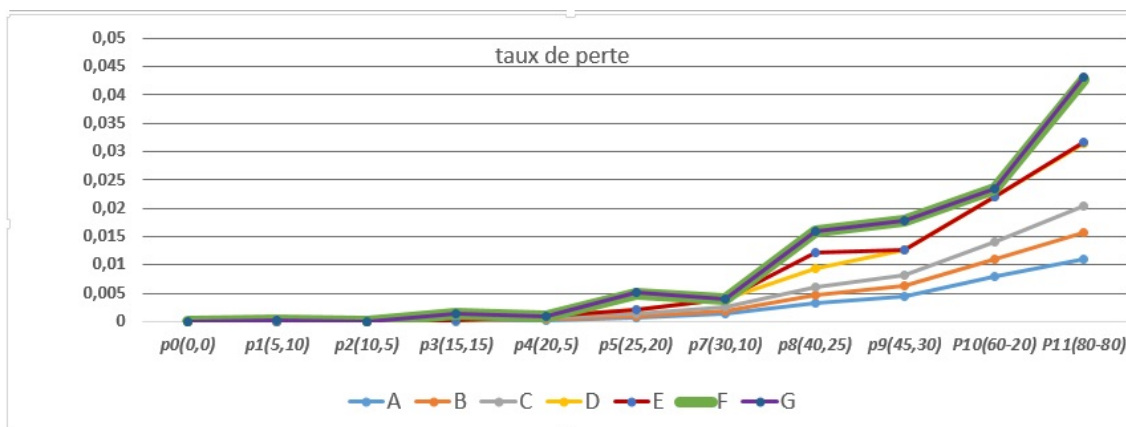


FIGURE 3.11 – Taux de perte

On observe sensiblement le même résultat trouvé pour les deux figures (les courbes ont les même allures), alors on peut noter que le nombre de clients augmente, ça provoque l'augmentation de taux de pertes des paquets. On observant sur les courbes de la figure 3.11 les taux de pertes peuvent être partagé en trois parties :

1.  $p_i < p_5 \Rightarrow$  le taux de perte est négligeables
2.  $p_5 < p_i < p_{10} \Rightarrow$  le taux de perte est moyenne
3.  $p_i > p_{10} \Rightarrow$  une grande perte de données

à partir de ces remarques nous pouvons désigner les deux seuils T1 et T2 sur la figure 3.10 et comment ajuster le taux de service comme suit :

- Nombre moyen de client  $< 1.814 \Rightarrow T1 = 2 \Rightarrow$  il n'y a pas de congestion  $\Rightarrow$  ici on augmente le taux de transmissions en réduisant le temps de service à une moyenne 15 pour A, B, C, D et 11 pour E,F,G.
- $1.814 < \text{Nombre moyen de client} < 3.469 \Rightarrow T2 = 4 \Rightarrow$  il y a une congestion moyenne  $\Rightarrow$  ici il faut diminuer le taux de transmission en augmentant le temps de service à une moyenne 34 pour A, B, C, D et 18 pour E,F,G.
- Nombre moyen de client  $> T2 \Rightarrow$  il y a une forte congestion  $\Rightarrow$  ici il faut réduire encore le taux de transmission en augmentant le temps de service à une moyenne 70 pour A, B, C, D et 50 pour E,F,G.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle de contrôle de congestion à base de chaîne de Markov. Nous avons modélisé la solution et la simulée avec JMTgraph. Les résultats de simulations ont permis de fixer les paramètres qui nous permettent de détecter le degré de la congestion à savoir le taux d'occupation de la file d'attente et surtout de trouver les valeurs optimales pour le taux de service pour éviter la congestion.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

---

Fournir une communication fiable dans les futurs réseaux en particulier les réseaux de capteurs sans fil est un véritable défi. En effet, un réseau de capteur sans fil est un environnement hostile qui apporte plusieurs défis, dus à des caractéristiques et spécificités propre à ce genre de technologie. En outre, les délais variables, les longues périodes de déconnexion induisent le problème de congestion qu'il faut prendre en considération lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil.

Dans ce mémoire de master, nous avons proposé l'amélioration des systèmes de communication des réseaux de capteurs sans fil. Plus particulièrement, nous cherchons à mieux contrôler la congestion dans ces réseaux pour rendre la communication plus fluide pour assurer le bon fonctionnement de ces réseaux.

Nous avons choisi dans ce mémoire d'étudier le contrôle de la congestion dans ces réseaux. Pour commencer, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fils pour bien comprendre sur quoi notre travail est basé. Ensuite, nous avons présenté quelques stratégies et protocoles utilisés pour le contrôle de la congestion. La présence de congestion dans les  $RCSF_s$  réduit la fiabilité de transmission des messages entre les nœuds, ce qui réduit les performances de ces réseaux. La plupart des approches proposées se basent sur l'ajustement du taux de transmission.

Dans le dernier chapitre, nous avons modélisé une approche de contrôle de congestion CLCD basée aussi sur l'ajustement du taux de transmission. Grâce aux résultats de simulation que nous effectués sur le modèle en utilisant JMT nous avons pu fixer les paramètres qui nous permettent de détecter le degré de la congestion à savoir le taux d'occupation de la file d'attente et surtout de trouver les valeurs optimales pour le taux de service pour éviter la congestion.

En guise de perspective nous comptons implémenter notre modèle proposé et le comparer avec d'autre solution. Tous en raigeant en même temps sur d'autre paramètre pour réduire les taux de pertes.

# Bibliographie

- [1] D. Dhoutaut. "Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation". Thèse de Doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Décembre 2003.
- [2] A. MANI. " Protocole de routage avec minimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" Mémoire de Master en Informatique, Option Réseaux et Systèmes Distribués. Université de Béjaia, 2009/2010.
- [3] M. Srivastava, D. Culler, D. Estrin. " Overview of sensor networks". Guestedition, 38(8) : 41-49, August 2004.
- [4] S. Yessad. "couche MAC avec contrainte d'énergie et équité dans les réseaux de capteur". Mémoire de magistère. Université de bejaia. 2006.
- [5] B. Thiziri. "Evaluation par files d'attente d'un protocole de congestion dans les réseaux de capteurs sans fil". Mémoire de mastre. Université de A / Mira de Bejaia. 2013.
- [6] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin."An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proc. INFOCOM'02, New York, USA, June. 2002.
- [7] I. Balasinghan, Q. Wang. "wireless sensor networks". Wireless Sensor Networks : Application-Centric Design, Geoff V Merrett and Yen Kheng Tan (Ed), ISBN, 7 : 307-321-953-978, 2010.
- [8] J. Palsberg, Ben L. Titzer. "nonintrusive precision instrumentation of microcontroller software". ACM, 40 : 59-68, July 2005.
- [9] Y. Younes. "minimisation d'énergie dans les réseaux de capteur". Mémoire de magister. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2012.

- [10] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazalah, W. B. Heinzelman. "A taxonomy of Wireless micro-sensor network models". *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 6, no. 2, 28-36. April 2002.
- [11] H. Karl, A. Wiling. "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks". John Wiley & Sons. 2005.
- [12] D. E. Culler. "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," In *Proc. ACM MOBICOM 2001*. 221-235. Rome, Italy 2001
- [13] M. Gagnaire, D. Kofman. "Réseau Haut Débit", Tome I : Réseaux ATM et Réseaux locaux. Dunod, 1999.
- [14] V. R. Syrotink, B. Li, A. M. Mielke. "Heterogeneous Wireless Sensor Networks" in *Algorithms and protocols for wireless Ad hoc and sensor networks*. ed. John wiley & sons, Inc, no. 2, 21-50. 2008.
- [15] S. Boulfekhar. "Approche de minimisation d'énergie dans les réseaux de capteur". Mémoire de magistère. Université Abdrahmen Mira de Bejaia. 2006.
- [16] W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, I.F. AKyildiz. "a survey on sensor networks". *IEEE Communications magazine*, 102-116, August 2002.
- [17] E. Cayirci. "Survey on Sensor Networks". *IEEE Communications Magazine*. 102-114. 2002.
- [18] Z. Khaled. "Réseau de capteur avec détection de collision". Mémoire d'ingénieur 2007/2008.
- [19] A. T. Campbell, C. Y. Wan, S. B. Eisenmen. "Coda : Congestion detection and a voidance in sensor networks". *d'ACM SenSys*. Novembre 2003.
- [20] M. Lamine. "Sécurité dans les réseaux de capteur sans fil". Mémoire de magistère en informatique. Université de bejaia. 2007/2008.
- [21] S. K. Sebastian, K. Pushparaj V. B. Mon R. Chakravarthi, C. Gomathy. "a survey on congestion control in Wireless networks". no. 1, 161-164. Janvier-Juin 2010.
- [22] R. T. Malar. "congestion control in wireless sensor networks based multi-path routing in priority rate ajustment technique". *International Journal of Advanced Engineering and application*. vol. 99, no. 2, 145-195. Jan 2010.
- [23] M. H. Suzer, C. Bsaran, K. Kang. "hop-by-hop congestion control and load balancing in wireless sensor networks". *IEEE Conference on Local Computer Networks*. 2010.

- [24] M. Mohammad. "modélisation de flux dans un réseau : étude et simulation de file d'attente". Mémoire de mastre. Université Abou bekr belkaid de Tlemcen Algérie. 2011/2012.
- [25] N. B. Abu-Ghazaleh, W. Heinzelman, S. Tilak. "A taxonomy Wireless micro-sensor network models". ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review, no. 2. Avril 2002.
- [26] F. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam. "ESRT : event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks". Proceedings of the 4th ACM international symposium on mobile ad hoc networking and computing. 177-188. 2003.
- [27] B. Krishnamachari. "Networking Wireless Sensor". Cambridge University Press. 2005.
- [28] P. Valencia, D. Moore. "environmental Wireless Sensor Networks". proceedings of the IEEE. vol. 98. Nov 2010.
- [29] M. Mission, N. El Rachkidy, A. Guitton. "Pirat : Pivot routing for alarm transmission in wireless sensor networks". Dans IEEE Local Computer Networks. 2009.
- [30] D. Bein. "fault-tolerant K-fold pivot routing in wireless sensor networks". 41 st Hawii International Conference on Systems Sciences. 2008.
- [31] K. J. Han, J. S. Lee, J. P. Ryu. "efficient routing scheme using pivot node in wireless sensor networks". Dans ICCS, (4490 in LNCS) : 574-577. 2007.
- [32] R. Bajcsy, C. T. Ee "congestion control and fairness for many- to-one routing in sensor networks". November 2004.
- [33] M. Monowar, O. Rahman, A. K. Pathan, C. Seon Hong. " Prioritized Heterogeneous Traffic-Oriented Congestion Control Protocol (PHTCCP) for WSNs". International Journal of Information Technology, Vol. 9, No. 1, janvier 2012
- [34] T. Ahmad. " Congestion Control in Wireless Sensor Networks : A survey". Journal of Engineering Research and Applications Vol. 4, Issue 11(Version - 6), ISSN : 2248-9622, 109-113, November 2014.
- [35] DzisiGadze,D. wasiDake, K. Diawuo. " ADAPTIVE CONGESTION CONTROL PROTOCOL (ACCP) FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS". International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 5, No. 5, October 2013.
- [36] M. A. Bentia, L. Khoukhi, M. Esseghir, L. Merghen boulahia. "A markov Chain Based Model for Congestion Control in VANETS ". 276h International Conference an Advanced.

- [37] M. S. Obaidat, S. misra. "lacas : Learning automata- based congestion avoidance scheme for healthcare wireless sensor networks". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009.
- [38] J. Palsberg Ben, L .Titer. "Nonintrusive precision instrumentation of microcontroller software". no. 40, 59-68. July 2005.
- [39] A. Tseng. "the Broadcast Storm problem in a Mobile Ad hoc Networks". in Wireless Networks, Kluwer Academic publishers. no. 8, 153-167. 2002.
- [40] T. Qiu, L. Wang, L. Feng, L. Shu. "A new modeling method for vector processor pipeline using queueing network". 5th International ICST Conference on Communications and Networking. 1-6, Beijing 2010.



# Résumé

---

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la congestion est considérée comme étant un problème majeur. Pour remédier à ce problème, plusieurs protocoles de contrôle de congestion ont été spécialement conçus.

La plupart des protocoles proposés ne prennent pas en considération la congestion au niveau des nœuds intermédiaires qui sont utilisés comme relais.

Au terme de ce travail, nous avons proposée un modèle de contrôle de congestion CLCD, qui contrôle l'état de réseau avant l'arrivée de la congestion et qui nous avons modélisée par une chaîne de Markov.

Mots clés : réseaux de capteurs, congestion, réseau de file d'attente, Modélisation par chaîne de Markov.

# Abstract

---

In wireless sensor networks, congestion is considered a major problem. In order to address this problem, several congestion control protocols are specifically designed.

To the term of this work, we proposed a model of contrôl of CLCD congestion, that contrôls the state of network before the arrival of the congestion and that we have modélisée by a chaîne of Markov.

Key words : wireless sensor networks, congestion, Modelling by a chaîne of Markov.