

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Mathématiques et Informatique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Informatique
Domaine : Mathématiques et Informatique
Filière : Informatique
Spécialité : Réseaux et Ingénierie des Données
Thème

**ANALYSE DES INDICATEURS GLOBAUX DE POSITIONS
POUR L'AMÉLIORATION DE LA TOLÉRANCE AUX PANNES
DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL**

Présenté par :

- 1) BERRAFA Hadjar
- 2) BERRAHO Djamila

Devant le jury composé de :

Dr. BOUHALOUAN Djamila	M C B	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Président
Mme. SAIDI Samira	M A A	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
Dr. MESSAOUDI Mohamed Amine	M C B	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

REMERCIEMENTS

Nous remercions « Allah » de nous avoir donné la patience et le courage indispensables à l'accomplissement de ce mémoire de fin d'études.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, le **Dr MESSAOUDI Mohamed Amine**, pour son précieux soutien, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de notre projet de fin d'études. Sa patience inébranlable, la pertinence de ses remarques ainsi que la justesse de ses conseils ont été des éléments clés pour mener à bien notre projet.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury pour leur engagement à évaluer notre travail et à l'enrichir par leurs remarques constructives. Nous remercions le **Dr BOUHALOUAN Djamila** pour avoir accepté la présidence du jury. Nous adressons également nos remerciements à l'examinatrice, **Mme SAIDI Samira**, pour l'attention qu'elle a portée à notre travail.

Enfin, nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants du département des Mathématiques et Informatique pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire.

DEDICACE

Je dédie ce projet :

À **ma mère** et **mon père**, pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, ainsi que pour le sens du devoir qu'ils m'ont inculqué depuis mon enfance.

À ma chère sœur **Fatouma** et à **son mari**, qui n'ont cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

À mon cher **grand frère** et à **sa femme**, je vous remercie pour l'aide que vous m'avez apportée. Vous m'avez soutenu, réconforté et encouragé. Je vous souhaite bonheur, réussite et prospérité.

À mon cher petit frère **Abdelrahmene**, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur à toute la famille. Qu'Allah l'augmente en science et en piété.

À mon cher neveu **Loaye** et à ma chère nièce **Lodjaine**, vous avez apporté beaucoup de bonheur à notre famille. Que Dieu vous garde pour moi.

À mon cher mari **Nasr-Allah**, qui m'a soutenue tout au long de mes études. Je te souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

À ma chère binôme **Djamila**, qui m'a toujours encouragée. Je suis infiniment reconnaissante de t'avoir à mes côtés.

À tous mes **amis** et **collègues**, que j'ai pu connaître depuis mon enfance.

À tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours.

BERRAFA Hadjar

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À mes **chers parents**, aucune dédicace ne saurait témoigner de mon profond amour, de mon immense gratitude et de mon plus grand respect. Je ne pourrai jamais oublier la tendresse et l'amour dévoué dont ils m'ont toujours entouré depuis mon enfance.

À mes chers frères, **Abdelkader, Hocine et Yousef**, je sais que ma réussite est très importante à vos yeux. Que Dieu vous garde pour moi.

À mes chères belles-sœurs, **Imène et Amina**, puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite.

À ma nièce adorable et à mes chers neveux, **Meriem, Ahmed Khalil et Adem**, je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de joie et de réussite.

À ma très chère binôme **Hadjer**, je te remercie pour ton soutien moral, ta patience et ta compréhension tout au long de ce projet. Notre amitié solide et notre complicité précieuse sont un honneur pour moi. Je suis honorée de t'avoir comme amie.

À mes **enseignants** et mes **collègues**, Que Dieu vous récompense pour tous vos bienfaits.

Enfin, à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, je dédie ce mémoire.

BERRAHO Djamila

Table des matières

Introduction générale	1
Les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1. Introduction.....	4
1.2. Les capteurs.....	4
1.2.1. Architecture d'un capteur	4
1.2.2. Caractéristique principales d'un capteur sans fil :.....	5
1.2.3. Classification des capteurs	6
1.3. Réseaux de capteurs sans fil.....	6
1.3.1. Architecture d'un RCSF.....	7
1.3.2. Architecture de communication dans les RCSF.....	8
1.3.3. Caractéristiques et contraintes d'un RCSF	8
1.3.4. Domaines d'Applications	10
1.4. Réseaux Ad hoc classiques Vs RCSF.....	12
1.5. Conclusion	13
Tolérance aux pannes dans les RCSFs	14
2.1. Introduction.....	17
2.2. Sûreté de fonctionnement	17
2.2.1. Entraves à la sûreté de fonctionnement	20
2.2.2. Classification des pannes.....	20
2.2.3. Sources de pannes dans les RCSFs	23
2.3. La tolérance aux pannes dans les RCSF	26
2.3.1. Définition de la tolérance aux pannes.....	26
2.3.2. Procédure générale de tolérance aux pannes.....	26
2.3.3. Exemple d'un RCSF tolérant aux pannes.....	27
2.3.4. Les techniques de gestion des pannes	29
2.3.5. Classification des solutions de tolérance aux pannes	31
2.4. Conclusion	34
Indicateurs globaux de connectivité	35
3.1. Introduction.....	39
3.2. Théorie des graphes	39
3.2.1. Un graphe	39
3.2.2. Les types des graphes.....	40
3.3. Utilité des graphes.....	42
3.4. Outils généraux de description des graphes	42

3.4.1.	Indicateurs locaux de position.....	42
3.4.2.	Indicateurs globaux de position	46
3.4.3.	Indicateurs globaux de connectivité	48
3.5.	Conclusion	49
<i>Simulations et discussion des résultats.....</i>		50
4.1.	Introduction.....	51
4.2.	Environnement de simulation	51
4.2.1.	Outils Matériels	51
4.2.2.	Outils Logiciels	51
4.3.	Système d'exploitation CONTIKI.....	52
4.4.	Simulateurs Cooja.....	53
4.5.	Méthodologie générale proposée.....	54
4.6.	Les étapes des simulations	55
4.6.1.	Création du réseau	55
4.6.2.	Paramètres des simulations	57
4.6.3.	Les différentes topologies du réseau	57
4.7.	Scénarios des simulations	59
4.7.1.	Scénarios mode nominal	59
4.7.2.	Scénarios mode dégradé	62
4.7.3.	Scénarios de l'action corrective	65
4.8.	Comparaison entre les simulations :	72
4.9.	Conclusion	74
Conclusion générale		76
Bibliographie		78

Liste des abréviations

- WPAN:** Wireless Personal Area Network
- WLAN:** Wireless Local Area Network
- WMAN:** Wireless Metropolitan Area Network
- WAN:** Wide Area Network
- WSN:** Wireless Sensor Network
- RCSF:** Reseaux de capteur sans fil
- ADCS:** Services de certificats active directory
- WiFi:** Wireless Fidelity
- Zigbee:** Zonal Intercommunication global-standard
- OSI:** Open Systems Interconnection
- MANET:** Mobil Adhoc Network
- TinyOS:** Micro Threading Operating system
- MAC:** Média Access Control
- DODAG:** Directed Acyclic Graphe
- RPL:** Routing Protocol for low-Power and lossy Network

Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, l'utilisation de l'informatique est indispensable dans tous les domaines, et la mise en place de réseaux informatiques, qu'ils soient de petite ou grande envergure, est extrêmement répandue. Cette généralisation s'explique par la possibilité de partager des fichiers et des ressources entre les utilisateurs, favorisant ainsi la collaboration et l'efficacité. Par ailleurs, l'évolution technologique a permis l'avènement des réseaux sans fil, qui jouent un rôle essentiel dans la connectivité et la mobilité au sein des environnements professionnels modernes.

Les réseaux sans fil permettent de connecter des appareils informatiques sans avoir besoin d'installer de câblage, ce qui offre plus de confort et permet des économies au niveau des infrastructures. Ils peuvent être classés en fonction de leur couverture géographique, tels que les Wireless Personal Area Network (WPAN), Wireless Local Area Network (WLAN), Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) et Wireless Wide Area Network (WWAN). Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une catégorie spécifique de réseaux sans fil qui incluent un grand nombre de nœuds et sont considérés comme une forme particulière de réseaux ad hoc.

Cette nouvelle technologie sans fil comprend un grand nombre de nœuds capteurs, capables de collecter des données et de les transférer à une passerelle. Ces réseaux sont classés en fonction de leur mode de communication, de leurs protocoles de routage et de leurs solutions de sécurité. Ils permettent de surveiller divers phénomènes physiques dans l'environnement et sont utilisés dans des applications telles que la surveillance environnementale, industrielle et la sécurité. Cependant, en raison de leur nature complexe et des conditions environnementales dans lesquelles ils opèrent, les RCSF peuvent être sujets à diverses défaillances, telles que les interruptions de la connectivité, la dégradation des performances du réseau et d'autres problèmes.

Face à la complexité croissante des Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) et à la nécessité d'assurer leur continuité de fonctionnement dans un environnement souvent sujet à des pannes potentielles, il est essentiel de garantir une disponibilité élevée et une connectivité fiable entre les nœuds du réseau. Pour cela, plusieurs problèmes cruciaux se posent, tels que les différentes techniques utilisées pour améliorer la connectivité du réseau. De plus, le choix du nombre et de la position des nœuds influence directement la portée des communications sans fil et la qualité de la connexion entre ces derniers. Les techniques qui peuvent garantir une haute tolérance aux pannes dans les RCSF sont également importantes à considérer. Cela amène à examiner les configurations optimales et nécessaires pour maintenir une connectivité stable malgré les défaillances.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, notre objectif est de développer une solution garantissant la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Pour ce faire, nous

proposons d'explorer les techniques de la théorie des graphes par l'analyse des indicateurs globaux de position, qui permettent de maintenir la connectivité des RCSF malgré l'occurrence de défaillances, dans le cadre de la tolérance aux pannes.

Afin de mener à bien notre étude, nous avons structuré notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre explore en profondeur les aspects fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), en commençant par la définition des capteurs, leur architecture matérielle et logicielle, ainsi que leurs principales caractéristiques. Ensuite, il examine la classification des capteurs en fonction de divers critères. Le focus se déplace ensuite vers les RCSF, en expliquant leur définition, leur architecture et leurs caractéristiques. Enfin, le chapitre explore les différents domaines d'application des RCSF.

Le deuxième chapitre aborde en détail le concept des pannes, en commençant par leur définition et leur classification selon divers critères. Ensuite, il examine les différentes approches de gestion des pannes, mettant en lumière les stratégies et les méthodes utilisées pour détecter, prévenir et réagir aux pannes dans les RCSF. L'accent est mis sur l'importance de la tolérance aux pannes, illustrée par des exemples concrets de situations où cette tolérance est mise en œuvre avec succès. Enfin, le chapitre présente une procédure générale pour mettre en œuvre cette approche dans les RCSF, ainsi qu'un aperçu des différentes techniques utilisées à cet effet.

Le troisième chapitre explore en détail les fondements de la théorie des graphes et leur application aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Nous présenterons les concepts fondamentaux de la théorie des graphes ainsi que divers outils généraux pour décrire les graphes. Nous examinerons également en détail indicateurs globaux de position, pertinents pour évaluer la tolérance aux pannes dans les RCSF.

Le dernier chapitre expose l'approche pratique adoptée pour analyser les indicateurs globaux de position dans un RCSF en utilisant des outils de simulation tels que *Contiki Cooja*. Nous décrirons en détail les étapes de création du réseau, la configuration des nœuds, la simulation des scénarios de pannes, ainsi que l'évaluation des performances du réseau à l'aide des indicateurs sélectionnés. Ensuite, nous proposerons des améliorations visant à augmenter sa tolérance aux pannes, avant de discuter et d'analyser les résultats de la simulation.

Enfin, notre mémoire se termine par une conclusion générale dans laquelle nous récapitulerons les résultats obtenus et suggérerons des pistes pour améliorer la solution proposée dans le cadre de ce projet de fin d'études.

Chapitre 1

Les réseaux de capteurs sans fil

1.1.Introduction

Les avancées récentes dans les technologies de communication sans fil ont donné naissance à un nouveau type de réseau : les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces réseaux sont constitués de petits appareils, appelés capteurs, dotés de ressources limitées, mais capables de collecter et de transmettre des données environnementales telles que la température, l'humidité, la présence de gaz, etc., vers un ou plusieurs points de collecte [2].

Dans ce chapitre, nous allons aborder les concepts fondamentaux des capteurs sans fil et des réseaux de capteurs sans fil, y compris leurs architectures de communication et leurs domaines d'application. Nous examinerons également les principales contraintes qui influent sur la conception de ces réseaux.

1.2. Les capteurs

Capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, les traitements sur ces données et leurs communications aux stations de bases [1].

1.2.1. Architecture d'un capteur

Concernant l'architecture des capteurs on peut la scinder en deux parties, ces deux parties à savoir l'architecture matérielle et l'architecture logicielle sont complémentaires car elles composent le capteur dans son intégralité, à cet effet nous développerons les deux architectures [10].

1.2.1.1. Architecture matérielle :

Un capteur se compose de quatre unités de base (cf. figure I.1)

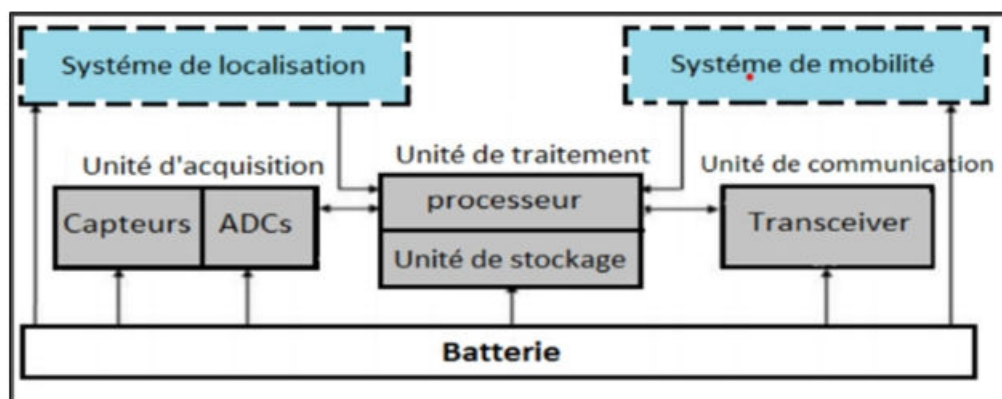


Figure I.1: Architecture matérielle d'un capteur sans fil.

- L'unité d'acquisition, appelée aussi unité de captage elle est généralement composée de deux sous-unités, le capteur lui-même et un convertisseur Analogique/Numérique (ADCs). Les capteurs permettent une mesure sur des paramètres environnementaux pour fournir des signaux analogiques obtenus après conversion de ces données récoltées. Les ADCs vont convertir ces signaux analogiques en signaux numériques par l'unité de traitement.
- L'unité de traitement, se compose, de deux interfaces une avec l'unité de captage et l'autre avec l'unité de communication, Elle comprend un processeur et une mémoire. Ses fonctions principales sont l'exécution de protocoles de communication qui permettent de faire collaborer le capteur avec d'autres capteurs et peut aussi analyser les données captées.
- L'unité de communication, cette unité permet d'effectuer toutes les communications entre les différents nœuds sur un médium sans fil, car elle est dotée d'un émetteur-récepteur.
- L'unité d'alimentation en énergie (Batterie), Elle alimente les unités que nous avons citées en dessus. Généralement, elle n'est ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conceptions de protocoles pour les réseaux de capteurs [6].

1.2.1.2. Architecture logicielle :

La contrainte énergétique des capteurs exige l'utilisation de systèmes d'exploitation légers tels que TinyOS ou Contiki. Cependant, TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RCSF. Il est libre et est utilisé par une large communauté de scientifiques dans des Simulations pour le développement et le test des algorithmes et protocoles réseau [1].

1.2.2. Caractéristique principales d'un capteur sans fil :

En raison de la grande variété de capteurs disponibles, les capteurs sont un composant essentiel dans de nombreuses applications. Le choix du type de capteur dépend de l'application et de son environnement de déploiement. De par certaines caractéristiques, les capteurs rendent différents services dont les plus importants sont [12]:

- Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.
- Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.
- Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.
- Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.
- Rapidité: Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

1.2.3. Classification des capteurs

Les capteurs ont plusieurs modes de classification :[31]

1.2.3.1. *Apport énergétique*

- Capteurs passifs : Ils n'ont pas besoin d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner (exemple : thermomètre à mercure...). Ce sont des capteurs modélisables par une impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) engendre une variation de l'impédance.
- Capteurs actifs : Ils sont constitués d'un ou d'un ensemble de transducteurs alimentés (exemple : chronomètre mécanique, jauge d'extensométrie appelée aussi jauge de contrainte, gyromètre...). Ce sont des capteurs que l'on pourrait modéliser par des générateurs comme les systèmes photovoltaïques et électromagnétiques. Ainsi ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.

1.2.3.2. *Types de sortie*

Les capteurs peuvent aussi faire l'objet d'une classification par type de sortie:

- Capteurs analogiques, le signal des capteurs numériques peut être du type : sortie tension, sortie courant.
- Capteurs numériques, le signal des capteurs numériques peuvent être du type : train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise ou un code numérique binaire.

1.3. Réseaux de capteurs sans fil

Un Réseau de Capteurs Sans Fil, Wireless Sensor Networks en anglais (WSN) est un système distribué de grande échelle mettant en communication un grand nombre de dispositifs très petits, autonomes, communément appelés "capteurs sans fil", ou simplement "capteurs". Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir, en cas de besoins, en envoyant l'information collectée, à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil.

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capables de traiter des informations et de les transmettre via les ondes radio (WiFi ou ZigBee par exemple), à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres. Les nœuds ont la capacité de jouer le rôle de routeurs. Un capteur analyse son environnement et propage les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de couverture. Dans un scénario d'application classique, plusieurs nœuds capteurs sont déployés dans un certain

environnement pour mesurer différents phénomènes physiques et faire remonter les informations collectées à une station de base distante, nommée aussi le nœud puits.

Dans le cas le plus simple, les capteurs communiquent directement avec la station de base. Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, les capteurs ne sont pas tous dans le voisinage du puits et les messages seront acheminés du nœud source vers le puits en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts [20].

1.3.1. Architecture d'un RCSF

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de : plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement des données [2].

Nœuds : Sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles

Sink : c'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux sinks ou plus pour alléger la charge.

Centre de traitement des données : c'est le centre vers lequel les données collectées par le Sink sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire de l'information utile exploitable. Le centre de traitement peut être éloigné du sink, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on introduit une passerelle entre le sink et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type du canal (c.f Figure I.2).

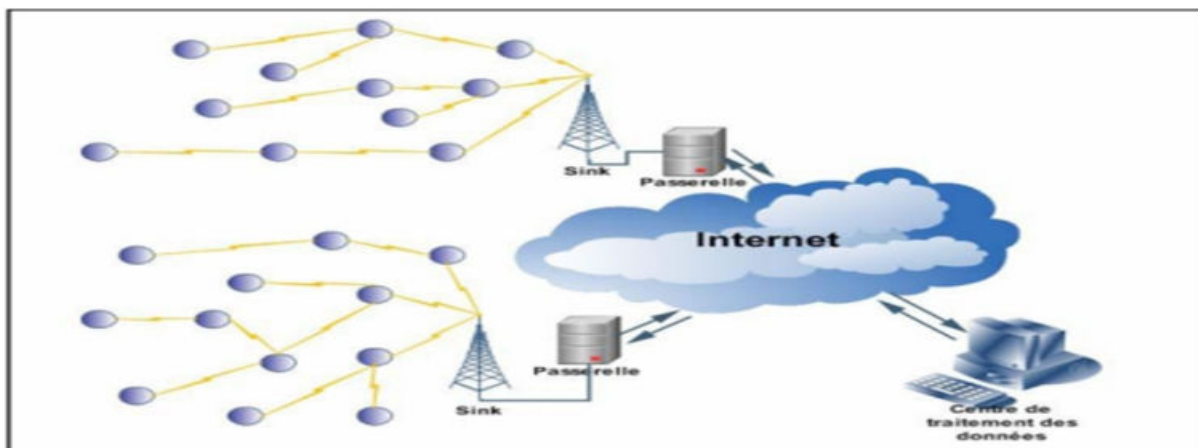


Figure I.2: Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil

1.3.2. Architecture de communication dans les RCSF

Le modèle de communication comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que trois couches pour la gestion d'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches [13].

Rôles des couches :

- **Couche physique** : Matériels pour envoyer et recevoir les données.
- **Couche liaison de données** : Gestion des liaisons entre les nœuds et les stations de base, contrôle d'erreurs.
- **Couche réseau** : Routage et transmission des données.
- **Couche transport** : Transport des données, contrôle de flux.
- **Couche application** : Interface pour les applications au haut niveau
- **Plan de gestion d'énergie** : Contrôle l'utilisation d'énergie.
- **Plan de gestion de mobilité** : Gestion des mouvements des nœuds.
- **Plan de gestion de tâche** : Balance les tâches entre les nœuds afin d'économiser de l'énergie.



Figure I.3: Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs

1.3.3. Caractéristiques et contraintes d'un RCSF

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs et représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs. Il existe plusieurs caractéristiques dans les RCSF dont nous citons les plus importantes [4]:

- **Durée de vie du réseau:** C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier noeud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **Bande passante limitée:** Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.
- **Média du transport :** Dans un réseau de capteurs, la communication multi sauts entre les nœuds est réalisée avec des liens sans fil à l'aide de media optique, infrarouge ou radio. La plus part des réseaux de capteurs utilisent des circuits de communication à radio fréquence grâce à leur faible coût ainsi que leur facilité d'installation.
- **La topologie du réseau:** Elle est en constante évolution à cause du changement de l'état d'activité des capteurs (actif, mise en veille et passif). Il faut que les 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 capteurs sont soit répartis de manière déterministe soit de manière aléatoire lancés en masse depuis un avion, par exemple.
- **Le passage à l'échelle:** La plupart des protocoles sont conçus pour des réseaux de capteurs d'une grande taille. Cependant, ces protocoles sont dits efficaces si les performances des réseaux ne doivent pas chuter d'une manière drastique quand le nombre de capteurs augmente dans le réseau.
- **La consommation d'énergie:** L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner.
- **L'auto-configuration:** Les réseaux de capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones d'intérêt hostiles. Par conséquent, aucune intervention humaine ne peut être requise pour assurer leur organisation. L'auto-configuration de ces réseaux s'avère nécessaire pour leur bon fonctionnement.

- **Topologie dynamique:** Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire et le changement d'état des capteurs entre actif et veille rendant ainsi, la topologie du réseau fréquemment changeante.

1.3.4. Domaines d'Applications

La miniaturisation des capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs de se développer dans plusieurs domaines d'application. Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes. 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 citons les domaines militaire, surveillance, environnemental, médical, domestique, commercial, ...etc [14].

1.3.4.1. *Le domaine militaire*

Les RCSFs permettent la détection des mouvements ennemis sur un champ de bataille ou bien de tracer leurs mouvements. De façon analogue, ils peuvent permettre la détection d'intrusion ou de cambriolage dans le domaine de la sécurité civile.



Figure I.4: Réseau de capteur militaire

1.3.4.2. *Applications environnementales*

La surveillance de l'environnement est un domaine où les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés. L'application classique est la détection des désastres tels que les feux de forêts.

CHAPITRE I : Les réseaux de capteurs sans fil

Dans une telle application, plusieurs capteurs sont déployés afin d'alerter les secours, d'évaluer les risques et de prendre les mesures nécessaires. Des capteurs peuvent également être déployés sur un terrain à des fins agricoles ou pour la surveillance des environnements hostiles tels que les volcans ou les régions toxiques.

1.3.4.3. Applications médicales

Les RCSF permettent par exemple la surveillance de l'état de santé des patients qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs, et ce en permanence.



Figure I.5: Domaine médicales

1.3.4.4. Applications dans la sécurité

L'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter des fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure. Avec une activation périodique de ces capteurs, le système peut fonctionner durant des années, voir des décennies.

1.3.4.5. Applications agricoles

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.3.4.6. Applications domestiques

En plaçant, sur le plafond ou dans le mur, des capteurs, on peut économiser l'énergie en gérant l'éclairage ou le chauffage en fonction de la localisation des personnes.

On plus de sa on a autre applications comme :

- Le bâtiment : lors de tremblements de terre, pour aider les secouristes à retrouver les victimes (capteurs emprisonnés dans le béton à la construction qui détectent le niveau de bruit)
- Le domaine de l'industrie : gestion des stocks
- Le domaine des transports : gestion du trafic
- Le domaine médical : pour contrôler le rythme cardiaque des patients

1.3.4.7. Applications de transport

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet ou d'une cargaison [2].



Figure I.6: Applications des réseaux de capteurs

1.4. Réseaux Ad hoc classiques Vs RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil sont apparentés aux réseaux ad hoc. En effet, ces deux types de réseaux ont de nombreux points communs. La ressemblance que nous pouvons remarquer immédiatement est que les deux sont des réseaux sans fil distribués avec une infrastructure pas toujours bien définie. Des chercheurs dans le domaine des MANET se sont consacrés à cette ressemblance, mais aussi à d'autres similarités comme la limitation d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul. Ils essaient d'apporter leur savoir-faire et d'adapter aux RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil) les algorithmes, protocoles et techniques dédiés initialement aux MANET.

Cependant, Ces deux classes de réseaux sans fil se différencient sur plusieurs aspects, nous résumons les principales différences dans le tableau suivant [23]:

Réseaux Ad-Hoc Classiques	Réseaux de capteur
<ul style="list-style-type: none">➤ Mobile, portable...➤ Génériques.➤ Chaque nœud à son propre objectif.➤ Flot de données any-to-any.➤ Communication point à point.➤ La qualité de service est majeure.➤ Mobilité.➤ Aucun nœud central.	<ul style="list-style-type: none">➤ Petits capteurs.➤ Objectifs ciblés.➤ Nœuds collaborent pour atteindre unobjectif commun.➤ Flot de données many –to-one.➤ Utilisation du broadcast .➤ Energie est un facteur déterminant.➤ Mobilité faible.➤ Station de base (coordination).

Tableau I.1: Comparaison entre les réseaux Ah hoc classique et les réseaux de capteur

1.5.Conclusion

Le premier chapitre constitue une exploration approfondie des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), depuis les éléments constitutifs des capteurs jusqu'à leur architecture et leurs applications. La définition des capteurs, leur architecture matérielle et logicielle, ainsi que leur classification selon différents critères ont été étudiées en détail. De même, les RCSF ont été définis avec précision, en mettant en lumière leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application. Ce chapitre jette les bases nécessaires à la compréhension de cette technologie émergente et de son potentiel dans divers domaines.

Dans le chapitre qui suit, nous présentons le concept de la tolérance aux pannes et leurs techniques qui permettent d'assurer une continuité opérationnelle et une fiabilité du réseau même en cas de défaillances.

Chapitre 2

Tolérance aux pannes dans les RCSFs

2.1. Introduction

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) sont sujets à une multitude de problèmes liés à leurs capteurs et à leur infrastructure. Les capteurs peuvent rencontrer des problèmes matériels ou de communication, entraînant ainsi une perte de données ou une dégradation de la qualité des mesures. De plus, les défaillances des nœuds ou des liaisons de communication peuvent perturber le fonctionnement du réseau, réduire sa durée de vie et altérer ses performances. Dans ce contexte, la tolérance aux pannes devient un aspect crucial pour garantir le bon fonctionnement du réseau, même en cas de dysfonctionnements.

Ce chapitre vise à explorer en profondeur les défis liés aux pannes dans les RCSF. Dans sa première partie, nous présenterons les concepts généraux relatifs aux pannes dans ces réseaux. La deuxième partie sera consacrée à la tolérance aux pannes. Nous commencerons par définir ce concept, puis nous décrirons la procédure générale, en illustrant avec un exemple concret. Ensuite, nous examinerons les différentes techniques existantes permettant la détection des pannes et assurant la fiabilité des RCSF, ainsi que leur gestion. Enfin, nous discuterons de la classification des solutions associées à la tolérance aux pannes dans les RCSF.

2.2. Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement peut être conceptualisée autour de trois notions principales : les attributs, les entraves et les moyens. Cette décomposition [7] est représentée de manière schématique dans l'arbre (cf. Figure II.1).

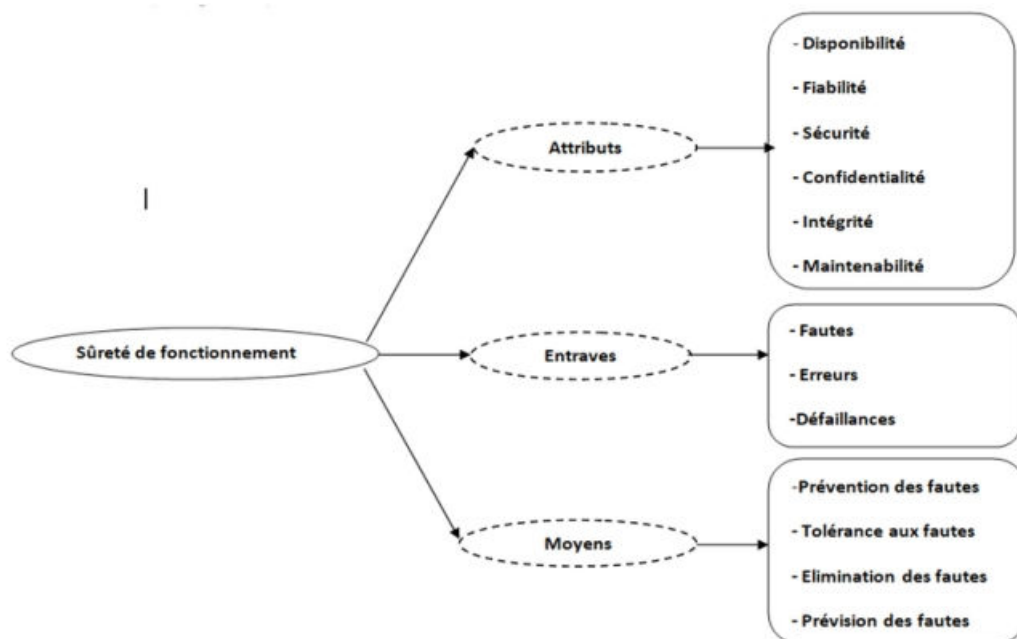


Figure II.1: L'arbre de la sûreté de fonctionnement

2.2.1. Entraves à la sûreté de fonctionnement

Les entraves à la sûreté de fonctionnement sont de trois types : les pannes, les erreurs et les défaillances.

1. Faute : La faute est la première cause de l'erreur, est toute faiblesse (défaut) pouvant provoquer, une erreur menant à la défaillance du système tel qu'il ne se comporte plus d'une manière pré-spécifiée [16].

2. L'erreur : l'erreur est la partie de l'état du système susceptible d'entraîner la défaillance, qui est causée par une faute s'il y a une erreur dans l'état de système, alors il existe une séquence d'actions qui peut être exécutée par le système et qui mènera à la défaillance du système [17] [9].

3. La panne : toute cause (événement, action, circonstance) pouvant provoquer, une erreur menant à la défaillance du système tel qu'il ne se comporte plus d'une manière pré-spécifiée[32].

Elle peut être :

- Panne permanente : elle persiste dès qu'elle apparaît jusqu'à la réparation.
- Panne transitoire : elle se produit de manière isolée.
- Panne intermittente : elle se produit aléatoirement plusieurs fois.

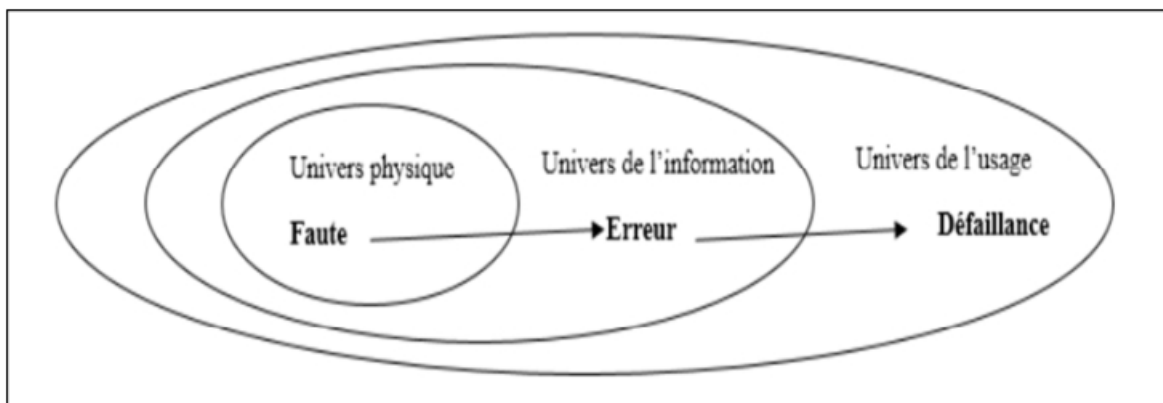


Figure II.2: Evolution de l'erreur à la défaillance

2.2.2. Classification des pannes

Une classification des pannes est proposée où la panne peut être due à plusieurs problèmes selon la durée, la cause ou le comportement. La classification classique est faite selon la nature résultante de la panne ce qui donne deux types de pannes [3]:

- **Pannes catastrophiques :** elles sont inacceptables. Par exemple, les grandeurs pathologiques d'un patient.

- **Pannes non catastrophiques** : elles sont acceptables. La collecte de la température dans un environnement.

La classification qui suit les trois critères est illustrée dans la figure suivante (Figure II.3) :

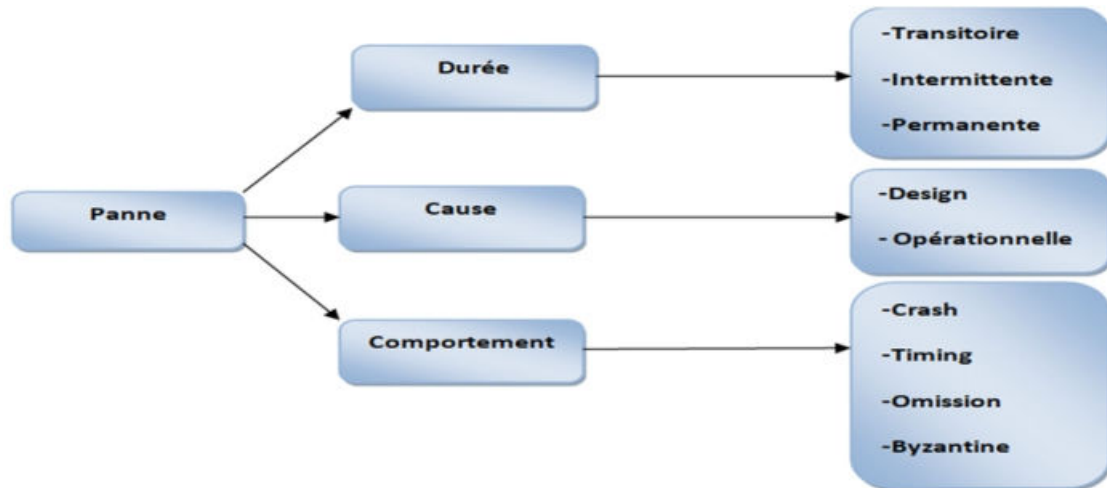


Figure II.3: Classification des pannes

2.2.2.1. *Pannes selon la durée*

Cette catégorie englobe les types de pannes suivants [14]:

- **Pannes transitoires** : pannes qui éventuellement disparaissent après un temps très bref, sans une intervention extérieure.
- **Panne Intermittente** : C'est une variante de la panne transitoire, elle se produit occasionnellement et de façon imprévisible. Elle est généralement due à l'instabilité de certaines caractéristiques matérielles ou à l'exécution du programme dans un espace particulier de l'environnement.
- **Pannes permanente** : pannes qui ne disparaissent pas après un temps et qui nécessitent une intervention extérieure.

2.2.2.2. *Panne selon la cause*

Selon la cause, On peut distinguer deux principaux types de pannes:

- **Panne de design** : due à une mauvaise structuration du réseau ou du composant en particulier. En pratique, ce genre de panne ne devrait pas exister grâce aux tests et simulations avant la réalisation finale du réseau [33].

- **Panne opérationnelle** : qui se produit durant le fonctionnement du système. Elle est généralement due aux causes physiques. En outre, on peut distinguer, spécialement pour les réseaux de capteurs, trois principales causes [29]:
 1. **Energie** : l'épuisement de la batterie cause l'arrêt du capteur. La consommation d'énergie est très importante pour déterminer la durée de vie d'un nœud capteur, et donc de tout le réseau.
 2. **Sécurité** : la destruction physique accidentelle ou intentionnelle par un ennemi peut être une cause de panne. L'absence de sécurité dans les réseaux de capteurs augmente le risque des pannes de ce type.
 3. **Transmission** : la nature vulnérable de transmission radio, la présence d'obstacles dans les environnements hostiles ainsi que les interférences électriques peuvent être la source d'une panne lors du transfert de données.

2.2.2.3. Pannes selon le comportement résultant [14]

- **Crashes** : Panne qui se manifeste par un arrêt du fonctionnement du composant ou l'incapacité de celui-ci de retourner vers un état valide. Ceci se traduit par le fait que le composant ne fournit plus le service demandé.
- **Omission** : Le composant fournissant le service ne répond sporadiquement plus aux requêtes, ceci peut être par exemple causé par des interférences radio conduisant à une perte occasionnelle de messages. Il peut y avoir un degré d'omission défini qui détermine le nombre d'omissions nécessaires avant que la panne ne soit considérée comme crash et non plus comme omission.
- **Timing** : Le composant ne fournit plus son service dans les temps (résultat en retard ou trop tôt). Ceci se traduit par le fait que le composant fournit une valeur correcte, mais en dehors du délai spécifié par l'application ; ce genre de pannes est à considérer seulement si un délai dans la réception des résultats a déjà été défini dans l'application.
- **Aléatoires ou Byzantines** : Cette panne est de nature arbitraire, elle réfère à une situation dans laquelle un système distribué est confronté à des erreurs et des défaillances qui peuvent rendre difficile la détermination de la vérité. Ce type de pannes est considéré comme étant le plus difficile à gérer.

2.2.3. Sources de pannes dans les RCSFs

Les Réseaux de Communication Sans Fil (RCSF) sont fréquemment déployés dans des environnements hostiles et sont susceptibles de rencontrer diverses pannes à tous les niveaux. La figure 2.1 qui suit illustre une classification par couches des composants des RCSF pouvant être affectés par des pannes, mettant en évidence la notion de propagation de panne des couches inférieures vers les couches supérieures [SVB, MCP]. En effet, une défaillance énergétique d'un nœud peut avoir des répercussions sur la transmission des données passant par ce nœud défaillant, pouvant ainsi entraîner l'isolement complet d'une partie du réseau.

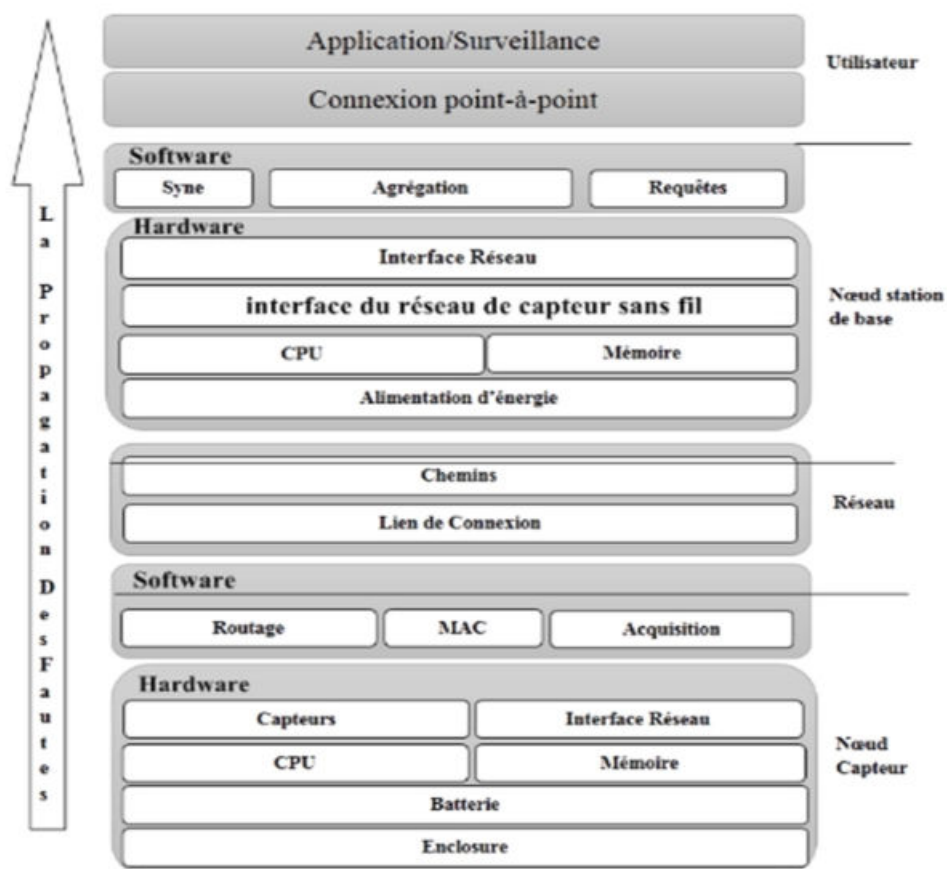


Figure II.4: Classification et propagation de faute

2.2.3.1. *Pannes de nœuds*

Plusieurs parties logicielles et matérielles composant un nœud peuvent produire des pannes pour différentes causes, comme par exemple :

- les impacts physiques qui peuvent endommager la protection extérieure du nœud qui rend du coup les composants internes du nœud vulnérables à l'environnement.

- le contact de liquides (l'eau par exemple) qui produit des courts circuits endommageant les circuits électroniques du nœud.
- le niveau de la batterie du nœud qui atteint un certain seuil (bas) peut conduire les capteurs du nœud en question à produire des résultats erronés.
- Batterie à plat est synonyme d'arrêt total du nœud
- Crash du processeur du nœud
- Bugs logiciels du nœud
- Capture du nœud et/ou corruption de celui-ci

Généralement, une panne matérielle conduit toujours à une panne logicielle, mais celle-ci peut ne pas affecter tous les services du nœud, ce dernier est toujours capable d'acheminer des messages sur le réseau même si l'un ou plusieurs de ces capteurs sont défectueux. Par contre, un ou plusieurs nœuds qui envoient des mesures erronées à la station de base affectent tout le système qui se voit traiter des valeurs ne reflétant absolument pas la réalité[14].

2.2.3.2. Pannes de réseau

Le routage est l'un des plus importants aspects d'un RCSF, essentiel pour collecter les données mesurées, la configuration du réseau et pour la coordination inter-nœuds ; de plus, quelques applications sont orientées routage comme par exemple les applications de poursuite d'objets en mouvement. Une panne au niveau du routage peut donc conduire à une perte de messages et à des temps de réponse inacceptables.

Parmi les causes possibles de pannes de ce type :

- Instabilité des liens de communication
- Mobilité des nœuds qui conduit à leurs isolements.
- Interférences radio susceptibles d'être présentes dans l'environnement du RCSF
- Collisions inter-messages
- Présence de bugs dans la fonction de routage
- Attaques malicieuses contre le RCSF.

Notons qu'il est clair qu'une panne d'un nœud important entrant dans le mécanisme de routage conduira à une panne au niveau du réseau comme le suggère la notion de propagation mentionnée dans la Figure II.4[14].

2.2.3.3. Pannes du Sink

Le Sink est effectivement le nœud central dans un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF), responsable de la collecte et de la transmission des données vers l'utilisateur final. En raison de cette importance cruciale, une panne du Sink peut avoir des conséquences désastreuses sur l'ensemble du réseau et entraîner la perte de toutes les données collectées. Une stratégie de tolérance aux pannes pour le Sink est donc indispensable.[14]

En plus des causes de pannes communes à tous les nœuds, le Sink peut être sujet à des problèmes spécifiques, notamment :

- **Épuisement de l'énergie :**
 - Absence de source d'énergie permanente : Si le Sink est installé dans un environnement sans source d'énergie continue, il risque de s'arrêter lorsque ses batteries sont épuisées.
 - Défaillance du système de rechargement : Les systèmes de recharge, tels que les panneaux solaires, peuvent tomber en panne, empêchant le rechargement des batteries.
- **Isolement dû à l'environnement :**
 - Isolement du Sink : Les conditions environnementales instables, comme les fortes tempêtes, peuvent isoler le Sink, rendant impossible la communication avec l'utilisateur final ou les capteurs du réseau.
 - Défaillance logicielle (Bugs logiciels) : Des erreurs dans le logiciel du Sink, chargé du stockage, du traitement et de l'envoi des données, peuvent entraîner des dysfonctionnements.

2.2.3.4. Panne de communication

Après la collation et la validation des données, les capteurs ou nœuds capteurs utilisent généralement une communication sans fil pour les transmettre à un nœud central ou à un serveur. Cependant, cette communication peut être perturbée par des conditions environnementales défavorables, des interférences dues au partage des ressources du capteur, ou la congestion causée par le partage de la même chaîne de communication avec d'autres capteurs du réseau. Ces problèmes peuvent entraîner des données erronées, des pertes de données, des retards de transmission, voire

l'indisponibilité des sources. Ces facteurs ont un impact significatif sur la qualité de l'analyse des données en temps réel.[3]

2.3. La tolérance aux pannes dans les RCSF

2.3.1. Définition de la tolérance aux pannes

Afin d'assurer la communication entre le nœud collecteur et les autres nœuds d'un réseau de capteurs, les protocoles de routage sont basés sur la communication multi-sauts. Chaque nœud joue alors, en plus du rôle de source de données, le rôle d'un routeur. Toutefois, ces nœuds sont sujets à de nombreuses pannes, dues principalement à l'épuisement des batteries et aux destructions physiques (par exemple, suite à un écrasement par des animaux). Ainsi, la panne de nœuds entraîne la perte des liens de communication et donc un changement significatif dans la topologie globale du réseau. Ceci peut affecter d'une façon considérable la connectivité du réseau et diminuer, en conséquence, sa durée de vie.

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'aptitude du réseau à maintenir ses fonctionnalités, en cas de panne de certains de ses nœuds. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [19].

2.3.2. Procédure générale de tolérance aux pannes

La conception d'une procédure pour la tolérance aux pannes dépend de l'architecture et des fonctionnalités du système. Cependant, certaines étapes générales sont exécutées dans la plupart des systèmes. (cf. figure II.5) [20].



Figure II.5: Procédure générale de tolérance aux pannes.

2.3.2.1. *Détection de la panne*

C'est le premier maillon dans la chaîne de tolérance aux pannes, qui nous permet de reconnaître qu'un événement inattendu est survenu. Les techniques utilisées sont classées en deux catégories en ligne (Online) et hors ligne (Offline). La détection hors ligne est effectuée à l'aide de programmes de diagnostic qui s'exécutent lorsque le système est inactif. Tandis que, la détection en ligne, permet d'identifier les défaillances en temps réel et est effectuée en pleine activité du système.

2.3.2.2. *Détention de la panne*

Cette phase établit des limites des effets de la panne sur une zone particulière afin d'empêcher la contamination des autres régions. En cas de détection d'intrusion, par exemple, l'isolation des composants compromis minimise le risque d'attaque des composants encore fonctionnels.

2.3.2.3. *Recouvrement de la panne*

Durant cette phase, les opérations d'élimination des défauts sont effectuées. Deux techniques principales sont utilisées. Dans la récupération arrière (Backward recovery), l'état du système est restauré à un état antérieur sans erreur à l'aide des sauvegardes périodiques. En revanche, dans la récupération anticipée (Forward recovery), aucun état antérieur du système n'est disponible. Le but est d'aller en avant et atteindre un état cohérent exempté d'erreurs avec une connaissance au préalable de la nature exacte de la panne.

2.3.2.4. *Traitement de panne*

Cette phase est responsable de l'isolation du composant défaillant. La procédure de réparation dépend du type de panne et de la nature du déploiement. Les défaillances permanentes nécessitent le remplacement du composant par un autre fonctionnel, ce qui n'est pas réalisable dans la plupart des situations où les capteurs défectueux sont inaccessibles [5].

2.3.3. Exemple d'un RCSF tolérant aux pannes

Le problème de fusion dans un réseau de capteurs multimodal tolérant aux pannes utilisant des capteurs numériques binaires peut être modélisé par l'exemple illustré dans la Figure II.6.

On considère un réseau de capteurs pour la reconnaissance de personnes déployé dans une société pour identifier ses employés. Six personnes nommées A, B, C, D, E et F travaillent dans cette société [14]. Le système de reconnaissance utilise deux types différents de capteurs :

1. capteur de taille (grandeur) ;
2. capteur pour la reconnaissance vocale qui demande à chaque entrant d'introduire une phrase secrète donnée à l'aide d'un microphone.

La figure ci-dessous montre les six personnes ainsi que leurs caractéristiques (taille et voix) représentées dans le graphe.

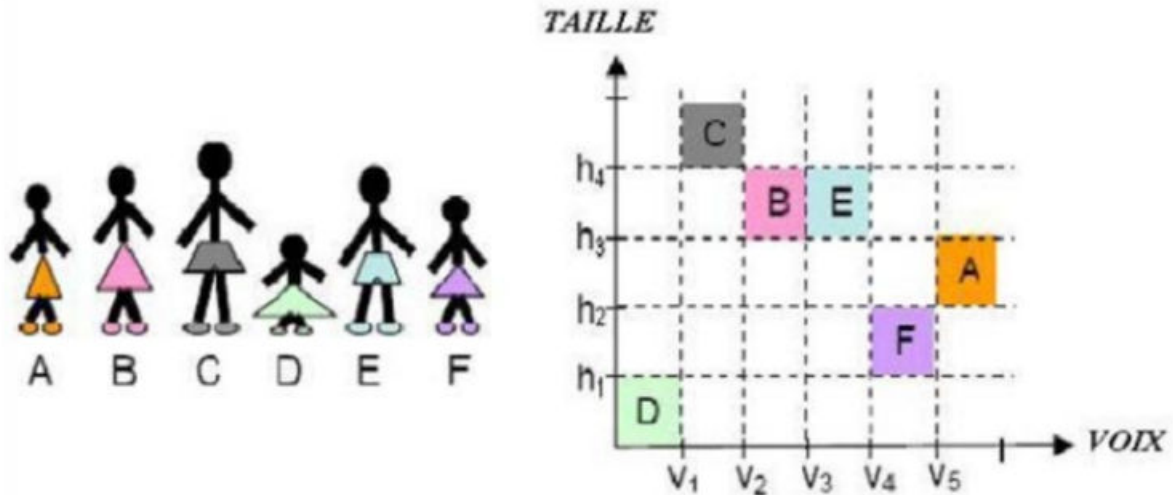


Figure II.6: Réseau de capteur multimodal

Dans un système de reconnaissance utilisant des capteurs pour distinguer entre différentes personnes, il est possible de remarquer que chaque individu (P1 et P2) peut généralement être identifié si leurs données sont représentées sur des surfaces distinctes dans un graphe. Même en cas de défaillance d'un capteur, le système peut toujours reconnaître les personnes grâce à une tolérance aux pannes hétérogène, où un capteur défaillant peut être compensé par un autre type de capteur.

Cependant, une exception se présente avec les personnes B et E, qui ont la même taille et sont distinguées uniquement par leur voix. Dans ce cas, le capteur V_3 , responsable de la reconnaissance vocale, est crucial pour différencier B et E. Si l'une des deux personnes, B ou E, est exclue du système, cela rend le système complètement tolérant aux pannes car il n'a plus besoin de distinguer entre ces deux individus.

Pour garantir la fiabilité d'un système après la défaillance d'un nombre spécifique de capteurs d'une modalité donnée, il est impératif de réaliser une modélisation précise d'un système complexe intégré à un réseau de capteurs. Cette modélisation doit être conçue de manière à offrir une tolérance aux pannes hétérogènes. En d'autres termes, le système doit être capable de maintenir sa fonctionnalité même en cas de défaillance de plusieurs capteurs, en remplaçant efficacement les capteurs défaillants par d'autres de types différents mais compatibles. Cette approche permet de garantir la continuité des opérations du système malgré les pannes, assurant ainsi sa robustesse et sa fiabilité dans des environnements complexes et dynamiques.[19]

2.3.4. Les techniques de gestion des pannes

2.3.4.1. *La détection des pannes*

Il s'agit de la première étape par laquelle le système du RCSF doit passer dans toute gestion de panne. Celle-ci doit être parfaitement identifiée afin de prendre les contre-mesures nécessaires. Il existe deux types d'approches de détection de pannes dans les RCSF [14]:

- **Approche centralisée**

Il s'agit d'une solution courante pour identifier et localiser la cause des pannes ou les nœuds suspects dans un RCSF. Un nœud centralisé (d'un point de vue logique ou géographique) est habituellement responsable de la surveillance et l'identification des dysfonctionnements et des pannes pouvant affecter les nœuds du RCSF. La plupart de ces approches suppose que le nœud central possède des ressources illimitées (comme l'énergie) et qu'il est capable d'assurer l'exécution d'une grande partie des procédures de gestion des pannes, mais aussi, que la durée de vie du RCSF peut être significativement améliorée si les tâches complexes du réseau et les transmissions de messages sont confiées au nœud central.

Le nœud central adopte généralement un modèle de détection active pour obtenir l'état des performances du réseau et l'état des nœuds capteurs, ce modèle consiste à injecter périodiquement des requêtes dans le réseau et analyser les résultats de celles-ci afin de détecter et de localiser d'éventuelles pannes ou dysfonctionnement des nœuds du RCSF. L'approche centralisée est relativement précise et efficace pour identifier les pannes dans les RCSFs, mais présente toutefois des inconvénients dus au fait que ce genre de réseaux peut avoir de sérieuses contraintes de ressources, qui ne permettent pas toujours un prélèvement périodique des données mesurées par les capteurs et de leurs états d'une façon centralisée. Un autre inconvénient est le très grand trafic de données générées par ce type d'approche au niveau du nœud central qui représente un point unique de circulation étant donné qu'il est responsable de toutes les opérations de gestion des pannes, ce qui peut conduire à l'épuisement rapide de l'énergie dans certaines régions du réseau. Cette approche s'avère donc peu efficace et très coûteuse dès qu'il s'agit d'un RCSF dense.

- **Approche distribuée**

Cette approche privilégie la prise de décision locale au niveau de chaque nœud qui permet la distribution de la gestion des pannes sur tout le RCSF ; le nœud communique avec le nœud central seulement dans le cas de panne avérée, il en résulte alors moins de trafic dans le réseau.

2.3.4.2. Diagnostic de panne

Cette étape permet d'identifier correctement les causes de la panne et de faire une distinction entre les vraies pannes et les fausses alertes de pannes. Il s'agit donc de déterminer la précision et l'exactitude de la détection afin de prendre éventuellement les mesures adéquates.

2.3.4.3. Recouvrement de panne

Il s'agit de la phase où le RCSF est restructuré et reconfiguré afin de limiter et de contenir les effets de la panne pour que celle-ci n'affecte pas les performances du réseau. La plupart des approches consistent à isoler les nœuds défaillant directement au niveau du routage, comme par exemple, sélectionner un nouveau voisin pour router les paquets si le nœud détecte que l'ancien voisin par qui les données transitaient est silencieux, ce genre de solution vient du fait de la redondance des nœuds dans le RCSF et peut être donc vue comme un mécanisme de réplication. Il existe deux types d'approches de recouvrement de pannes basées sur la réplication (redondance) pour les RCSF :

- **Redondance active :**

Toutes les requêtes du RCSF sont traitées par tous les composants redondants, un exemple naturel est la présence de plusieurs nœuds identiques dans le réseau ce qui permet d'obtenir les mesures d'un phénomène malgré la panne d'un ou plusieurs nœuds. Parmi les approches possible afin d'obtenir ce genre de redondance, on trouve le routage multi-routes qui permet d'avoir plusieurs routes possibles pour acheminer un message.

- **Redondance passive :**

Seule le composant original traite les requêtes, il faut maintenir donc une certaine cohérence entre les composants de secours et celui-ci en transférant l'état et les informations sur les requêtes du composant original vers les composants de secours d'une façon périodique ; ceci en tenant compte des contraintes strictes sur les ressources des RCSF. Il faut de ce fait minimiser l'impact de cet échange d'informations sur la performance du réseau en réduisant, voire en éliminant, la taille des informations sur l'état du composant. Un recouvrement de panne dans un système de redondance passive dans un RCSF passe par trois étapes :

- Détection de panne
- Sélection du composant (nœud) relais
- Distribution du service

La première étape a été vue précédemment, vient donc la deuxième étape dans laquelle une panne du nœud original est avérée ; il faut procéder dans ce cas à la sélection du nœud qui va prendre le relais. Il existe différentes approches de sélection :

- **Auto-sélection** : chaque nœud exécute un algorithme qui lui permet de déterminer son rôle, les nœuds du RCSF vont donc constamment changer de rôle.
- **Groupe-sélection** : la sélection du nœud de secours se fait par un consensus entre un groupe de nœud.
- **Sélection hiérarchique** : la sélection du nœud de secours se fait par un coordinateur qui possède souvent une vue globale du réseau ou de la partie concernée du réseau.

Après avoir sélectionné le nœud de secours qui prendra le relais, celui-ci doit commencer à fournir le service en question, ceci peut être obtenu par une simple activation quand le service est déjà disponible sur le nœud, mais dans le cas où le service est indisponible sur le nœud faute de capacité de stockage, d'autres techniques sont sollicitées :

- **Pré-copie** : le code de tous les services est disponible au niveau de chaque nœud avant le déploiement, ce qui permet à chaque nœud de changer de comportement en fonction de son rôle dans le RCSF.
- **Distribution du code** : il s'agit d'une distribution (migration ou envoi) du code à travers le RCSF, utilisant des agents mobiles par exemple.
- **Exécution distante** : vise à réduire le trafic généré par l'approche précédente, elle consiste en l'envoi des paramètres nécessaires à l'exécution vers le nœud qui possède le code, et à recevoir le résultat de cette exécution en retour.

Une approche dite hybride entre les deux dernières techniques consiste à copier le code d'un nœud dont le niveau d'énergie de la batterie atteint un seuil défini vers un autre nœud.

2.3.5. Classification des solutions de tolérance aux pannes

Les solutions et les approches de tolérance aux pannes peuvent être vues de plusieurs angles différents. De ce fait, un ensemble de critères est défini pour les classer. Des catégories de trois classifications distinctes peuvent être citées (cf.Figure II.7).

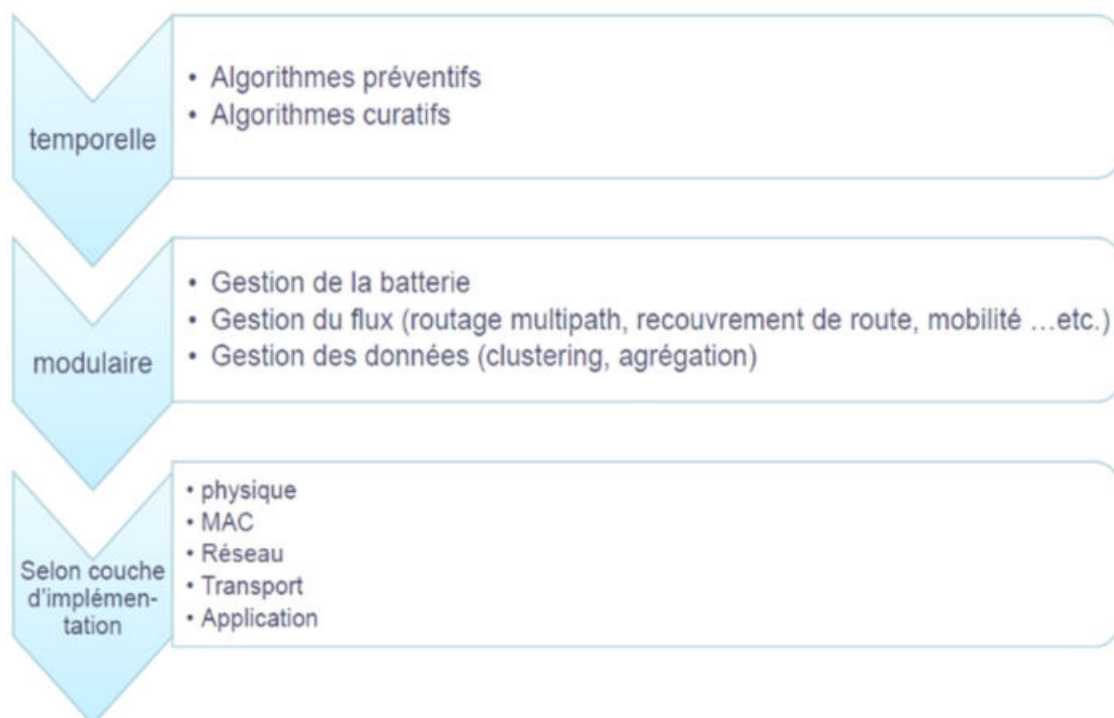


Figure II.7: Classification des solutions de tolérance aux pannes

2.3.5.1. *Classification temporelle*

Dans la classification temporelle, nous divisons l'ensemble des algorithmes en deux catégories, et cela selon la phase de traitement. Si le traitement est effectué avant la panne, on parle donc d'algorithmes préventifs sinon les algorithmes sont dits curatives[34].

- **Algorithme préventif** : implémente des techniques tolérantes aux pannes qui tentent de retarder ou éviter tout type d'erreur afin de garder le réseau fonctionnel le plus longtemps possible. La conservation d'énergie à titre d'exemple, permet de consommer moins d'énergie et évite donc une extinction prématurée de la batterie ce qui augmente la durée de vie des nœuds.
- **Algorithme curatif** : utilise une approche optimiste, où le mécanisme de tolérance aux pannes implémenté n'est exécuté qu'après la détection de pannes. Pour cela, plusieurs algorithmes de recouvrement après l'occurrence des pannes sont proposés dans la littérature, par exemple: le recouvrement du chemin de routage, l'élection d'un nouvel agrégateur, etc.

2.3.5.2. *Classification architecturale*

Cette classification traite les différents types de gestion des composants, soit au niveau du capteur individuellement ou bien sur tout le réseau. Nous distinguons trois catégories principales [15]:

- **Gestion de la batterie** : Cette catégorie est considérée comme une approche préventive, où les protocoles définissent une distribution uniforme pour la dissipation d'énergie entre les différents nœuds capteurs ; afin de mieux gérer la consommation d'énergie et augmenter ainsi la durée de vie de tout le réseau. En outre, le mécanisme de mise en veille est une technique de gestion de batterie. En effet, les protocoles déterminent des délais de mise en veille des nœuds capteurs inactifs pour une meilleure conservation d'énergie [8].
- **Gestion de flux** : Cette catégorie regroupe les techniques qui définissent des protocoles de gestion de transfert des données (routage, sélection de canal de transmission, etc.). Nous pouvons trouver des approches préventives ou curatives sur les différentes couches (réseau, liaison de données, etc.) telles que[34] :
 - **Routage multipath** : utilise un algorithme préventif pour déterminer plusieurs chemins depuis chaque capteur vers le nœud collecteur. Ceci garantit la présence de plus d'un chemin fiable pour la transmission et offre une reprise rapide du transfert en cas de panne sur le chemin principal et choisissant un des chemins qui restent.
 - **Recouvrement de routes**: après la détection de panne, une technique curative permet de créer un nouveau chemin qui soit le plus fiable pour retransmettre les données.
 - **Allocation de canal**: cette solution est implémentée au niveau de la couche MAC. Elle permet d'effectuer une allocation du canal de transmission d'une manière à diminuer les interférences entre les nœuds voisins et éviter les collisions durant le transfert.
 - **Mobilité**: certains protocoles proposent comme solution tolérante aux pannes la sélection d'un ensemble de nœuds mobiles chargés de se déplacer entre les capteurs et collecter les données captées. Ceci réduira l'énergie consommée au niveau de chaque capteur en éliminant sa tâche de transmission. Un nœud mobile est généralement doté d'une batterie plus importante que celle d'un nœud capteur.

- **Gestion des données** : Les protocoles classés dans cette catégorie offrent une meilleure gestion de données et de leur traitement. Deux principales sous-catégories sont déterminées[34]:
 - **Agrégation**: cette approche est considérée comme une approche préventive. Elle permet d'effectuer un traitement supplémentaire sur les données brutes captées depuis l'environnement. Un nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs nœuds en une information significative. Ce qui réduit considérablement la quantité de données transmises en consommant moins d'énergie pour leur dissémination. Ceci permet donc d'augmenter la durée de vie du réseau. En outre, elle aussi d'amortir l'erreur si le résultat de l'agrégation est une moyenne.
 - **Clustering** : une des importantes approches pour traiter la structure d'un réseau de capteurs est le clustering. Il permet la formation d'un backbone virtuel qui améliore l'utilisation des ressources rares telles que la bande passante et l'énergie. Par ailleurs, le clustering aide à réaliser du multiplexage entre différents clusters. En outre, il améliore les performances des algorithmes de routage. Plusieurs protocoles utilisent cette approche préventive et parfois elle est considérée comme une approche curative.

2.4. Conclusion

La tolérance aux pannes dans un réseau de capteurs se caractérise par sa capacité à maintenir un fonctionnement optimal malgré la présence de défaillances potentielles. Ces défaillances peuvent résulter de divers facteurs tels que le manque d'énergie, les dommages physiques ou les interférences environnementales. La défaillance de certains nœuds peut perturber les liaisons de communication, altérant ainsi la topologie du réseau de manière significative.

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail les concepts de panne et de tolérance aux pannes, ainsi que les différentes approches de gestion des pannes dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Nous avons classé ces approches en trois phases essentielles : la détection, le diagnostic et le rétablissement des pannes. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les indicateurs globaux de connectivité, qui relèvent de la théorie des graphes et seront utilisés comme indices dans la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 3

Indicateurs globaux de connectivité

3.1. Introduction

La théorie des graphes, autrefois une discipline marginale en mathématiques, s'est révélée être une méthode efficace pour résoudre des problèmes de recherche opérationnelle. Sa capacité à représenter de manière synthétique les relations complexes entre les entités grâce à la topologie des graphes constitue un facteur clé de son succès. C'est pourquoi elle connaît un développement croissant dans divers domaines tels que les sciences sociales, la physique et la biologie, mais surtout en informatique, où elle est utilisée pour optimiser les réseaux, analyser les données et modéliser les systèmes complexes.

3.2. Théorie des graphes

La théorie des graphes consiste à étudier les graphes. Autrement dit, des représentations visuelles permettant de relier des objets entre eux. D'un point de vue mathématique, le graphique G correspond à un couple de sommets V (également appelé de nœuds ou de points) et d'arêtes E (également appelées lignes ou liens). Ces arêtes permettent alors de relier plusieurs sommets entre eux et les sommets reliés par une arête sont qualifiés de voisins ou adjacents.

Voici la traduction mathématique de ces graphes : $G = (V, E)$

La théorie des graphes étant une sous discipline des mathématiques, elle regroupe un ensemble de théorèmes et d'algorithmes visant à résoudre divers problèmes liés aux réseaux. Mais avant de voir quelques-unes de ces applications théoriques, il convient de bien comprendre les graphes [24].

3.2.1. Un graphe

- Un graphe est une représentation graphique d'un ensemble de sommets reliés par des arêtes.
- Une arête est un lien entre deux éléments distincts.
- Un sommet ou nœud est un élément relié par des arêtes. Le degré d'un sommet est le nombre de sommets auquel il est relié [25].

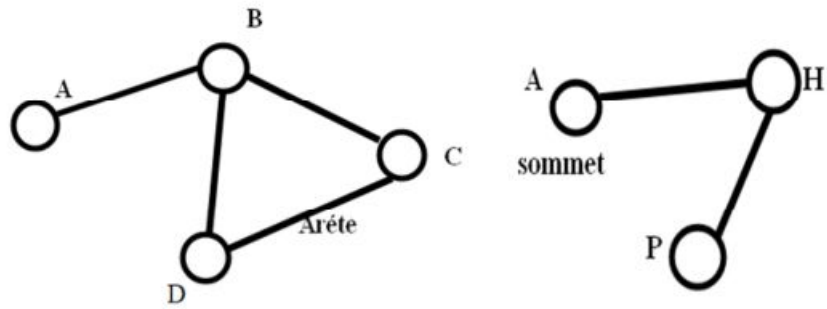


Figure III.1: Graphe, Arête, Sommet

3.2.2. Les types de graphes

- **Graphe connexe** : Un graphe connexe est un graphe dans lequel il existe un chemin reliant chaque paire de nœuds.
- **Graphe non connexe** : Un graphe non connexe est un graphe dans lequel il existe un nœud isolé [21].

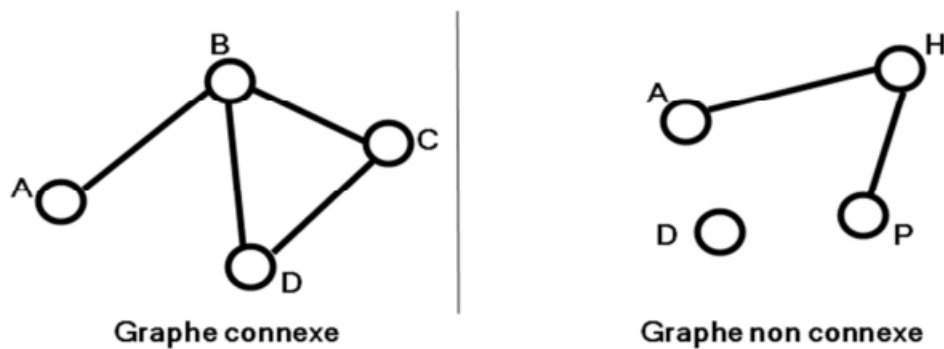


Figure III.2: Graphe connexe et non connexe

- **Graphe orienté (ou graphe dirigé)** : Dans ce type de graphe, chaque arête a une direction associée. Cela signifie que la relation entre deux nœuds est unidirectionnelle.

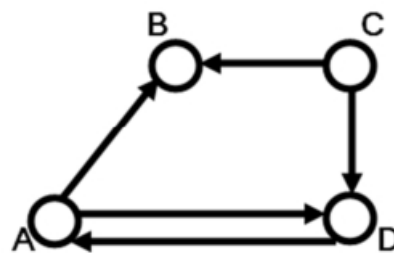


Figure III.3: Graphe orienté

Sur ce graphe, on peut passer de A à B mais pas de B à A. Ainsi l'arête (A;B) existe mais pas l'arête (B;A) : dans le cas d'un graphe orienté on peut alors parler d'arc, en mettant d'abord le sommet de départ [27].

- **Graphe non orienté** : Contrairement aux graphes orientés, les arêtes dans un graphe non orienté n'ont pas de direction. Les relations entre les nœuds sont bidirectionnelles[27]

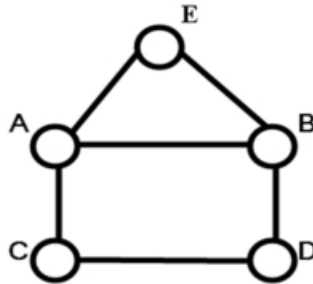


Figure III.4: Graphe non orienté

- **Graphe complet** : Un graphe est alors dit **complet** si tous les sommets sont adjacents, c'est-à-dire que tous les sommets sont reliés deux à deux entre eux. (alloprof) Sur l'exemple ci-dessous, le graphe de droite n'est pas complet car il n'y a aucune arête entre B et C[27] :

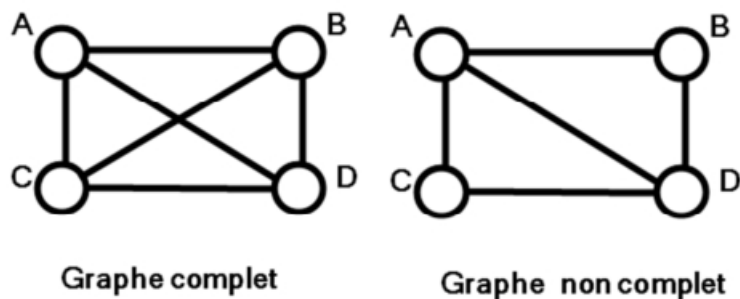


Figure III.5: Graphe non orienté

- **Un graphe pondéré** est un graphe (en général orienté) dans lequel les arcs portent une information numérique appelée le poids de l'arc[27].

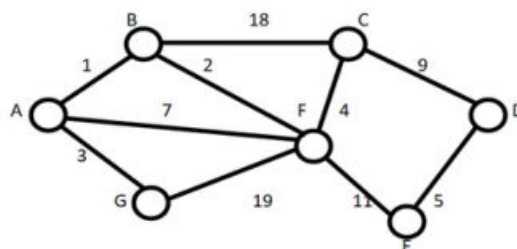


Figure III.6: Graphe value

3.3. Utilité des graphes

La théorie des graphes a donné naissance à une multitude de théorèmes et d'algorithmes. Chacun d'entre eux a pour objectif de résoudre un problème pratique [30]. Et pour cause, les graphes se retrouvent au sein de nombreuses applications quotidiennes. Voici les plus courantes :

- **Les réseaux routiers** : les villes sont alors considérées comme des sommets, et les routes comme des arêtes ou des arcs.
- **Le web** : les pages sont considérées comme les sommets, et les liens hypertextes sont les arêtes.
- **Les réseaux sociaux** : les individus sont les sommets, et leurs connexions sont les arêtes.
- **Les bases de données relationnelles** : les relations correspondent aux sommets alors que les dépendances correspondent aux arêtes. Dans ce cas, il s'agit d'un graphe orienté.
- **la programmation informatique** : les instructions de code à exécuter ou les données sont les sommets. Quant aux arêtes, il s'agit des relations de dépendance temporelle (l'ordre dans lequel les instructions ou les données s'exécutent).

Il ne s'agit que de quelques exemples concrets qui ont permis le développement et l'enrichissement de la théorie des graphes.

3.4. Outils généraux de description des graphes

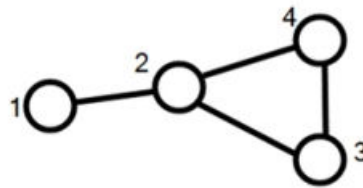
3.4.1. Indicateurs locaux de position

Dans la théorie des graphes et l'analyse des réseaux, les indicateurs locaux attribuent des numéros ou des classements aux nœuds d'un graphique correspondant à leur position sur le réseau. Les applications incluent l'identification des personnes les plus influentes dans un réseau social, des nœuds d'infrastructure clés sur Internet ou dans les réseaux urbains, des super-propagateurs de maladies et des réseaux cérébraux. Les concepts des indicateurs locaux ont été développés pour la première fois dans l'analyse des réseaux sociaux, et de nombreux termes utilisés pour mesurer la centralité reflètent leur origine sociologique.

Les indicateurs locaux de position permettent de mesurer le degré de centralité ou d'accessibilité des différents sommets à l'intérieur d'un graphe.

Les avantages relatifs des différents sommets peuvent varier selon le critère retenu.

Exemple :



- **La centralité de degré (CD)** : est l'un des indicateurs locaux les plus simples utilisés pour évaluer l'importance d'un sommet dans un graphe. Elle mesure simplement le nombre de liens directs qu'un sommet a avec d'autres sommets dans le réseau. En d'autres termes, la centralité de degré d'un sommet est égale à son degré, c'est-à-dire le nombre d'arêtes incidentes sur ce sommet.

Le calcul de la centralité de degré pour un sommet dans un graphe est direct et ne nécessite pas de calculs complexes. Voici comment la centralité de degré (CD) est calculée pour un sommet v dans un graphe G :

Compter le nombre d'arêtes incidentes au sommet v .

Ce nombre est la centralité de degré du sommet v .

En formule, la centralité de degré $CD(v)$ pour un sommet v est simplement égale à son degré $k(v)$, où $k(v)$ est le nombre d'arêtes incidentes à v dans le graphe.

$$CD(v)=k(v)$$

Sommet	1	2	3	4
$CD(v)$	1	3	2	2

Tableau III.1: Centralité de degré

- **La centralité d'éloignement moyen (CE)** : mesure la distance moyenne entre un sommet donné et tous les autres sommets du réseau. Plus précisément, elle évalue la proximité globale d'un sommet par rapport à l'ensemble des autres sommets dans le graphe.

Voici comment calculer la centralité d'éloignement moyen pour un sommet dans un graphe :

1. Calculer tous les chemins les plus courts entre le sommet donné et tous les autres sommets du graphe en utilisant un algorithme comme *Dijkstra* ou *Floyd-Warshall*.

2. Pour chaque sommet autre que le sommet donné, calculer la distance entre ce sommet et le sommet donné en utilisant les chemins les plus courts.
3. Calculer la moyenne de ces distances pour obtenir la centralité d'éloignement moyen pour le sommet donné.

En formule, la centralité d'éloignement moyen (CE) pour un sommet v est calculée comme suit :

$$CE(v) = \frac{\sum_{u \neq v} d(u,v)}{n-1}$$

Où :

$CE(v)$ est la centralité d'éloignement moyen du sommet v ,

$d(u,v)$ représente la distance entre le sommet u et le sommet v ,

n est le nombre total de sommets dans le graphe.

D_{ij}	1	2	3	4	Total
1	-	1	2	2	5
2	1	-	1	1	3
3	2	1	-	1	4
4	2	1	1	-	4
CE(v)	1.7	1	1.33	1.33	-

Tableau III.2: Centralité d'éloignement moyen

- **La centralité d'éloignement maximal (CM) :** évalue la distance maximale entre un sommet donné et tous les autres sommets du graphe. Elle mesure la capacité d'un sommet à agir comme un pont ou un point de contrôle entre différentes parties du réseau.

Voici comment calculer la centralité d'éloignement maximal pour un sommet dans un graphe :

1. Utiliser un algorithme comme *Dijkstra* ou *Floyd-Warshall* pour calculer tous les chemins les plus courts entre le sommet donné et tous les autres sommets du graphe.
2. Pour chaque sommet autre que le sommet donné, trouver la distance maximale entre ce sommet et le sommet donné en utilisant les chemins les plus courts.

3. La plus grande de ces distances est la centralité d'éloignement maximal pour le sommet donné.

En formule, la centralité d'éloignement maximal (CM) pour un sommet v est :

$$CM(v) = \max_{u \neq v} d(u, v)$$

- $CM(v)$ est la centralité d'éloignement maximal du sommet v ,
- $d(u,v)$ représente la distance entre le sommet u et le sommet v .

Sommet	1	2	3	4
$CM(v)$	2	1	2	2

Tableau III.3: Centralité d'éloignement maximal

- **La centralité d'intermédiarité (CI)** : également connue sous le nom de "betweenness centrality" en anglais, évalue dans quelle mesure un sommet agit comme un pont entre d'autres sommets dans le réseau. Elle mesure le nombre de chemins les plus courts passant par un sommet donné.

En formule, la centralité d'intermédiarité (CI) pour un sommet v est :

$$CI(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

- $CI(v)$ est la centralité d'intermédiarité du sommet v ,
- σ_{st} est le nombre total de chemins les plus courts entre les sommets s et t ,
- $\sigma_{st}(v)$ est le nombre de ces chemins qui passent par le sommet v . [35]

Sommet	1	2	3	4
$CI(v)$	0	4	0	0

Tableau III.4: Centralité d'intermédiarité

3.4.2. Indicateurs globaux de position

3.4.2.1. Indicateurs globaux de connectivité

La connectivité désigne, dans la théorie des graphes, la capacité d'un réseau d'assurer la mise en relation des nœuds par les arêtes d'un réseau. Elle indique s'il est possible, à partir de n'importe quel nœud, de rejoindre les autres. Un réseau est dit connexe s'il permet de relier l'ensemble des nœuds à partir de l'un d'entre eux. Un réseau est connexe ou ne l'est pas : c'est une propriété binaire. Par opposition aux relations de simple proximité (dites en continuité ou en contiguïté), les relations de connectivité sont celles qui utilisent le support d'un réseau pour joindre deux lieux qui peuvent être très éloignés. Le rôle des nœuds est essentiel dans la connectivité du réseau. Un réseau connexe solidarise un système territorial.

Indice de connectivité simple : IC1 est une mesure qui évalue la connectivité globale d'un graphe en prenant en compte le nombre de composantes connexes (C) ainsi que le nombre total de sommets (S) dans le graphe. Cet indice fournit une mesure de la proportion de sommets qui sont connectés entre eux dans le graphe.

La formule pour calculer IC1 est :

$$IC1 = \frac{S-C}{S-1}$$

- IC1 est l'indice de connectivité simple,
- S est le nombre total de sommets dans le graphe,
- C est le nombre de composantes connexes dans le graphe.

Cet indice varie entre 0 et 1. Plus l'indice est proche de 1, plus le graphe est fortement connecté. Un indice de 0 signifie que le graphe est complètement fragmenté en plusieurs composantes connexes distinctes, tandis qu'un indice de 1 indique un graphe totalement connecté, sans composantes connexes.

L'indice de connectivité simple IC1 est utile pour évaluer la connectivité globale d'un graphe et pour comparer la connectivité relative de différents graphes. Il permet de quantifier la proportion de sommets qui sont connectés entre eux dans le graphe, ce qui est important pour comprendre la structure de connexion d'un réseau.

Indice de connectivité pondéré : IC2 est une mesure qui évalue la connectivité globale d'un graphe en prenant en compte non seulement le nombre de composantes connexes (C), mais aussi la

distribution des sommets à l'intérieur de ces composantes. Contrairement à l'indice de connexité simple, l'indice de connexité pondéré attribue plus de poids aux composantes connexes contenant un grand nombre de sommets.

La formule pour calculer $IC2$ est :

$$IC2 = \frac{(S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_k)^2}{S^2}$$

- $IC2$ est l'indice de connexité pondéré,
- S_1, S_2, \dots, S_k sont le nombre de sommets dans chacune des k composantes connexes du graphe,
- S est le nombre total de sommets dans le graphe.

Cet indice varie entre 0 et 1. Plus l'indice est proche de 1, plus le graphe est fortement connecté. Un indice de 0 signifie que le graphe est complètement fragmenté en plusieurs composantes connexes distinctes, tandis qu'un indice de 1 indique un graphe totalement connecté, sans composantes connexes.

L'indice de connexité pondéré $IC2$ est utile pour prendre en compte la taille des composantes connexes lors de l'évaluation de la connectivité globale d'un graphe. Il fournit une mesure plus fine de la connectivité en prenant en considération la répartition des sommets dans les composantes connexes.[35]

Exemple d'application :

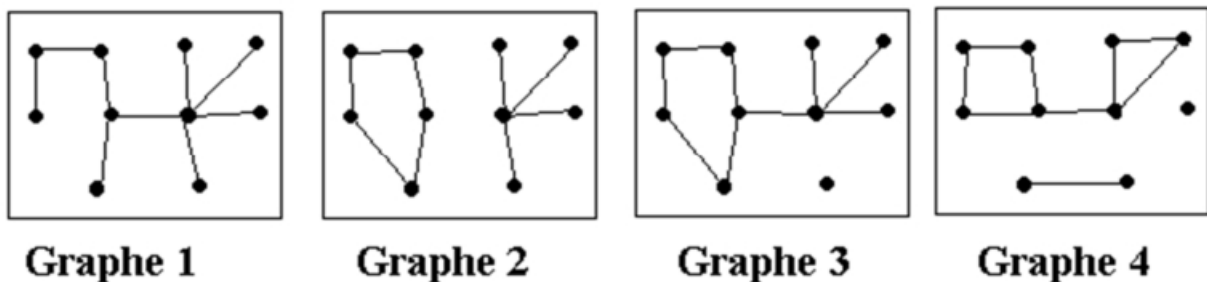


Figure III.7: Graphes d'application

Calcul des indices de connexité :

Situation	Indice de connexité simple	Indice de connexité pondéré
Graphe 1	$9/9=100\%$	$100/100=100\%$
Graphe 2	$8/9=89\%$	$(25+25)/100=50\%$
Graphe 3	$8/9=89\%$	$(81+1)/100=81\%$
Graphe 4	$7/9=78\%$	$(49+4+1)/100=54\%$

Tableau III.5: Indices de connexité

3.4.3. Indicateurs globaux de connectivité

Les indicateurs globaux de connectivité mesurent la densité et la diversité des relations potentielles, directes ou indirectes, entre les sommets d'un graphe. Ils permettent de distinguer les différences entre des graphes connectés (qui ont tous des indices de connectivité égaux à 100%). Leur calcul repose sur le nombre de sommets (S), le nombre de liens (L), et le nombre de composantes connexes (C) d'un graphe.

3.4.3.1. Indicateurs de connectivité basée sur la fréquence des liens

- **L'indice de connectivité (β)** : exprime le rapport entre le nombre de liens et le nombre de sommets. Une valeur supérieure ou égale à 1 indique la présence de circuits à l'intérieur du graphe. $\beta=L/S$
- **L'indice de connectivité (γ)** : est une version standardisée de l'indice précédent, avec une valeur comprise entre 0 et 1. Il exprime le rapport entre le nombre de liens observé et le nombre maximal de liens possibles. $\gamma=L/\max L$

3.4.3.2. Indicateurs de connectivité basée sur le nombre de circuits indépendants

- **Le nombre cyclomatique (μ)** : exprime le nombre maximal de circuits indépendants que l'on peut construire simultanément à l'intérieur d'un graphe. $\mu=L-S+C$
- **L'indice de connectivité (α)** : est une version standardisée de l'indice précédent, avec une valeur comprise entre 0 et 1. Il exprime le rapport entre le nombre observé de circuits indépendants et sa valeur maximale. $\alpha=\mu/\max\mu$

Exemple d'application :

Supposons que nous ayons un graphe avec 10 sommets, 15 liens, et 3 composantes connexes. Calculons les indicateurs de connectivité pour ce graphe.

$$\beta = 15/10 = 1.5$$

$$\gamma = 15 / (10 \times 9 / 2) = 15 / 45 = 0.33$$

$$\mu = 15 - 10 + 3 = 8$$

$$\alpha = 8 / 8 = 1$$

Cet exemple illustre comment calculer ces indicateurs pour évaluer la connectivité d'un graphe donné.

3.5. Conclusion

L'étude des graphes, par le biais de leurs sommets et arêtes, permet de représenter et d'examiner des réseaux de relations entre entités. Différents types de graphes, tels que les graphes connexes, orientés, et pondérés, offrent des perspectives adaptées à divers problèmes pratiques.

La théorie des graphes fournit une multitude d'outils et d'indicateurs pour analyser la structure et la connectivité des réseaux. Les indicateurs locaux de position, tels que la centralité de degré, d'éloignement, et d'intermédiarité, permettent de mesurer l'importance relative des nœuds dans un réseau. Par ailleurs, les indicateurs globaux de connexité et de connectivité aident à évaluer la densité et la robustesse des réseaux.

Dans le chapitre suivant, nous allons simuler divers scénarios de fonctionnement et de dysfonctionnement des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces simulations nous permettront d'explorer comment les indicateurs globaux de position peuvent être utilisés comme indices pour mettre en place des actions correctrices dans le cadre de la tolérance de panne. En examinant des situations allant de l'opération normale au dysfonctionnement et l'activation d'un nœud mobile, nous démontrerons l'importance de ces indicateurs pour maintenir la fiabilité et la robustesse des réseaux, assurant une performance optimale même en présence de défaillances.

Chapitre 4

Simulations et discussion des résultats

4.1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont des systèmes composés de nombreux capteurs interconnectés, susceptibles de subir des pannes causées par des défaillances matérielles, des erreurs logicielles ou des facteurs environnementaux. Les simulations de RCSF sont essentielles pour évaluer l'impact de ces pannes et développer des stratégies de récupération afin de maintenir une connectivité optimale. Dans ce chapitre, nous allons simuler divers scénarios de fonctionnement, incluant les états fonctionnels normaux et les défaillances du réseau, afin de tolérer les pannes. Nous analyserons divers indicateurs globaux de position pour comprendre et améliorer la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sans fil.

4.2. Environnement de simulation

Avant d'entamer les simulations, nous allons décrire les outils matériels et logiciels utilisés pour cette étude.

4.2.1. Outils Matériels

- **Laptop:** Toshiba
- **Processeur:** Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30 GHz 2.40 GHz
- **RAM:** 8.00 Go
- **System d'exploitation:** Windows 10

4.2.2. Outils Logiciels

Nous avons employé une machine virtuelle appelée VMware et le système d'exploitation instant Contiki 2.7 pour notre simulation, qui inclut le simulateur réseau Cooja qui permet l'émulation de différents capteurs sur lesquels seront chargés un système d'exploitation et des applications. COOJA permet ensuite de simuler les connexions réseaux et d'interagir avec les capteurs et pour exécuter cette machine nous avons utilisé le lecteur de machines virtuelles VMware Workstation 17 Player.

- **VMware Workstation :** est un outil de virtualisation de poste de travail créé par la société VMware, il peut être utilisé pour mettre en place un environnement de test pour développer de nouveaux logiciels, ou pour tester l'architecture complexe d'un système d'exploitation avant de l'installer réellement sur une machine physique.
- **Cooja network simulator sous Contiki :** cooja est un simulateur/emulateur de réseau de capteurs appelé motes pour Contiki.

- **Le protocole de routage RPL** : le protocole Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks est un protocole de routage proactif à vecteur de distance qui construit un DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Le DODAG construit permet à chaque nœud du DODAG de transmettre les données qu'il a récolté jusqu'au nœud racine. Chaque nœud dans le DODAG sélectionne un parent selon une métrique de routage donnée et une fonction objective. Les données récoltées sont acheminées d'enfant à parent jusqu'à la racine.

4.3. Système d'exploitation CONTIKI

Contiki OS est un système d'exploitation développé par Dunkel et al. Contiki OS, qui est basé sur le langage de programmation C et open source, a été développé pour les réseaux de capteurs sans fil légers, flexibles et à faible consommation d'énergie. Les environnements de travail des réseaux de capteurs sans fil sont souvent limités en énergie, comme mentionné précédemment. C'est l'une des contraintes les plus importantes pour les réseaux de capteurs sans fil. De même, les conceptions petites et simples des nœuds sont les autres contraintes. Pour cette raison, les réseaux de capteurs sans fil doivent disposer de certaines caractéristiques matérielles et logicielles importantes pour faire face à ces contraintes. Contiki OS est l'une des solutions pratiques pour faire face aux contraintes mentionnées grâce à sa flexibilité et à son support des réseaux légers et à faible consommation d'énergie [18].

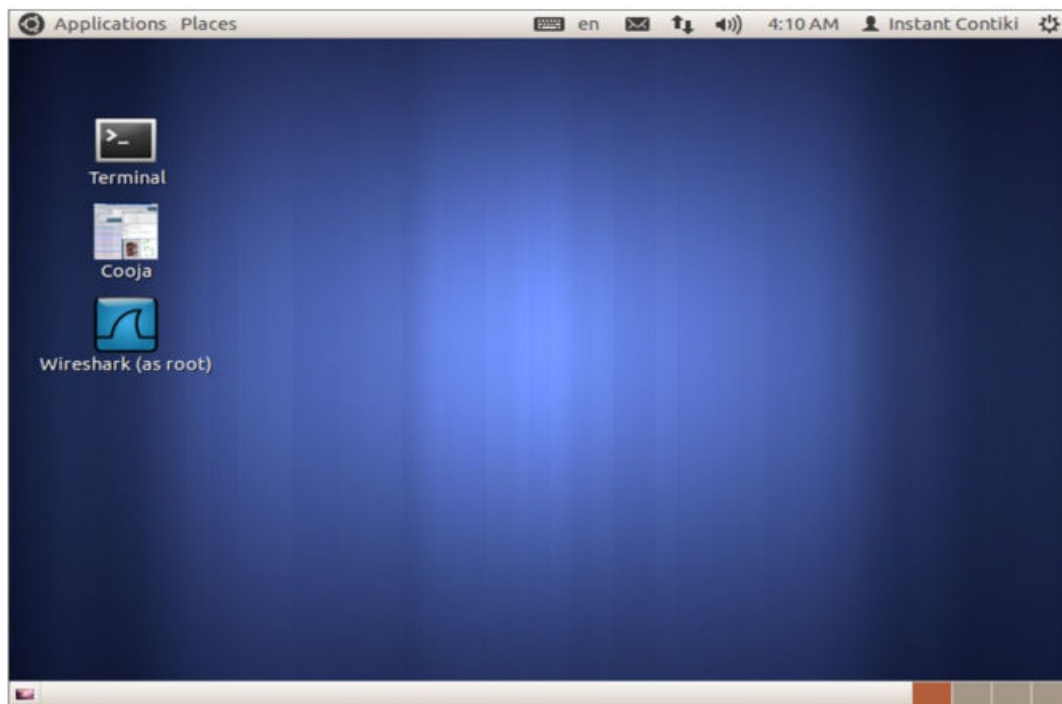


Figure IV.1: Système d'exploitation CONTIKI.

4.4. Simulateurs Cooja

Cooja est un simulateur de réseau qui permet l'émulation de plateformes matérielles réelles. Cooja est l'application du système d'exploitation Contiki se concentrant sur le comportement réseau [18].



Figure IV.2: Lancement de simulateur Cooja.

L'interface du simulateur Cooja est constituée de plusieurs fenêtres, tel que représenté dans la Figure suivante :

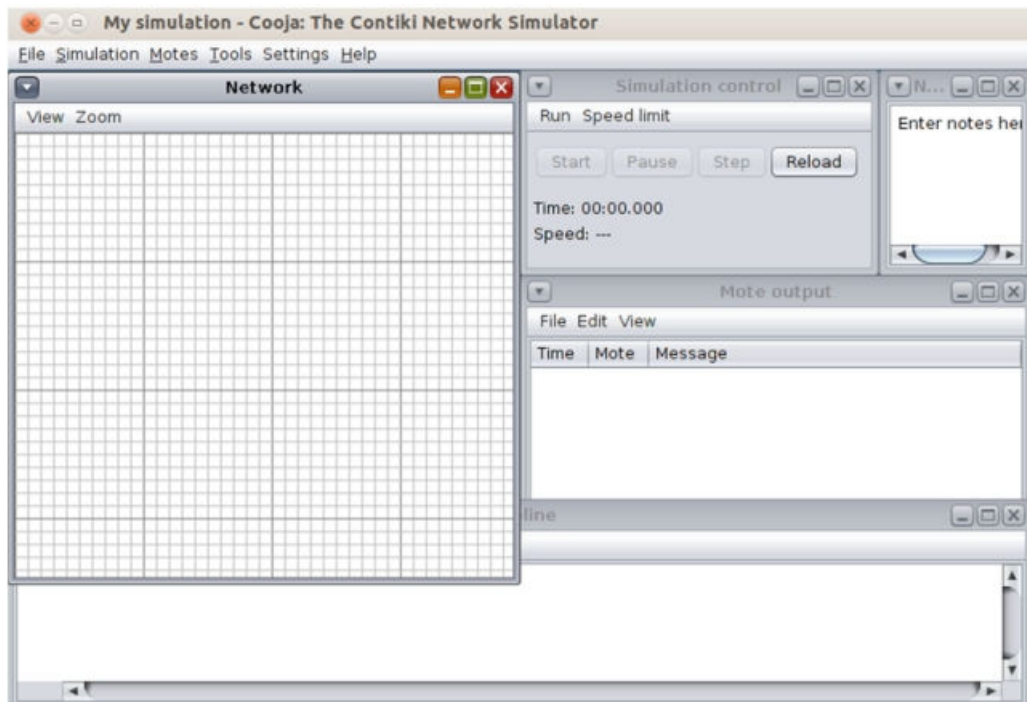


Figure IV.3: Interface graphique de Cooja.

Mote output : représente la sortie produite par les nœuds (ou "motes") de la simulation. Cela peut inclure des messages de communication entre les nœuds, des données de capteurs simulées, ou toute autre sortie générée par les nœuds pendant l'exécution de la simulation. Elle permet de visualiser ces informations en temps réel pour aider à comprendre le comportement des nœuds dans le réseau simulé.

Network : représente la disposition physique des nœuds (ou "motes") dans le réseau simulé. Elle offre une visualisation graphique de la topologie du réseau, montrant la position relative des différents nœuds et les liens entre eux. Cette fenêtre permet aux utilisateurs de créer, modifier et observer la topologie du réseau en déplaçant les nœuds et en établissant des connexions entre eux. Elle fournit également des informations visuelles sur les attributs des nœuds, tels que leur type, leur environnement radio et le trafic radio entre eux, ce qui permet aux utilisateurs de mieux comprendre le comportement du réseau simulé.

Simulator control : représente un ensemble d'outils permettant de contrôler et de gérer la simulation en cours. Cette fenêtre contient quatre boutons :

1. Start: pour démarrer une simulation.
2. Pause: pour arrêter une simulation.
3. Reload: pour recharger une simulation.
4. Step: pour régler la vitesse de simulation.

4.5. Méthodologie générale proposée

La méthodologie proposée (c.f. Figure IV.4) pour évaluer la résilience d'un réseau repose sur des simulations rigoureuses, intégrant différents modes de fonctionnement et scénarios de défaillance. En mode nominal, le réseau est analysé dans des conditions idéales sans défaillance apparente, permettant ainsi de définir son comportement standard. En cas de transition vers le mode dégradé, simulant un dysfonctionnement du réseau tel qu'une perte de connectivité partielle, des actions correctives spécifiques sont étudiées et mises en œuvre pour rétablir la stabilité. La résilience du réseau est évaluée en mesurant sa capacité à maintenir une connectivité minimale malgré les pannes potentielles, démontrant ainsi sa tolérance aux pannes. Ces simulations permettent non seulement de prévoir les performances du réseau dans des situations critiques, mais aussi d'optimiser les stratégies de gestion des incidents pour assurer une fiabilité continue des opérations.

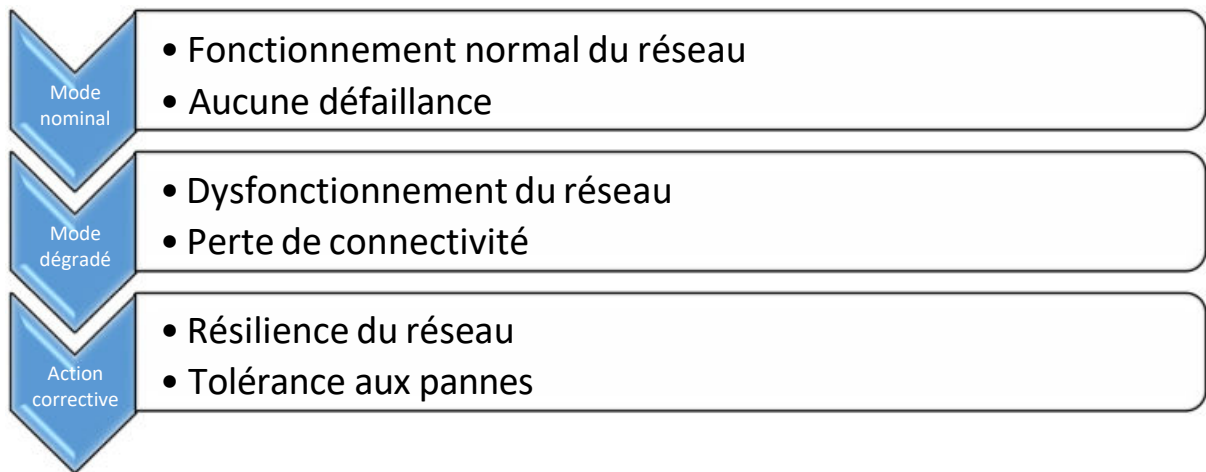


Figure IV.4: Méthodologie générale

4.6. Les étapes des simulations

4.6.1. Création du réseau

Nous allons maintenant décrire les différentes étapes de création utilisées pour la simulation:

Etape 1 : Pour créer une nouvelle simulation, cliquez sur l'onglet "Fichier", puis sélectionnez "Nouvelle Simulation"

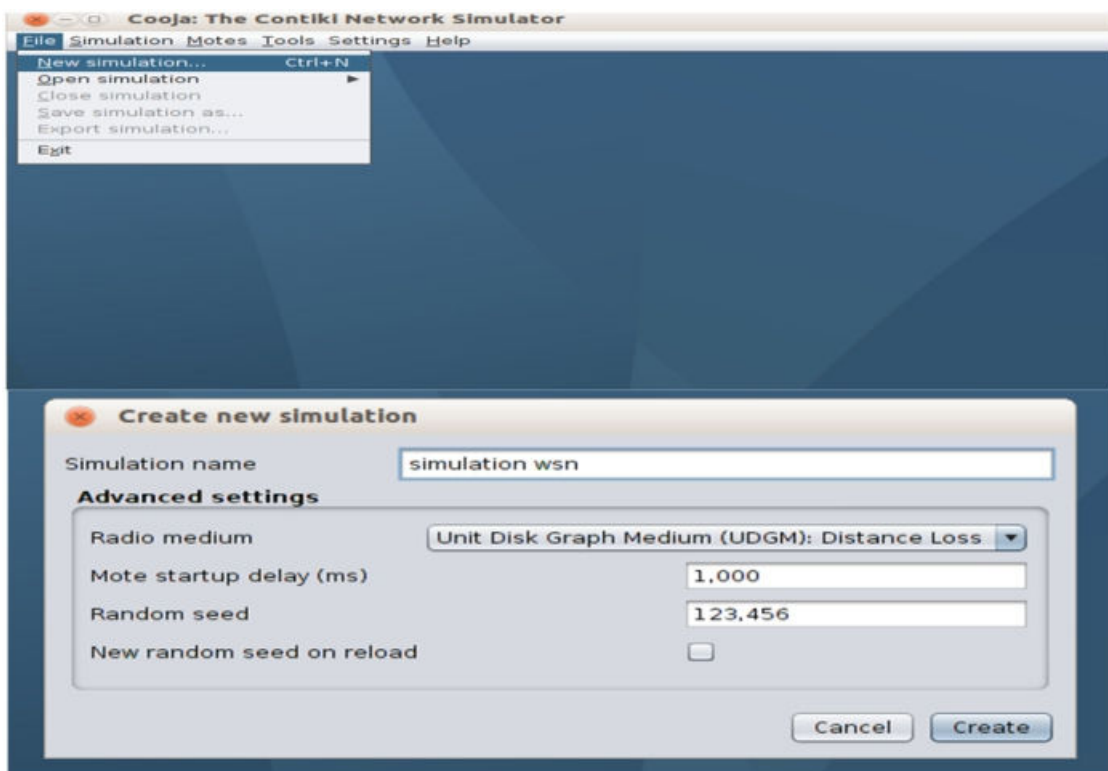


Figure IV.5: La création de nouvelle simulation

Etape 2 : Dans cette étape, nous allons commencer la création de notre réseau en ajoutant des nœuds capteurs de type "Sky mote": Dans le menu "Motes", optez pour "Créer un nouveau type de mote" puis choisissez "Sky mote".

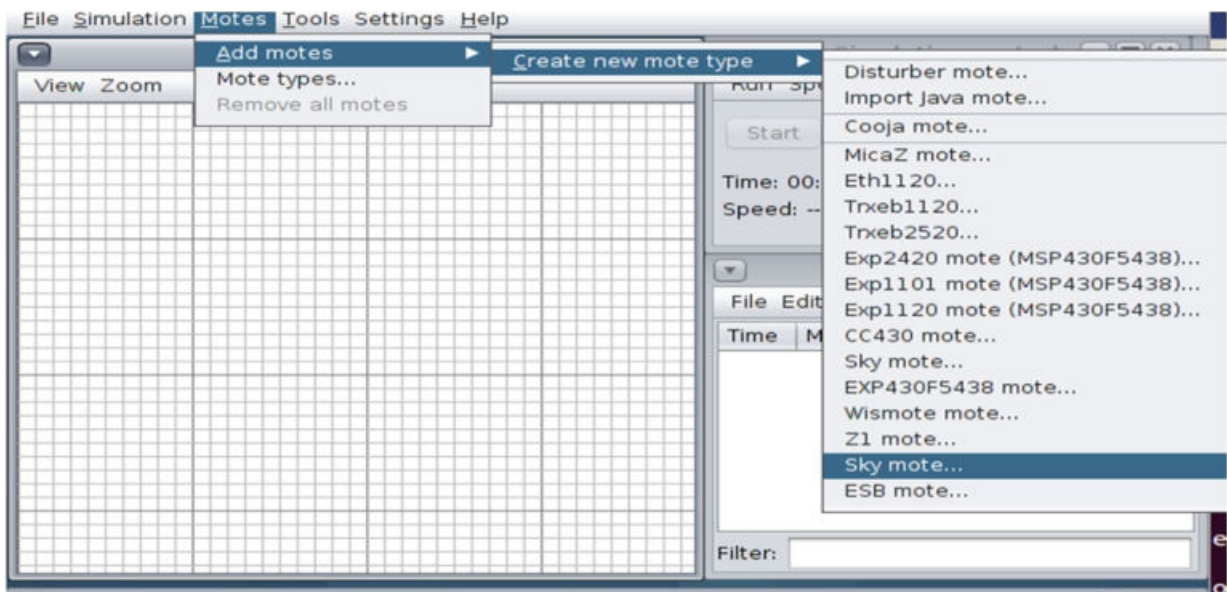


Figure IV.6: Ajout des nœuds

Dans la fenêtre de dialogue "Créer un type de mote", puis appuyez sur "Parcourir". Cherchez votre application Contiki dans le répertoire /home/user/Contiki 3.0/examples/ipv6/rpl-collect.

Choisissez le fichier udp-sink.c pour créer le nœud "sink" (station de base) et udp-sender.c pour créer les nœuds capteurs.

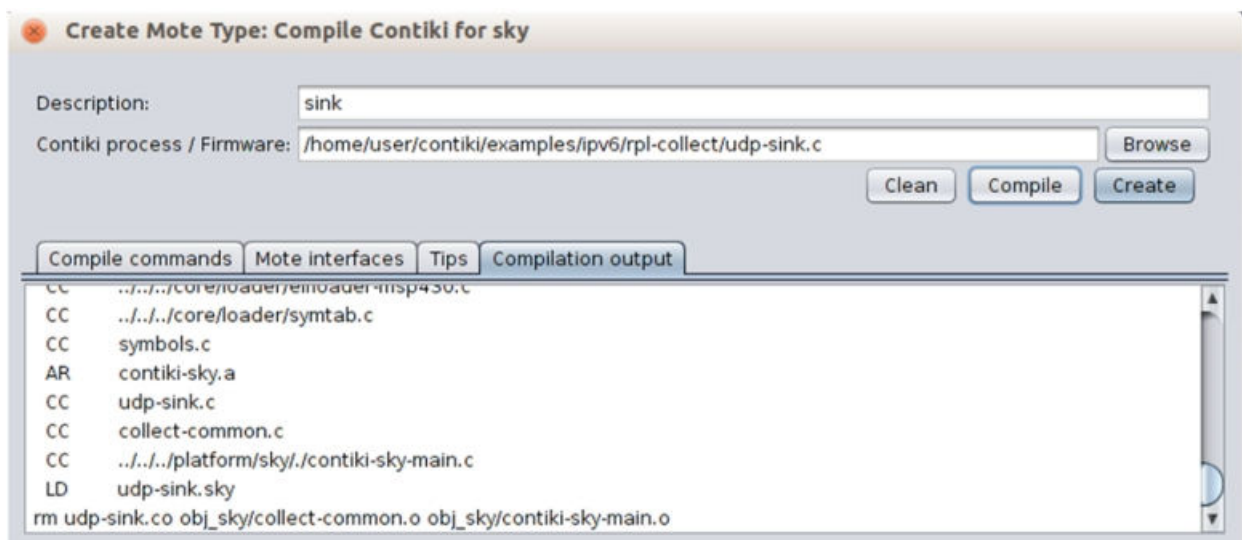


Figure IV.7: Création du nœud Sink.



Figure IV.8: Création du nœud capteur

4.6.2. Paramètres des simulations

Paramètres	Valeurs
Simulateur	COOJA
Nœud capteur	10, 30, 40
Nœud sink	1
Type de mote	Sky mote
Topologies	Aléatoire
Protocole	RPL
Range de transmission	50m

Tableau IV. 1: Paramètres de simulation.

4.6.3. Les différentes topologies du réseau

Nous avons employé diverses topologies dans notre étude, comprenant des réseaux de capteurs constitués respectivement de 10, 30 et 40 nœuds (cf. figure IV.9,10,11) :

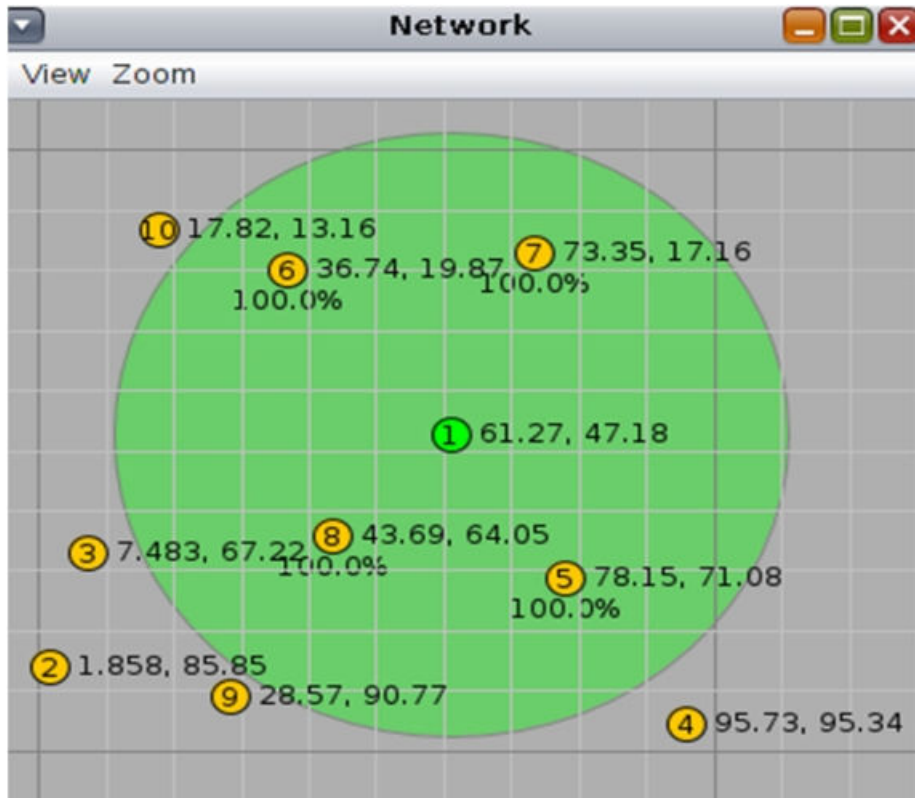


Figure IV.9: Topologies de 10 nœuds

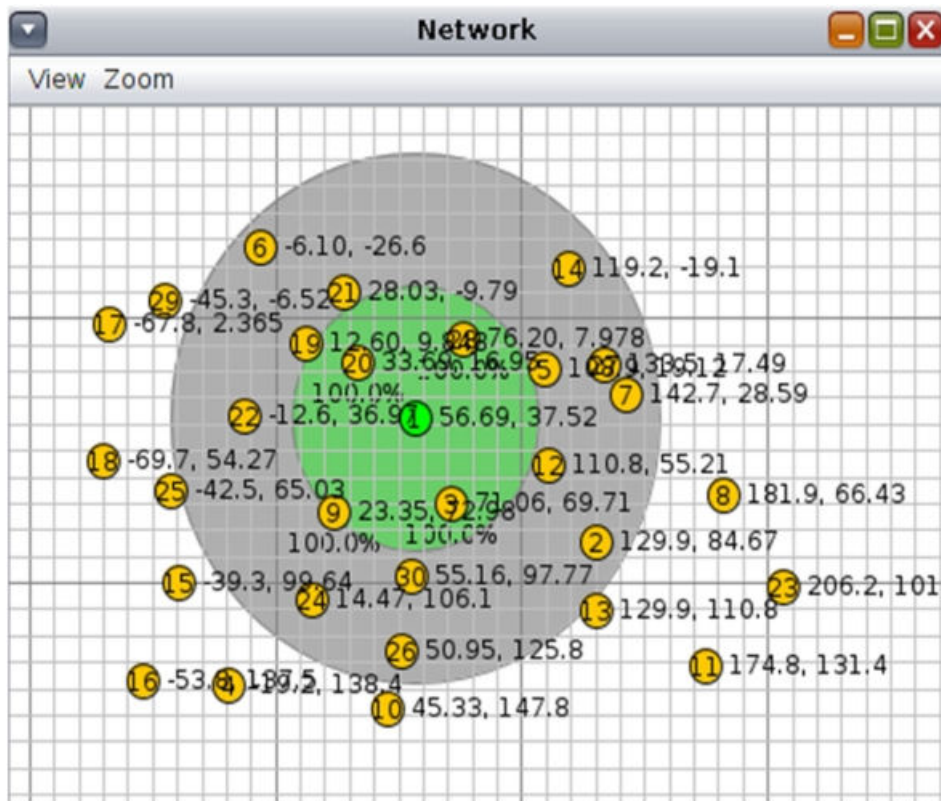


Figure IV.10: Topologies de 30 nœuds

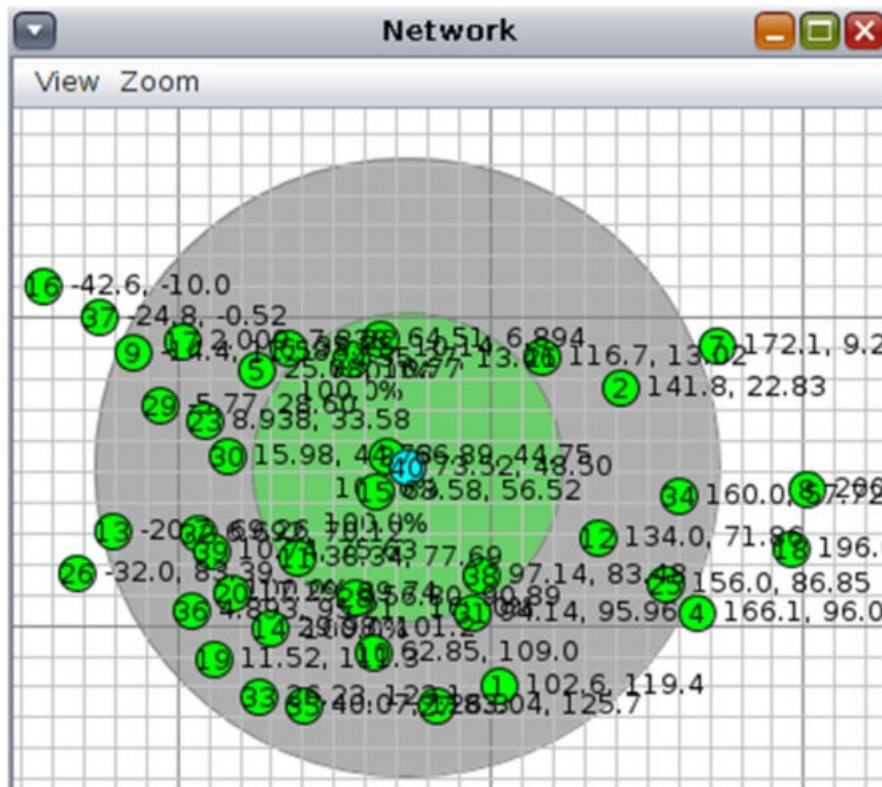


Figure IV.11: Topologies de 40 nœuds

4.7. Scénarios des simulations

4.7.1. Scénarios mode nominal

Après avoir créé notre réseau de capteurs sans fil, nous procéderons au calcul des indicateurs globaux de position pour évaluer les performances du système lorsqu'il est en état de fonctionnement est en mode nominal.

4.7.1.1. Topologie avec 10 nœuds

Dans cette topologie, nous avons créé un réseau composé de neuf nœuds capteurs et d'un Sink.

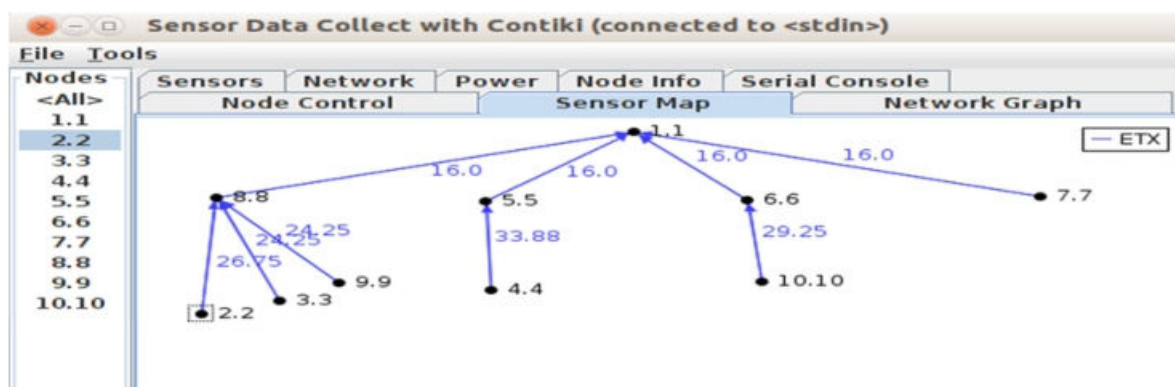


Figure IV. 12:DODAG avant panne avec 10 nœuds.

4.7.1.2. Topologie avec 30 nœuds

Dans cette configuration topologique, nous avons établi un réseau comportant vingt-neuf nœuds capteurs et un nœud Sink.

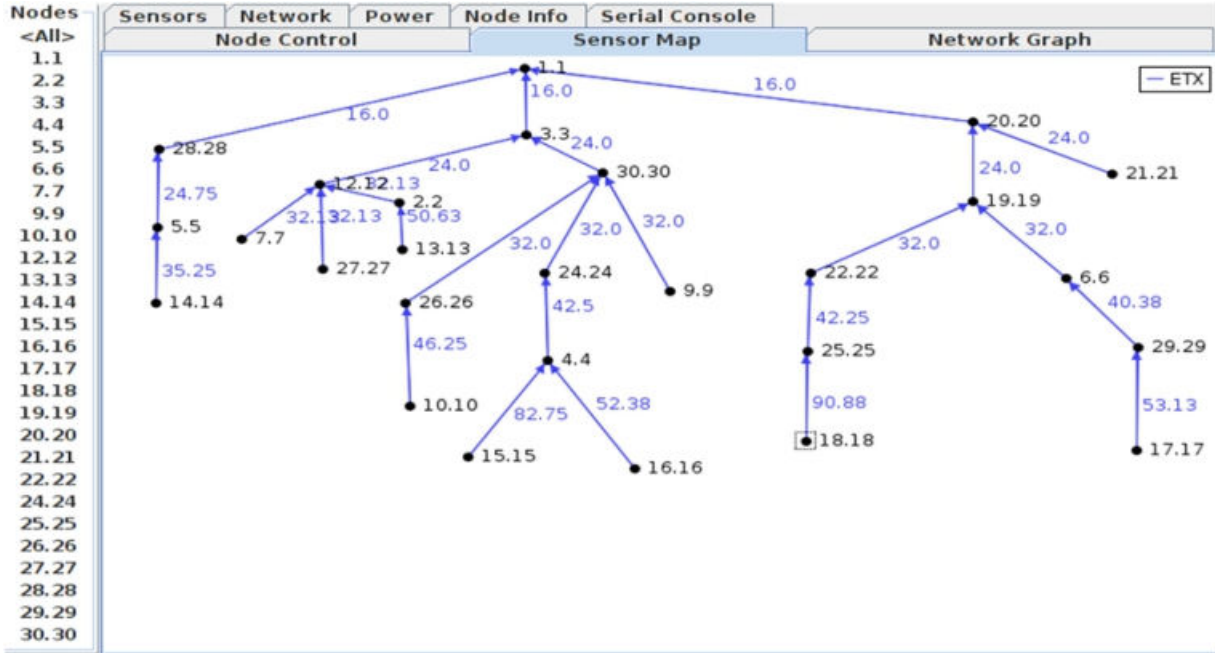


Figure IV.13: DODAG avant panne avec 30 nœuds.

4.7.1.3. Topologie avec 40 nœuds

Nous avons configuré un réseau dans cette topologie, comprenant quarante nœuds capteurs et un collecteur Sink.

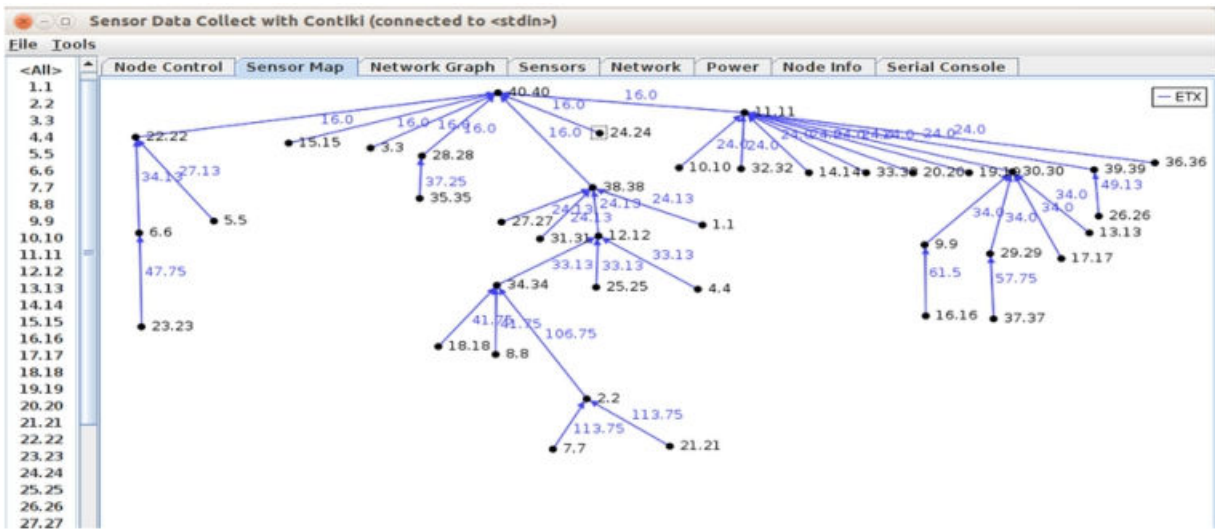


Figure IV.14: DODAG avant panne avec 40 nœuds.

4.7.1.4. Indicateurs globaux de position mode nominal

Le tableau ci-dessous résume les calculs des indicateurs globaux de position dans l'état fonctionnel du système.

	Topologie 10 nœuds	Topologie 30 nœuds	Topologie 40 nœuds
Indice de connectivité β	1.5	1.43	2.35
Indice de connectivité γ	62%	51%	82 %
Indice de connectivité μ	6	14	55
Indice de connectivité α	40%	25%	73%

Tableau IV.2: Indicateurs globaux de position avant panne.

4.7.1.5. Analyse des résultats

- **Indice de connectivité β :** Pour la topologie de 10 nœuds, l'indice de connectivité de 1.5 indique une connectivité modérée, chaque nœud étant en moyenne relié à un peu plus d'un autre nœud. Pour la topologie de 30 nœuds avec un indice de connectivité de 1.43, bien qu'un peu inférieur à celui de la topologie de 10 nœuds, Cela suggère toujours une connectivité modérée. Quant à la topologie de 40 nœuds, son indice de connectivité de 2.35 indique une connectivité plus dense, suggérant une plus grande interconnexion entre les nœuds. Ces résultats illustrent des variations de densité de liens et donc de connectivité selon le nombre de nœuds.
- **Indice de connectivité γ :** Les résultats de ce indice indique que, dans la topologie de 10 nœuds, environ 62% des liens possibles sont utilisés, ce qui suggère une utilisation modérée des ressources de connectivité. Dans la topologie de 30 nœuds, cette utilisation descend à environ 51%, ce qui signifie que les liens sont moins utilisés. Enfin, dans la topologie de 40 nœuds, nous avons trouvé un pourcentage plus élevé de 82%, indiquant une utilisation plus efficace des liens disponibles.
- **Indice de connectivité μ :** Dans la topologie comprenant 10 nœuds et affichant un nombre cyclomatique de 6, nous observons une connectivité relativement simple, marquée par un faible nombre de composantes connexes. Pour la configuration comprenant 30 nœuds et présentant un nombre cyclomatique de 14, nous constatons une connectivité plus complexe

par rapport à la topologie de 10 nœuds. Cette complexité accrue se traduit par un nombre supérieur de composantes connexes dans le réseau, ce qui suggère une structure plus interconnectée. Quant à la topologie de 40 nœuds avec un nombre cyclomatique de 55, ce chiffre très élevé témoigne d'une connectivité encore plus complexe. Cette topologie présente un grand nombre de composantes connexes et une structure de réseau très ramifiée, ce qui favorise une grande interconnexion entre les nœuds et offre une diversité de chemins pour les communications.

- **Indice de connectivité α :** Pour la topologie de 10 nœuds avec un indice de connectivité de 40%, cela suggère une connectivité modérée, où environ 40% des circuits possibles dans le réseau sont utilisés. Cette valeur indique une certaine interconnexion entre les nœuds, mais il reste encore des chemins non explorés. Pour la topologie de 30 nœuds avec un indice de connectivité de 25%, nous observons une connectivité légèrement plus faible, indiquant que seulement un quart des circuits possibles sont utilisés dans le réseau. Cela suggère une connectivité moins dense et plus limitée entre les nœuds. En revanche, pour la topologie de 40 nœuds avec un indice de connectivité de 73%, nous constatons une connectivité beaucoup plus forte, où près des trois quarts des circuits possibles sont utilisés. Cela indique une interconnexion importante entre les nœuds et un réseau densément connecté, offrant de multiples chemins pour les communications.

4.7.2. Scénarios mode dégradé

Les nœuds dans un réseau de capteurs sans fil sont exposés à différentes pannes matérielles ou logicielles. Dans cette partie, nous allons simuler l'état dysfonctionnel du réseau affectant différents nœuds et topologies.

4.7.2.1. Topologie avec 10 nœuds

Dans cette topologie, nous avons simulé une panne des nœuds huit et six comme illustré dans le DODAG (figure IV.13) après la panne :

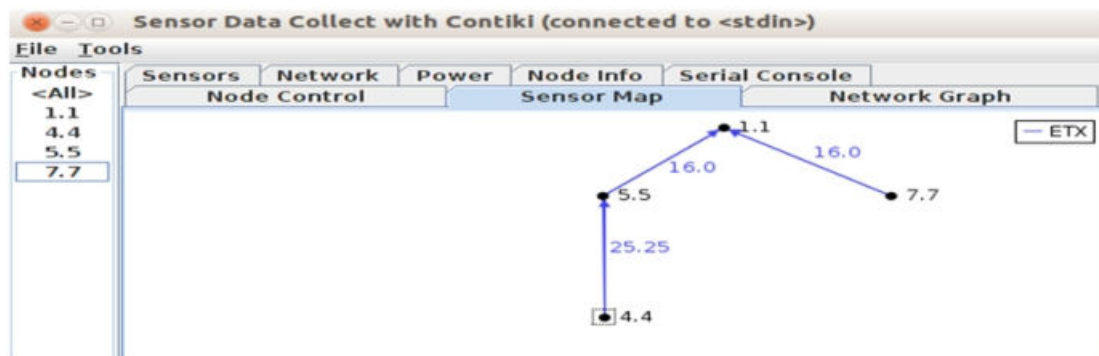


Figure IV.15: DODAG après panne avec 10 nœuds.

4.7.2.2. Topologie avec 30 nœuds

Dans cette topologie, nous avons simulé une panne affectant le nœud cinq comme illustré dans la figure IV.16:

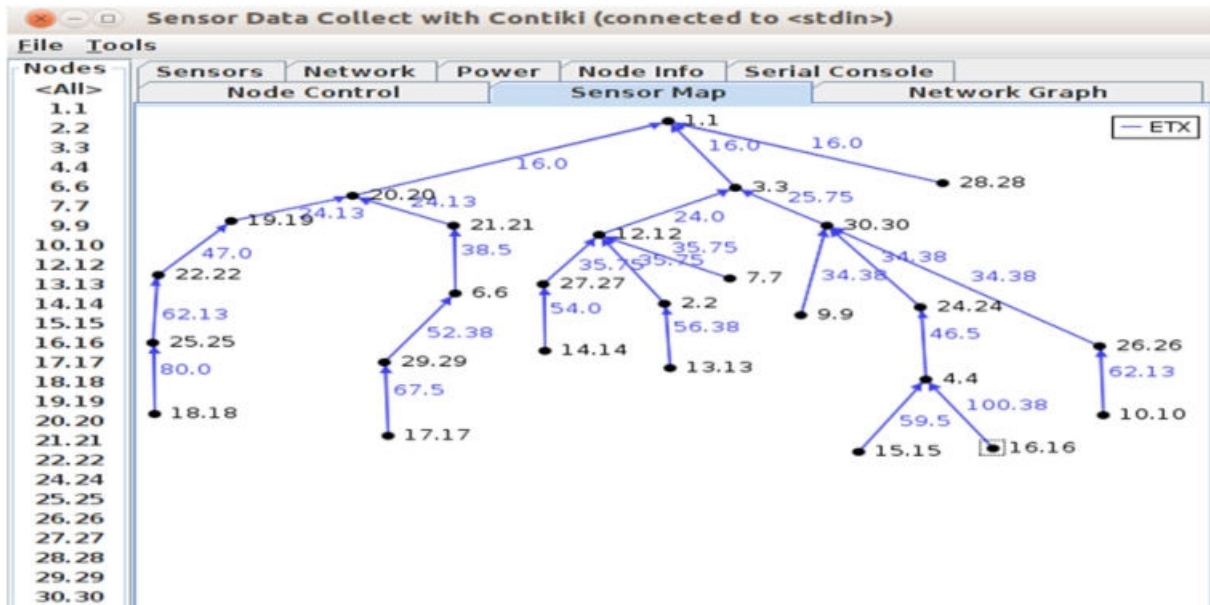


Figure IV.16: DODAG après panne avec 30 nœuds.

4.7.2.3. Topologie avec 40 nœuds

Dans cette topologie, nous avons simulé des pannes aux nœuds cinq, neuf et deux, comme illustré dans la figure IV.17 :

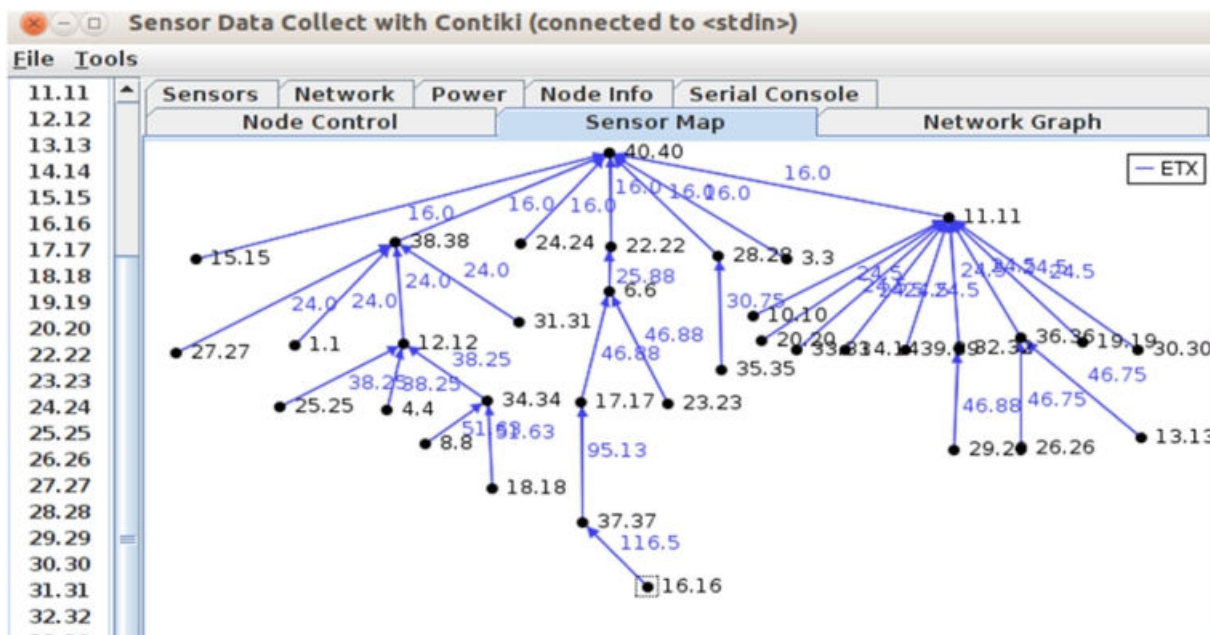


Figure IV.17: DODAG après panne avec 40 nœuds.

4.7.2.4. Indicateurs globaux de position mode dégradé

	Topologie 10 nœuds	Topologie 30 nœuds	Topologie 40 nœuds
Indice de connectivité β	0.75	0.76	1.94
Indice de connectivité γ	33%	46%	68 %
Indice de connectivité μ	0	10	36
Indice de connectivité α	0%	18%	52%

Tableau IV. 3: Indicateurs globaux de position mode dégradé.

4.7.2.5. Analyse des résultats

- **Indice de connectivité β :** Pour la topologie de 10 nœuds, avant la panne au niveau des nœuds huit et six, l'indicateur était de 1.5. Après la panne, cet indicateur est tombé à 0.75. Cela suggère une diminution significative de la densité de connexions dans le réseau, ce qui peut être dû à la perte des nœuds et à la rupture des liens associés. Dans la topologie de 30 nœuds, après la panne au niveau du nœud cinq, l'indicateur est passé de 1.43 à 0.76. Encore une fois, cela indique une diminution de la densité de connexions dans le réseau à la suite de la panne du nœud cinq. En revanche, pour la topologie de 40 nœuds, après la panne au niveau des nœuds cinq, neuf et deux, l'indicateur est passé de 2.35 à 1.94. Bien que cet indicateur reste élevé, cela montre tout de même une diminution de la densité de connexions dans le réseau suite à la perte de plusieurs nœuds.
- **Indice de connectivité γ :** Dans la topologie de 10 nœuds, après la panne au niveau des nœuds huit et six, l'indicateur de densité de liens est passé de 62% à 33%. Cette diminution significative suggère une réduction importante du nombre de liens actifs dans le réseau à la suite de la panne de ces nœuds. Pour la topologie de 30 nœuds, après la panne au niveau du nœud cinq, l'indicateur est passé de 51% à 46%. Bien que la baisse ne soit pas aussi marquée que dans la topologie de 10 nœuds, elle indique néanmoins une diminution de la densité de liens due à la perte du nœud cinq. Dans la topologie de 40 nœuds, après la panne au niveau des nœuds cinq, neuf et deux, l'indicateur est passé de 82% à 68%. Cette baisse importante suggère une réduction significative de la densité de liens dans le réseau à la suite de la panne de plusieurs nœuds.
- **Indice de connectivité μ :** Dans la topologie de 10 nœuds, après la panne au niveau des nœuds huit et six, l'indicateur du nombre de circuits indépendants est tombé à 0, alors qu'avant la

panne, il était de 6. Cette baisse suggère une rupture significative de la connectivité dans le réseau à la suite de la panne de ces nœuds. Pour la topologie de 30 nœuds, après la panne au niveau du nœud cinq, l'indicateur est passé de 14 à 10. Bien que la baisse ne soit pas aussi marquée que dans la topologie de 10 nœuds, elle indique néanmoins une diminution du nombre de circuits indépendants à la suite de la panne du nœud cinq. Dans la topologie de 40 nœuds, après la panne au niveau des nœuds cinq, neuf et deux, l'indicateur est passé de 55 à 36. Cette baisse importante suggère une réduction significative du nombre de circuits indépendants dans le réseau à la suite de la panne de plusieurs nœuds.

- **Indice de connectivité α :** Après la défaillance des nœuds huit et six dans la topologie à 10 nœuds, l'indice de connectivité a chuté à 0, contre 40% avant l'incident. Cette baisse soudaine suggère une diminution significative de la connectivité du réseau à la suite de la panne de ces nœuds. Pour la topologie à 30 nœuds, suite à la panne du nœud cinq, l'indice de connectivité est passé à 18%, alors qu'il était de 25% auparavant. Bien que la baisse ne soit pas aussi marquée que dans la topologie de 10 nœuds, elle indique néanmoins une diminution de la connectivité du réseau à la suite de la panne du nœud cinq. Dans la configuration à 40 nœuds, après la défaillance simultanée des nœuds cinq, neuf et deux, l'indice de connectivité est tombé à 52%, contre 73% avant l'incident. Cette baisse importante suggère une réduction significative de la connectivité du réseau à la suite de la panne de plusieurs nœuds.

4.7.3. Scénarios de l'action corrective

Lorsqu'un nœud tombe en panne dans un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF), il est important d'avoir des mécanismes de tolérance aux pannes pour maintenir la fonctionnalité et la fiabilité du réseau. Le remplacement des nœuds défaillants par d'autres nœuds est une méthode efficace de tolérance aux pannes, permettant de maintenir la fonctionnalité et la connectivité du réseau. Pour cette technique, la fonctionnalité de 'Mobilité' peut être utilisée pour repositionner les nœuds. Le choix du nœud de remplacement est basé sur un nœud qui n'impacte pas significativement la connectivité du réseau, c'est-à-dire un nœud périphérique (cf. Figure IV.18)

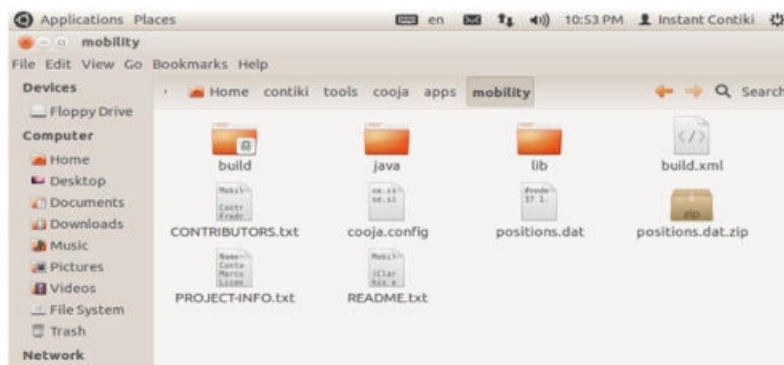


Figure IV.18: Fichier « Mobility »

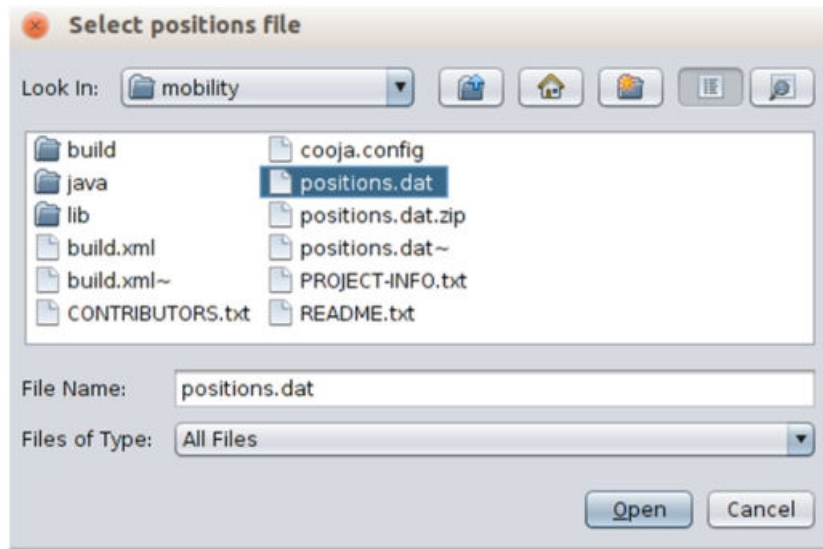


Figure IV.19: Fichier « Positions.dat »

4.7.3.1. Topologie avec 10 nœuds

Dans cette topologie, nous avons remarqué que la panne a affecté les nœuds huit et six. D'après le calcul des indicateurs, nous avons conclu que les nœuds cinq et sept n'influencent pas significativement la connectivité. Par conséquent, nous avons remplacé le nœud huit par le nœud cinq et le nœud six par le nœud sept.

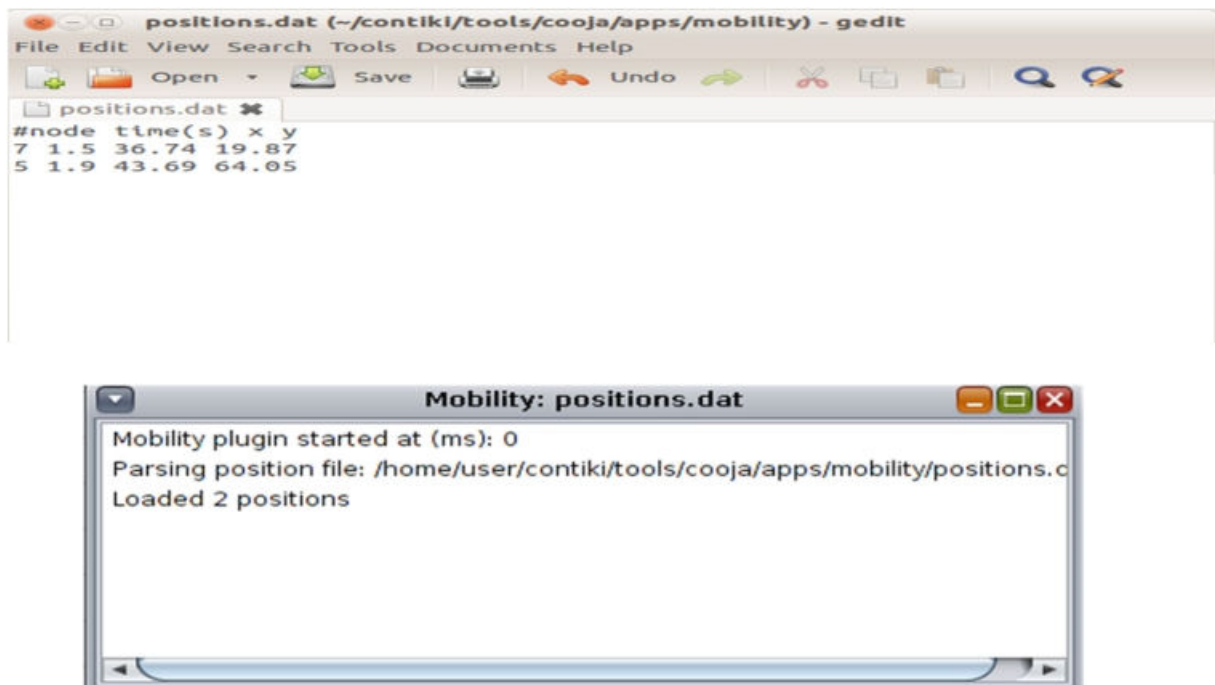


Figure IV.20: Action corrective pour 10 nœuds.

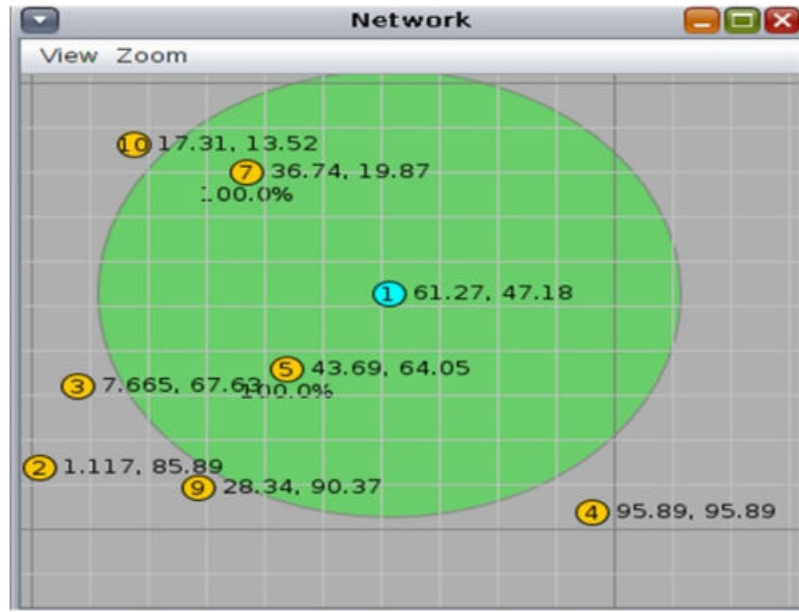


Figure IV.21: Topologie après l'action corrective pour 10 nœuds.

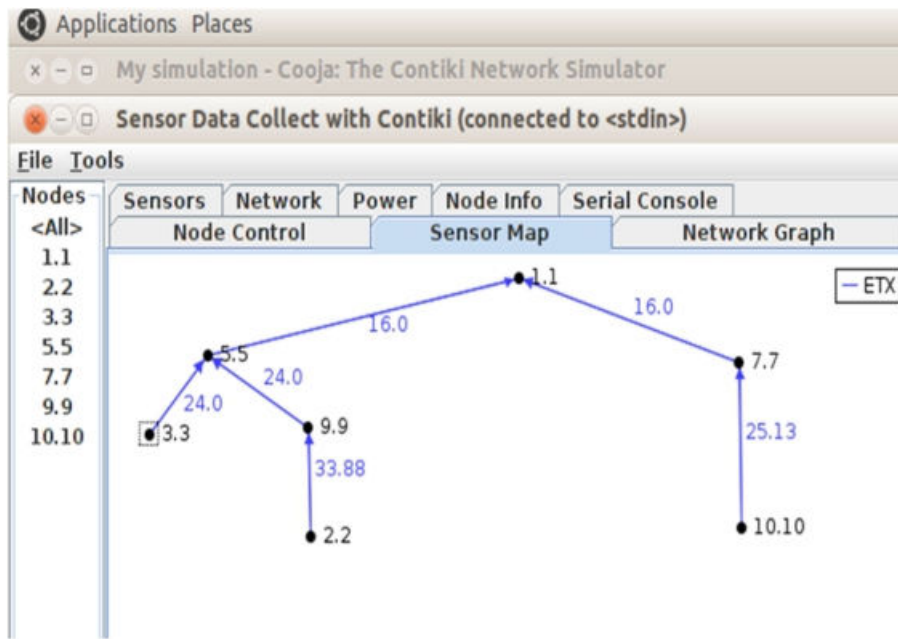


Figure IV.22: DODAG après l'action corrective pour 10 nœuds.

4.7.3.2. Topologie avec 30 nœuds

Dans cette topologie, nous avons constaté que la panne a affecté le nœud cinq. Selon les calculs des indicateurs, nous avons conclu que le nœud vingt-huit n'influence pas significativement la connectivité. Par conséquent, nous avons remplacé le nœud cinq par le nœud vingt-huit.

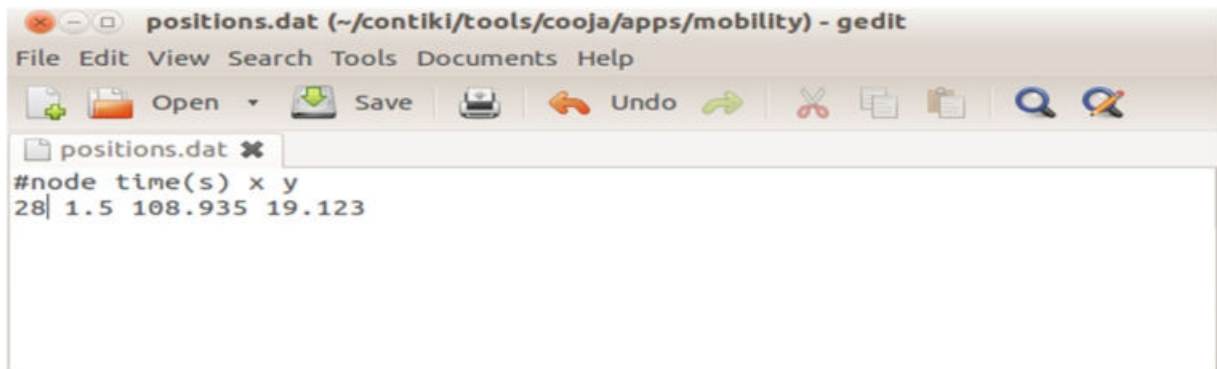


Figure IV.23: Action corrective pour 30 nœuds.

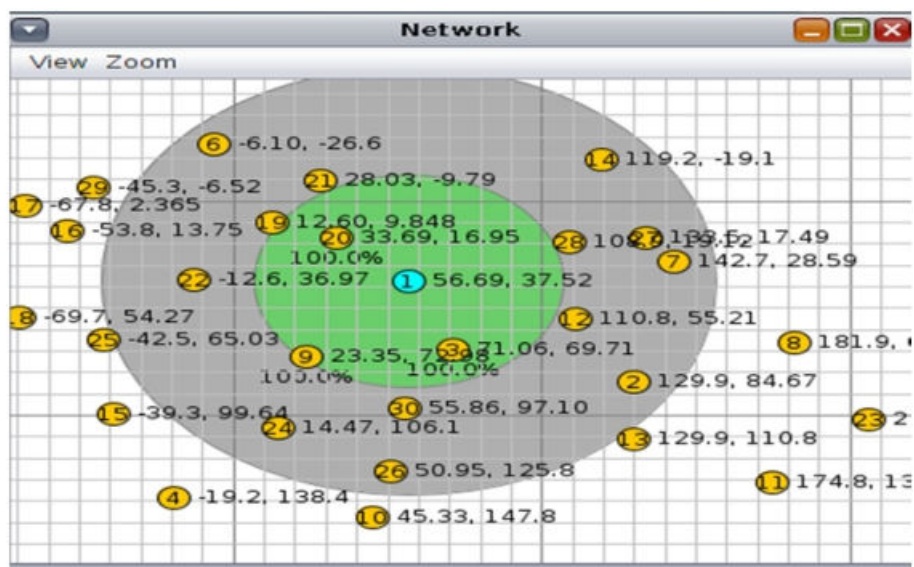


Figure IV.24: Topologie après l'action corrective pour 30 nœuds.

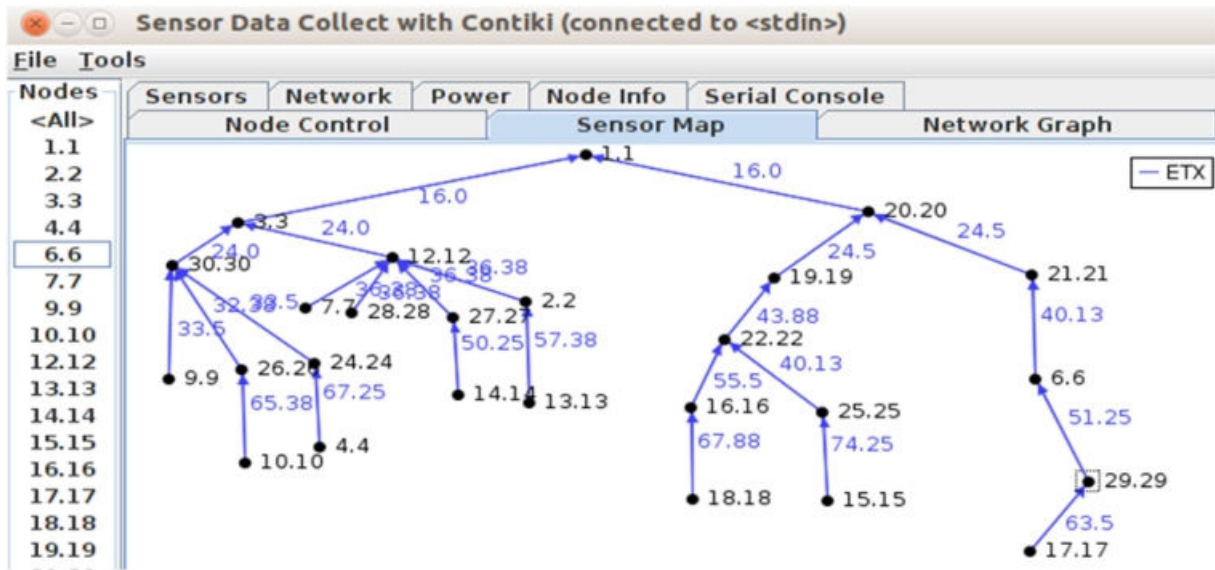


Figure IV.25: DODAG après l'action corrective pour 30 nœuds.

4.7.3.3. Topologie avec 40 nœuds

Dans cette configuration, des pannes ont été constatées aux nœuds deux, cinq et neuf. L'évaluation des indicateurs a montré que le nœud trente-sept n'affectait pas significativement la connectivité. Par conséquent, nous avons décidé de remplacer le nœud cinq par le nœud trente-sept.

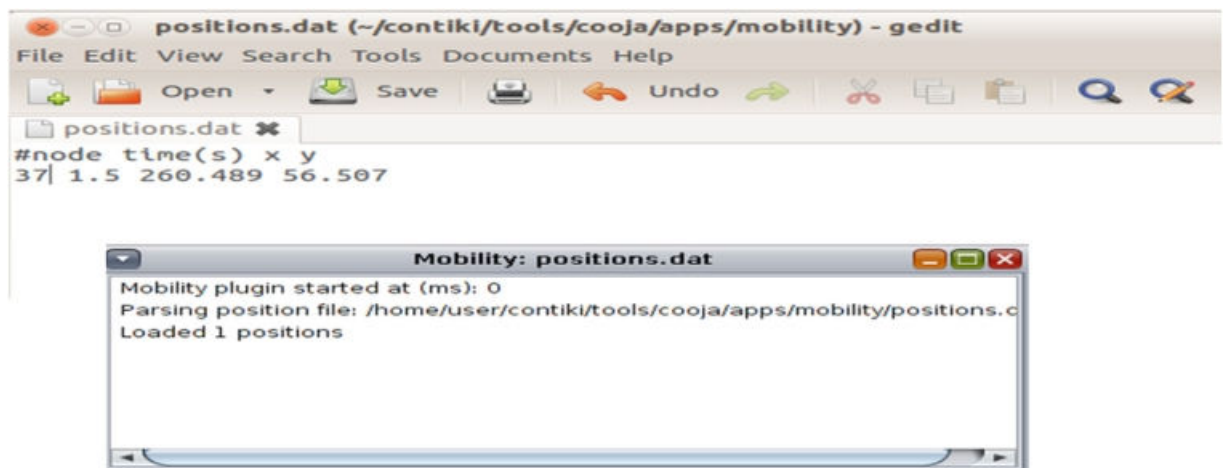


Figure IV.26 : Action corrective pour 40 nœuds.

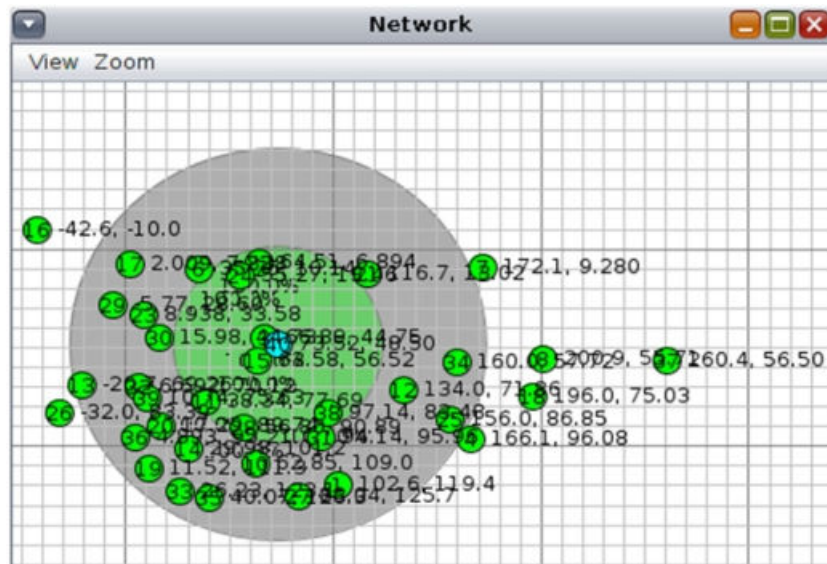


Figure IV.27: Topologie après l'action corrective pour 40 nœuds

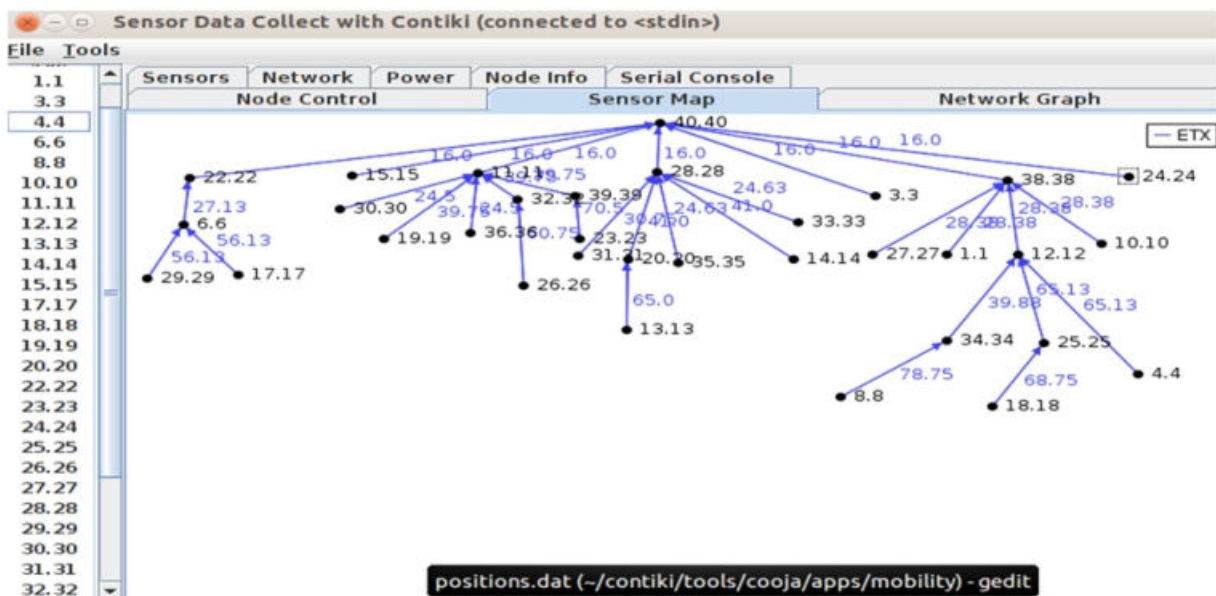


Figure IV.28: DODAG après l'action corrective pour 40 nœuds.

4.7.3.4. Indicateurs globaux de position mode post action corrective

	Topologie 10 nœuds	Topologie 30 nœuds	Topologie 40 nœuds
Indice de connectivité β	1.125	1.37	2.22
Indice de connectivité γ	50%	49%	78 %
Indice de connectivité μ	3	12	47
Indice de connectivité α	27%	23%	68%

Tableau IV.4: Indicateurs globaux de position mode post action corrective.

4.7.3.5. Analyse des résultats

- **Indice de connectivité β :** Dans la topologie à 10 nœuds, après la panne des nœuds huit et six, l'indice de connectivité est passé de 1.5 à 0.75, indiquant une baisse significative de la connectivité. Cependant, après le remplacement des nœuds huit et six par cinq et sept respectivement, l'indice de connectivité est remonté à 1.125, suggérant une amélioration mais une connectivité toujours inférieure à l'état initial. Dans la topologie à 30 nœuds, la panne du nœud cinq a entraîné une baisse de l'indice de connectivité de 1.43 à 0.76. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 28, l'indice de connectivité a augmenté à 1.37, montrant une certaine amélioration proche de l'état initial. Enfin, dans la topologie à 40 nœuds, la panne simultanée des nœuds cinq, neuf et deux a fait chuter l'indice de connectivité de 2.35 à 1.94. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 37, l'indice de connectivité est remonté à 2.22, indiquant une amélioration.
- **Indice de connectivité γ :** Dans la topologie à 10 nœuds, après la panne des nœuds huit et six, la densité de liens est passée de 62% à 33%, indiquant une diminution significative des connexions dans le réseau. Cependant, après le remplacement des nœuds huit et six par cinq et sept respectivement, la densité de liens est remontée à 50%, montrant une amélioration. Dans la topologie à 30 nœuds, la panne du nœud cinq a entraîné une légère baisse de la densité de liens, passant de 51% à 46%. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 28, la densité de liens est remontée à 49%, montrant une récupération partielle. Enfin, dans la topologie à 40 nœuds, la panne simultanée des nœuds cinq, neuf et deux a fait chuter la densité de liens de 82% à 68%.

Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 37, la densité de liens est remontée à 78%, montrant bonne une amélioration très proche de l'état initial.

- **Indice de connectivité μ :** Dans la topologie à 10 nœuds, après la panne des nœuds huit et six, le nombre de circuits indépendants est passé de 6 à 0, indiquant une perte complète de circuits. Cependant, après le remplacement des nœuds huit et six par cinq et sept respectivement, le nombre de circuits indépendants est remonté à 3, montrant une restauration partielle mais significative de la connectivité. Dans la topologie à 30 nœuds, la panne du nœud cinq a entraîné une diminution du nombre de circuits indépendants, passant de 14 à 10. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 28, le nombre de circuits indépendants est remonté à 12, montrant une récupération partielle de la connectivité perdue. Enfin, dans la topologie à 40 nœuds, la panne simultanée des nœuds cinq, neuf et deux a fait chuter le nombre de circuits indépendants de 55 à 36. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 37, le nombre de circuits indépendants est remonté à 47, montrant une amélioration significative mais toujours inférieure à l'état initial.
- **Indice de connectivité α :** Dans la topologie à 10 nœuds, après la panne des nœuds huit et six, l'indice de connectivité est tombé à 0, alors qu'avant la panne, il était de 40%. Cela indique une perte complète de la connectivité du réseau à la suite de la panne de ces nœuds. Cependant, après le remplacement des nœuds huit et six par cinq et sept respectivement, l'indice de connectivité est remonté à 27%, montrant une restauration partielle de la connectivité perdue. Dans la topologie à 30 nœuds, la panne du nœud cinq a entraîné une diminution de l'indice de connectivité, passant de 25% à 18%. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 28, l'indice de connectivité est remonté à 23%, montrant une récupération partielle de la connectivité perdue. Enfin, dans la topologie à 40 nœuds, la panne simultanée des nœuds cinq, neuf et deux a fait chuter l'indice de connectivité de 73% à 52%. Après le remplacement du nœud cinq par le nœud 37, l'indice de connectivité est remonté à 68%, montrant une amélioration significative

4.8. Comparaison entre les simulations

Les simulations précédentes ont porté sur l'analyse de divers indicateurs de connectivité dans des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) avant et après des pannes de nœuds. Pour l'indicateur basé sur le rapport de liens par rapport au maximum possible, on observe une diminution dans toutes les topologies après les pannes, mais le degré de cette diminution varie en fonction de la taille du réseau et des nœuds défaillants. En ce qui concerne l'indicateur basé sur le nombre de circuits indépendants,

dans la topologie de 10 nœuds, cet indicateur est tombé à zéro après la panne, indiquant une perte totale de connectivité. Après le remplacement des nœuds, une récupération partielle de la connectivité a été observée. Pour les autres topologies, une diminution de cet indicateur a également été observée après les pannes, avec des niveaux de récupération partielle variés après le remplacement des nœuds. Les résultats montrent que les pannes de nœuds ont un impact significatif sur la connectivité des réseaux de capteurs sans fil, dépendant de la topologie utilisée et du nombre de nœuds. Cependant, le remplacement des nœuds défectueux peut contribuer à restaurer partiellement la connectivité perdue. Cependant, une restauration complète de la connectivité peut ne pas être atteinte.

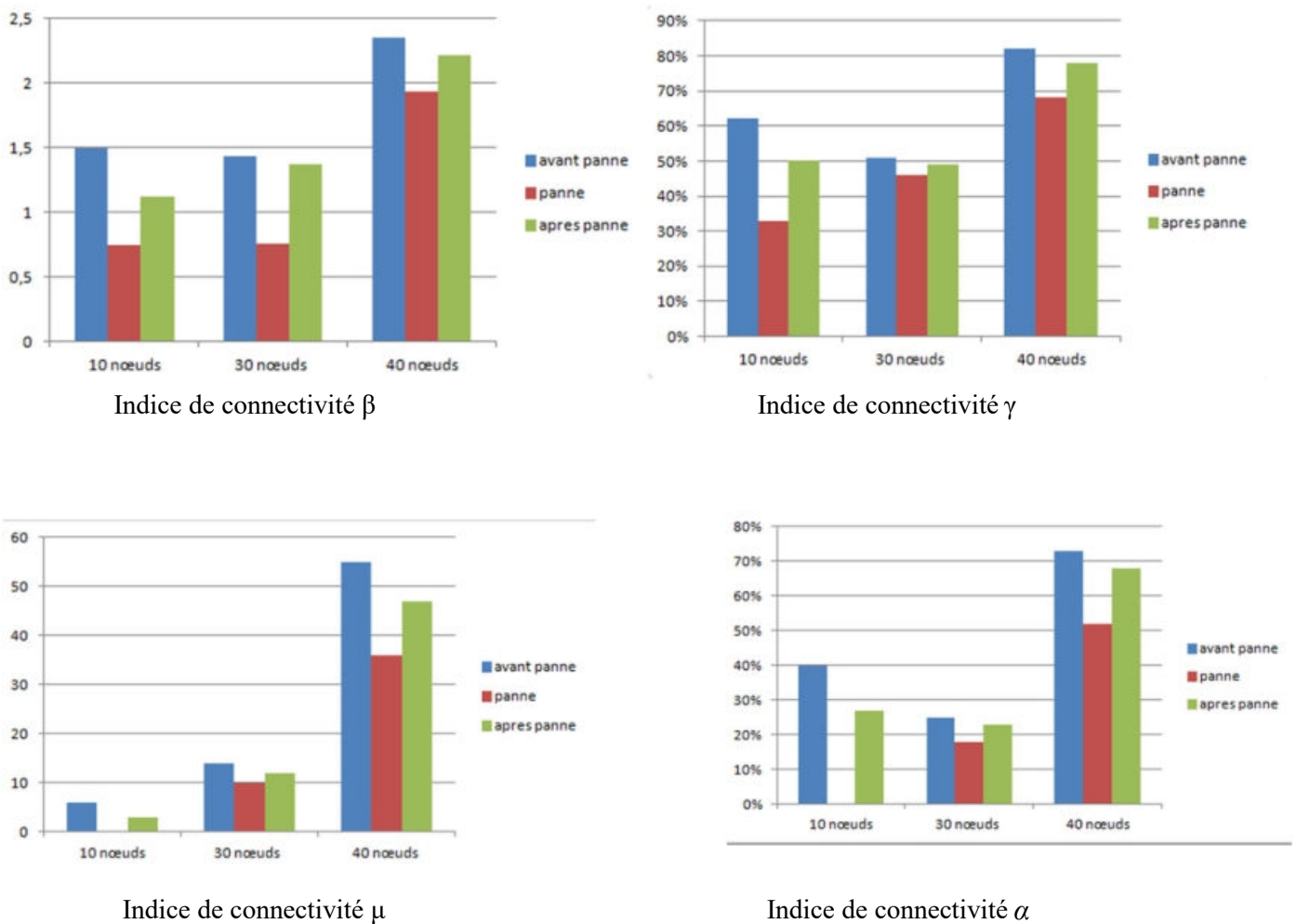


Figure IV. 29: Comparaison des Indices de connectivité.

Mode Nominal :

Lorsque le réseau fonctionne normalement, avec une augmentation du nombre de nœuds, tous les indices de connectivité (β , γ , μ , α) augmentent. Cela indique une meilleure connectivité et une plus grande robustesse dans les grandes topologies (40 nœuds étant la plus robuste).

Les valeurs spécifiques ($\beta = 2,35$, $\gamma = 82 \%$, $\mu = 55$, $\alpha = 73 \%$ pour la topologie à 40 nœuds) montrent des performances optimales.

Mode Dégradé :

En mode dégradé, les indices de connectivité chutent significativement, ce qui reflète une détérioration de la performance du réseau.

Malgré le mode dégradé, la topologie à 40 nœuds maintient des indices relativement élevés par rapport aux topologies plus petites ($\beta = 1,94$, $\gamma = 68 \%$, $\mu = 36$, $\alpha = 52 \%$).

Après Action Corrective :

Les actions correctives améliorent les indices de connectivité par rapport à l'état dégradé, mais ils ne sont pas restaurés complètement à leurs valeurs nominales.

La topologie à 40 nœuds montre la meilleure récupération, bien que légèrement en dessous de ses valeurs nominales précédentes ($\beta = 2,22$, $\gamma = 78 \%$, $\mu = 47$, $\alpha = 68 \%$).

Points Clés :

- Les topologies plus grandes (40 nœuds) sont intrinsèquement plus robustes et ont une meilleure connectivité.
- Les conditions dégradées affectent plus sévèrement les performances dans les topologies plus petites.
- Les actions correctives sont efficaces pour améliorer la connectivité, mais ne peuvent pas totalement restaurer la performance nominale.

4.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'impact des pannes de nœuds sur la connectivité des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) en utilisant différentes topologies. Nous avons mis l'accent sur les indices de connectivité et leur rôle crucial dans l'évaluation de la performance et de la tolérance aux pannes. Les indices (β , γ , μ , α) offrent une perspective quantitative sur la robustesse et la résilience des RCSF, permettant une analyse approfondie des comportements en mode nominal, dégradé, et après action corrective.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) représentent une avancée significative dans le domaine des systèmes de surveillance, permettant la collecte et la transmission de données dans divers environnements, souvent hostiles. Leur coût réduit, leur facilité de déploiement et leur capacité à fonctionner sans fil les rendent particulièrement adaptés à des applications telles que la surveillance des bâtiments intelligents, des systèmes énergétiques éloignés et des environnements physiques sensibles. Cependant, leur déploiement à grande échelle est confronté à des défis de sécurité, notamment la vulnérabilité des nœuds capteurs et les attaques potentielles.

Notre mémoire s'est articulée autour de quatre chapitres principaux. Le premier chapitre a fourni une revue approfondie des principes de base des capteurs sans fil, leur structure, et les caractéristiques essentielles des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), ainsi que leurs divers domaines d'application. Cette exploration a jeté les bases nécessaires pour comprendre cette technologie émergente et son potentiel.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur la tolérance aux pannes dans les RCSF. Nous y avons étudié en détail les concepts de défaillance et les approches pour gérer ces pannes, mettant en avant l'importance de la détection, du diagnostic et du rétablissement pour assurer une opération ininterrompue et optimale des réseaux.

Le troisième chapitre a approfondi la théorie des graphes, un outil crucial pour modéliser et analyser la connectivité dans les RCSF. Nous avons examiné les indicateurs globaux de position et leur rôle essentiel dans l'amélioration de la tolérance aux pannes, en soulignant comment ces concepts permettent de comprendre les structures complexes des réseaux.

Enfin, le quatrième chapitre a détaillé les simulations que nous avons réalisées pour analyser l'impact des pannes de nœuds sur la connectivité des RCSF. Utilisant l'outil de simulation Cooja, nous avons testé divers scénarios de fonctionnement et de dysfonctionnement, démontrant l'importance des indicateurs globaux de position pour maintenir la résilience et la robustesse des réseaux malgré les défaillances.

Les résultats de nos simulations ont confirmé que les indicateurs globaux de position sont efficaces pour diagnostiquer les faiblesses du réseau et fournir des pistes d'amélioration pour augmenter la tolérance aux pannes. Nous avons observé que la position et le nombre de nœuds choisis dans le réseau jouent un rôle crucial dans la connectivité et la tolérance aux

pannes. La simulation de divers scénarios de panne a montré que la connectivité du réseau peut être rétablie efficacement en remplaçant les nœuds défaillants selon des critères spécifiques.

Cependant, notre étude présente certaines limites, notamment l'utilisation du système d'exploitation Contiki, qui, malgré sa popularité, comporte des restrictions dans la gestion des communications et de la connectivité nécessaires pour une analyse approfondie des indicateurs globaux de position. De plus, pour confirmer les résultats obtenus, il serait nécessaire de réaliser un plus grand nombre de simulations en variant les topologies de réseau. Cette diversité permettrait de mieux comprendre les impacts des différentes configurations sur la tolérance aux pannes et la résilience des RCSF. Par ailleurs, l'utilisation d'autres simulateurs, tels que ns-3, pourrait fournir des perspectives complémentaires et plus robustes, en raison de ses capacités avancées et de ses fonctionnalités étendues.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Abdelkarim, Babchikh (2020). Réseaux de capteurs sans fil Problème de localisation. Mémoire de fin d'étude . Université Ahmed Draia - Adrar.
- [2] Bekkar, M., & Djaber, D. (2015). Stratégie de tolérance aux pannes dans les RCSF. Mémoire de fin d'étude . Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [3] Bendra Imane Rabia, B. F. (2023). L'auto-organisation topologique pour la tolérance des pannes dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de fin d'étude . Université Ain Témouchent Belhadj Bouchaib.
- [4] Benazzouz, M. (2013). Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil. Ecole nationale supérieure d'informatique Oued-Smar Alger Algérie.
- [5] Bouatit, M. N. (2018). Optimisation du routage, tolérance aux pannes et gestion de l'énergie et de l'interférence pour la transmission des flux multimédia temps réel dans les réseaux de capteur sans fil. Thèse de Doctorat. Ecole doctorale informatique, Télécommunications et Electronique (Paris).
- [6] Fellah Khaled Samir, B. M. (2021). Analyse les performances d'un routage aléatoire sur les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire de fin d'étude. UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET.
- [7] Guillerm, R. (2011). Intégration de la Sûreté de Fonctionnement dans les Processus d'Ingénierie Système. Thèse de Doctorat. Université Toulouse III – Paul Sabatier.
- [8] Kacimi, R. (2009). Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux. Thèse de Doctorat. UNIVERSITE DE TOULOUSE.
- [9] Lann, G. L., Pascale, M., & David, P. (1993). Tolerance aux fautes et systemes repartis : concepts et mecanismes. Disponible sur : <https://inria.hal.science/inria-00074564v1/document>
- [10] Massissilia, M. O. (2012). Routage à économie d'énergie dans les RCSFs. Mémoire fin d'étude. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [11] Mehmood, T. (s.d.). COOJA Network Simulator Exploring the Infinite Possible Ways to Compute the Performance Metrics of IOT Based Smart Devices to Understand the Working of IOT Based Compression & Routing Protocols.
- [12] Messabih, H. SN-CAS : Contribution des réseaux de capteurs. Mémoire de Magistère . Université HADJ LAKHDAR – BATNA.
- [13] Mohammed Belbachir, M. (2014). Stratégie de tolérance aux pannes pour un routage efficace dans les réseaux de capteurs. Mémoire de Magistère. université tlemcen abou bekr belkaid.
- [14] Nedjib, O. M. Tolérance aux pannes d'une station de base (SINK) dans RCSF. Mémoire de Magistère. UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.

- [15] A., BENAHMED DAHO (2018) Détection préventive de pannes guidée par les données dans les réseaux de capteurs sans fil. Mémoire fin d'étude. Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen
- [16] Pottie, G., & Kaiser, W. (2000). Wireless integrated network sensors communication of the ACM. 43(5), 51-58.
- [17] Postma, A. (1998). CLASSES OF BYZANTINE FAULT-TOLERANT ALGORITHMS FOR DEPENDABLE DISTRIBUTED SYSTEMS. université twente.
- [18] Sesli, E., & Hacıoğlu, G. (2017). Contiki OS Usage in Wireless Sensor Networks wsn.
- [19] Mohammed Belbachir, M. (2014). Stratégie de tolérance aux pannes pour un routage efficace dans les réseaux de capteurs. Mémoire de Magistère. Université Tlemcen abou bekr belkaid.
- [20] Yasmine, D. (2018). UN PROTOCOLE DE ROUTAGE TOLERANT AUX PANNE POUR LES RCSF. Thèse de Doctorat. Université de Batna 2.
- [21] Bouatit, M. N. (2018). Consulté le 15 mars 2024, Disponible sur : https://acommaret.github.io/fichiers/graphes_cours3.pdf
- [22] Chapitre3: Classification des capteurs. Récupéré sur https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/332614/mod_resource/content/1/Classification%20des%20capteurs.pdf.
- [23] CRSICT. (2020). Consulté le 18 février 2024, Université Badji Mokhtar-Annaba. Disponible sur : <https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/course/view.php?id=170#section-0>
- [24] DataScientest. (s.d.). Consulté le 12 mars 2024, Disponible sur : <https://datascientest.com/theorie-des-graphes-tout-savoir>
- [25] EUSEBIO, P., JEAN, M. F., & DAVID, L. Consulté le 26 avril 2024, Disponible sur <https://www.insee.fr/fr/information/3635442>
- [26] Grasland, c. (2001). Consulté le 9 mars 2024. Récupéré sur : http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/go303/ch2/doc_ch2.htm
- [27] Méthode Maths. (s.d.). Consulté le 16 mars 2024, Disponible sur : www.methodemaths.fr/theorie_des_graphes/
- [28] Moodle. (s.d.). Consulté le 11 mars 2024, Récupéré sur https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_52.html
- [29] Moodle. (s.d.). Consulté le 19 mars 2024, Récupéré su: https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.php/332614/mod_resource/content/1/Classification%20des%20capteurs.pdf
- [30] Session, I. (2021). Consulté le 15 mars 2024, Disponible sur: <https://martajv9.wixsite.com/theoriedegraphes/applications-et-utilit%C3%A9s>
- [31] Capteur. (2024). Consulté le 09 juin 2024, Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur>
- [32] Boukhiar, A. (2016). La tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire fin d'étude. UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA- BEJAIA.

- [33] Challal, Y. (2008). Réseaux de Capteurs Sans Fils (Version1). Systèmes Intelligents pour le Transport. Récupéré sur : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/>
- [34] Laaredj, K., & Messaoudi, G. (2020). Détection des pannes dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire fin d'étude. UNIVERSITE IBN KHALDOUN- TIARET.
- [35] Chapitre2: GRAPHE ET RESEAU. (s.d.). (2001). Consulté le 20 Avril 2024, Récupéré sur : http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/go303/ch2/doc_ch2.htm

Résumé :

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) jouent un rôle crucial dans la surveillance et la collecte de données dans divers environnements, offrant des avantages en termes de coût et de facilité de déploiement. Ce mémoire explore les méthodes pour améliorer la tolérance aux pannes des RCSF en utilisant des indicateurs globaux de position basés sur la théorie des graphes. Structuré en quatre chapitres, le travail couvre les principes fondamentaux des RCSF, la gestion des pannes, l'application de la théorie des graphes, et les simulations réalisées avec Contiki Cooja. Les résultats montrent que les indicateurs globaux de position sont efficaces pour diagnostiquer les faiblesses des réseaux et améliorer leur résilience.

Mot clé :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), Tolérance aux panne, Théorie des graphes, Les indicateurs globaux de position, Simulation Cooja-Contiki.

Abstract :

Wireless Sensor Networks (WSNs) play a crucial role in monitoring and data collection across various environments, offering cost and deployment advantages. This thesis explores methods to enhance the fault tolerance of WSNs using global position indicators based on graph theory. Structured into four chapters, the work covers the fundamental principles of WSNs, fault management, the application of graph theory, and simulations conducted with Contiki Cooja. The results demonstrate that global position indicators are effective in diagnosing network weaknesses and improving their resilience.

Keyword :

Wireless Sensor Networks (WSNs), Fault Tolerance, Graph Theory, Global Position Indicators, Cooja-Contiki Simulation.

ملخص :

الشبكات اللاسلكية لأجهزة الاستشعار (WSNs) تلعب دوراً حاسماً في رصد وجمع البيانات في مختلف البيئات، مما يوفر مزايا في التكلفة وسهولة النشر. يستكشف هذا الأطروحة الطرق لتعزيز تحمل الأعطال لدى WSNs باستخدام مؤشرات الموقع العالمية استناداً إلى نظرية الرسوم البيانية. منظم إلى أربعة فصول، يغطي العمل المبادئ الأساسية لـ WSNs، وإدارة الأعطال، وتطبيق نظرية الرسوم البيانية، والمحاكاة المجرة باستخدام Contiki Cooja. تظهر النتائج أن مؤشرات الموقع العالمية فعالة في تشخيص نقاط ضعف الشبكات وتحسين قدرتها على التعافي.

الكلمات المفتاحية :

الشبكات اللاسلكية لأجهزة الاستشعار (WSNs)، تحمل الأعطال، نظرية الرسوم البيانية، مؤشرات الموقع، محاكاة Cooja-Contiki

