

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 des 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 (RID)

Thème

L'auto-organisation topologique pour la tolérance des pannes dans les réseaux de capteurs sans fil

Présenté par :

- 1) M^{elle}. BENDRA Imane Rabia
- 2) M^{elle}. BOUAFIA Fatima

Soutenu le 25/06/2023 devant le jury composé de :

M ^{me} BELGRANA Fatima Zohra	MCA	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Président
M ^{me} SAIDI Samira	MAA	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
M ^r MESSAOUDI Mohamed Amine	MCB	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Encadreur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nos remerciements s'adressent premièrement et avant tout au « **Bon Dieu** » pour nous avoir accordé le courage et la détermination nécessaires pour mener à bien ce modeste travail, et pour sa grâce tout au long de notre vie.

Nous tenons à exprimer ainsi nos sincères remerciements à notre encadreur **Dr. MESSAOUDI Mohamed Amine** pour son précieux accompagnement, son expertise et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses conseils éclairés, son encouragement constant et sa disponibilité ont été d'une valeur inestimable. Grâce à son expertise et à ses retours constructifs, nous avons pu améliorer notre travail et obtenir des résultats satisfaisants

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail. Leur évaluation et leurs commentaires joueront un rôle essentiel dans l'enrichissement de notre mémoire.

Sans oublier tous les enseignants du département des Mathématiques et Informatique.

Dédicace

À ma chère mère,

Pour l'affection infinie, la tendresse sans faille et l'amour inconditionnel dont tu m'as toujours entouré, Pour les sacrifices silencieux et le dévouement sans relâche dont tu as toujours fait preuve, Pour chaque instant où tu m'as encouragé à croire en moi-même et à poursuivre mes rêves.

À mon cher père,

Ta présence me manque chaque jour. Tu restes à jamais dans mon cœur.

À ma chère tante,

Tu es la personne la plus idéale dans ce monde, et ton amour et ta bienveillance sont inégalables.

À mes chères cousines Assma, Meriem, Chaima,

Vous êtes comme des sœurs pour moi. Notre lien familial est précieux et je chéris chaque moment passé avec vous.

À mes chères copines Amel, Chahinez, Imane,

Votre présence dans ma vie apporte de la joie et du réconfort, et je suis honoré de vous avoir comme amies.

Avec tout mon amour et ma gratitude

BOUAFIA Fatima

Dédicace

À mes chers parents, frères, ma famille

Cette dédicace est une humble expression de ma reconnaissance, admiration et amour envers vous tous. Vos sacrifices, soutien inconditionnel et affection ont marqué ma vie d'une manière indélébile. Que ce travail modeste soit le témoignage de vos vœux exaucés et des efforts inlassables que vous avez déployés pour mon bien-être et ma réussite. Je sais que je ne pourrai jamais vous rendre pleinement ce que vous avez fait pour moi, mais je souhaite que Dieu vous accorde une santé florissante, un bonheur sans limite et une longue vie. Je m'efforcerai toujours d'être à la hauteur de vos attentes et de ne jamais vous décevoir.

Ma famille, vous êtes une source inestimable d'affection et de soutien. À travers les moments partagés avec mes frères, nous avons construit des liens indéfectibles et créé des souvenirs inoubliables. Je suis chanceuse de vous avoir à mes côtés.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui composent ma merveilleuse famille, je souhaite exprimer ma gratitude et mon amour envers chacun d'entre vous.

Enfin, je tiens à dédier une mention spéciale à **mon binôme**. Notre collaboration a transcendé le cadre du travail, créant une amitié solide et une complicité précieuse. Ta présence et ton soutien m'ont inspirée et donné la force de relever les défis. Je suis infiniment reconnaissante de t'avoir à mes côtés.

Merci à toutes personnes qui ma soutenues.

Bendra Imane Rabia

Table des matières

Introduction générale.....	1
Introduction aux réseaux de capteurs sans fil.....	4
I.1 Introduction	4
I.2 Les capteurs	4
I.2.1 Définition d'un capteur.....	4
I.2.2 Caractéristique principales d'un capteur sans fil.....	5
I.2.3 Les types de capteurs	5
I.2.4 Architecture d'un capteur	6
I.3 Réseau de capteur sans fil	8
I.3.1 Définition d'un réseau de capteur sans fil.....	8
I.3.2 Définition d'un réseau ad hoc	8
I.3.3 comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad hoc	8
I.3.4 Caractéristiques des réseaux de capteurs	9
I.3.5 Contraintes de conception des RCSF.....	10
I.3.6 Les objectifs d'un RCSF.....	11
I.3.7 Types de réseaux de capteurs sans fil	11
I.3.8 Architecture d'un réseau de capteurs sans fils.....	13
I.3.9 La communication dans RCSF (Le fonctionnement de la pile protocolaire).....	14
I.3.10 Les technologies de transmission dans les RCSF	16
I.3.11 Avantages et inconvénients des RCSF	17
I.3.12 Domaine d'application des RCSF.....	18
I.4 Conclusion.....	19
La tolérance aux pannes dans les RCSFs	20
II.1 Introduction	20
II.2 Les pannes dans les réseaux de capteurs	20
II.2.1 Définition de concepts.....	20
II.2.2 Classification des pannes	21
II.2.3 Origines des pannes dans les RCSF s.....	23
II.2.4 Gestion des pannes dans RCSF s.....	25
II.3 La tolérance aux pannes dans les Réseaux capteurs sans fil	28
II.3.1 Définition de la tolérance aux pannes	28
II.3.2 Importance de la tolérance aux pannes dans les RCSF	28
II.3.3 Procédure générale de tolérance aux pannes	29
II.3.4 Exemple de tolérance aux pannes dans un réseau de capteurs	30

II.3.5 Classification des techniques de tolérance aux pannes.....	31
II.3.6 Approches tolérantes aux pannes dans les RCSF	34
II.4 Conclusion.....	38
Auto-organisation des RCSFs.....	39
III.1 Introduction.....	39
III.2 Auto organisation.....	39
III.2.1 Définition d’auto organisation.....	39
III.2.2 Objectifs de l’auto organisation.....	39
III.2.3 Les principales structure d’auto organisation.....	40
III.2.4 Les protocoles d’auto organisation.....	41
III.3 L’état de l’art.....	44
III.3.1 Quelques processus importants dans stratégie NARF.....	47
III.3.2 Procédure de l’approche NARF	50
III.4 Conclusion	59
Simulation et discussion des résultats.....	60
IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Environnement de simulation.....	60
IV.3 Outils d’implémentation et de simulation.....	60
IV.3.1. Aperçu sur le système d’exploitation CONTIKI	61
IV.3.2 Simulateur COOJA	61
IV.4 Implémentations et déroulements de SIMULATION.....	65
IV.4.1 Paramètres des simulations et hypothèses.....	65
IV.4.2 Stratégie de déroulement des simulations	66
IV.4.3 Approche de CLUSTERING pour la tolérance aux pannes.....	66
IV.4.4 Topologies et formation de clusters	67
IV.4.5 Déroulement des simulations	68
IV.5 L’évaluation des performances (comparaison)	72
IV.5.1 Comparaisons des temps de construction du DODAG	72
IV.5.2 Comparaison consommation d’énergie	75
IV.6 Conclusion	78
Conclusion générale.....	79
Bibliographie	81

Liste des figures

Figure n°I.1 : Fonctionnement d'un capteur sans fil	5
Figure n°I.2 : Exemples des nœuds de capteurs	6
Figure n°I.3 : Architecture matérielle d'un nœud capteur	6
Figure n°I.4 : Architecture des réseaux capteurs sans fil	14
Figure n°I.5 : La pile protocolaire des RCSF	15
Figure n° II.1 : La trilogie Faute/ Erreur/ Panne	21
Figure n° II.2 : Classification des pannes	21
Figure n°II.3 : Procédure de la tolérance aux pannes	29
Figure n°II.4 : Réseau de capteur multimodal.....	30
Figure n°II.5 : Mécanisme Publish/Subscribe	34
Figure n°II.6 : Recouvrement de routes dans PEQ	35
Figure n°III.1 : Les 4 stratégies principales d'auto organisation.....	40
Figure n°III.2 : Principe du protocole CDS-règle k.....	42
Figure n°III.3 : Élagage des liens avec RNG	43
Figure n° III.4: Élagage du lien pour GG.....	44
Figure n°III.5 : Comparaison des topologies RNG et GG.....	44
Figure n° III.6 : Classification des topologies de réseau de capteurs sans fil.....	47
Figure n° III.7 Modèle à multi sauts en regroupement	48
Figure n°III.8 : Mouvement en cascade	53
Figure n°III.9 Détection de tête de cluster échouant	53
Figure n°IV.1 -Lancement du simulateur Cooja.....	62
Figure n°IV.2 - L'interface principale du simulateur Cooja.....	62
Figure n°IV.3 – Création d'une nouvelle simulation.....	63
Figure n°IV.4 •Création des nœuds (capteurs)	64
Figure n° IV.5 -Nombre de nœud ajouté	64
Figure n° IV.6 – Organigramme de simulation	66
Figure n° IV.7 -Les différentes topologies de simulation (a)29 nœuds (b).40noeuds (c).50noeuds.....	67
Figure n° IV.8 – Formation du DODAG • Avant déclenchement d'action correctif	69
Figure n°IV.9 – Formation du DODAG• durant déclenchement d'action correctif	69
Figure n°IV.10 • Scénarios de remplacement des nœuds défailants.....	70
Figure n° IV.11 – Formation du DODAG• après déclenchement d'action correctif	72
Figure n° IV.12 -Temps de construction de DODAG Scénario 1	72

Figure n° IV.13 -Temps de construction de DODAG Scénario 2.....	74
Figure n° IV.14 - Comparaison d'énergie pour les différentes NBR des nœuds avant et après le déclenchement de l'action correctif, (Mouvement direct-cascade) pour les différentes métriques – S1	76
Figure n° IV.15 - Comparaison d'énergie pour les différentes NBR des nœuds avant et après le déclenchement de l'action correctif, (Mouvement direct-cascade) pour les différentes métriques – S2	77

Liste des tableaux

Table n°I.1 : Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc.....	8
Table n°IV.1 : Les paramètres de simulation.....	65

Liste des abréviations

BAN : Body Area Network

BS : station de base

CAN : Convertisseur analogique / numérique

CH : Clusterheads

CPU : Unité centrale de traitement

DODAG : Directed Acyclic Graph

ETX : Expected Transmission Count

GPS : Global Position System

ISM : industrielles, scientifiques et médicales

MAC : contrôle d'accès au support

Mbps : Mégabits par seconde

MMT : Minimum Movement Technique

MWSN : Le réseau de capteurs sans fil mobile

NARF : Novel approach for replacement of a Failure Node in Wireless sensor network

PDA : Personal digital assistant

PDA : Personal digital assistant

RCSF : Réseaux des Capteurs Sans Fil

RPL : Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

TDMA : Accès Multiple par Répartition dans le Temps

TinyOS : Micro threading Operating System

Wifi : Wireless Fidelity

WSN : Wireless Sensor Network

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, la technologie sans fil a considérablement transformé notre vie quotidienne depuis son introduction sur le marché. Elle a apporté de nombreuses nouvelles fonctionnalités, ainsi qu'une connectivité accrue entre les personnes, les objets et les informations. L'évolution du paradigme sans fil a vu l'émergence de différentes architectures dérivées, telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil et les réseaux Ad hoc. Actuellement, l'attention se concentre sur les réseaux de capteurs sans fil.

Les réseaux de capteurs sans fil (**RCSF**) ou "Wireless Sensor Network" (**WSN**), sont des réseaux de petits appareils électroniques autonomes équipés de capteurs, capables de s'auto organiser pour surveiller une zone donnée. Ces capteurs collaborent entre eux et remontent l'information de nœud en nœud jusqu'à l'aboutissement à la station de base. Ils ont suscité un intérêt mondial, ce qui a incité leur utilisation dans de nombreux secteurs pour améliorer la vie humaine, tels que les réseaux intelligents, les systèmes de surveillance et de contrôle, les systèmes de santé, les maisons intelligentes, les systèmes de transport intelligents, etc. Pour de telles applications, les RCSFs permettent d'assurer diverses tâches telles que la surveillance en temps réel de l'environnement, la collecte de données à distance, la collaboration entre les capteurs et l'efficacité énergétique. Ils permettent également une analyse constante des données pour une prise de décision efficace, une meilleure gestion des systèmes automatisés, une surveillance à distance des systèmes critiques et une réduction des coûts. Pour accomplir ces tâches avec succès, les RCSFs doivent être robustes, tolérants aux pannes et autonomes en énergie.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, il n'est pas parfait et fait face à de nombreux défis à cause de leur déploiement dans des zones hostiles, de leur faible coût et de l'impossibilité de changer leurs batteries. Les capteurs peuvent être soumis à diverses formes de défaillances, telles que la perte d'énergie ou des dommages physiques, ce qui peut entraîner une défaillance des nœuds ou des liaisons de communication et affecter la performance et la durée de vie du réseau. Pour faire face à ces défis, la tolérance aux pannes est une considération importante pour garantir le bon fonctionnement du réseau même en présence de défaillances. L'auto organisation est une stratégie couramment utilisée, où un nombre minimal de capteurs est impliqué dans la formation des réseaux au début, tandis que les autres passent au mode veille pour économiser leur batterie et prolonger la durée de vie du réseau. Lorsqu'un capteur cesse de fonctionner et que le réseau perd sa connectivité, un autre capteur situé dans son voisinage prend le relais en passant au mode actif pour le remplacer, assurant ainsi une connectivité continue du réseau. En utilisant cette stratégie, les RCSF peuvent être rendus plus robustes et résilients.

Notre projet de fin d'étude vise à proposer une solution pour assurer la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sans fil. Pour ce faire, nous proposons l'utilisation de nœuds redondantes qui se déplacent entre les capteurs pour remplacer les nœuds défaillants. Cette approche permet de détecter préventivement les pannes et de déclencher le processus d'auto organisation avant que la panne n'affecte gravement le fonctionnement du système. Ainsi, même en cas de défaillance de certains composants, le réseau est maintenu en bon état de fonctionnement. Pour mener à bien notre travail, nous avons organisé notre travail autour de quatre chapitres encadrés par une introduction et une conclusion, précédés par une introduction générale

Le premier chapitre, intitulé "Introduction aux réseaux de capteurs sans fil", aborde de manière approfondie les notions clés liées à ces réseaux. Nous examinerons en détail leur architecture, leurs caractéristiques et leurs différentes typologies. De plus, nous étudierons les contraintes de conception spécifiques à ces réseaux ainsi que les objectifs de communication qui leur sont associés. Enfin, nous explorerons les divers domaines d'application dans lesquels les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés. De plus, nous étudierons

Dans notre deuxième chapitre, intitulé "Tolérance aux pannes dans les RCSFs", nous explorons les différents concepts relatifs aux pannes et à la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous abordons les caractéristiques et les causes des pannes dans ces réseaux, ainsi que les approches et solutions proposées pour assurer la tolérance aux fautes.

Le troisième chapitre de notre mémoire, intitulé "Auto-organisation des RCSFs", est divisé en deux parties. La première partie explore les différentes notions et techniques d'auto-organisation, ainsi les différents travaux réalisés jusqu'à maintenant. La deuxième partie se concentre sur une approche spécifique appelée NARF (Nouvelle Approche de Remplacement d'un Nœud Défaillant). Nous y exposons les concepts clés de cette approche et en détaillons les aspects principaux.

Dans le quatrième chapitre, intitulé "Simulation et discussion des résultats", nous fournissons une analyse détaillée de l'outil utilisé pour la simulation, des différentes structures utilisées et de la technique du clustering mise en œuvre pour améliorer la tolérance aux pannes. Nous présenterons deux scénarios de remplacement des nœuds défaillants : l'utilisation de nœuds redondants au sein du même cluster et la recherche de nœuds redondants dans des clusters voisins. Les critères de sélection des nœuds redondants, tels que l'énergie, la fiabilité et la distance, seront étudiés, et nous évaluerons les performances en termes de temps de construction du DODAG et de consommation d'énergie après le remplacement des nœuds. Les résultats de nos simulations mettront en évidence les variations du temps de génération du DODAG et de consommation d'énergie après l'activation de l'action de remplacement des nœuds défaillants en fonction des métriques utilisées et du nombre de nœuds.

INTRODUCTION GENERALE

Ainsi que les mouvements des nœuds redondants pour remplacer les nœuds défailants, que ce soit en mouvement direct ou en cascade.

Et enfin nous résumerons les résultats obtenus et proposerons des perspectives futures visant à améliorer la solution proposée dans le cadre de ce projet de fin d'étude.

Chapitre I

Introduction aux réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction

Les avancées technologiques récentes ont permis l'émergence de nouveaux types de réseaux, tels que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), qui gagnent en popularité. Les RCSFs sont formés de capteurs petits et économiques capables de collecter et transmettre des données environnementales (température, humidité, présence, gaz...etc.). Les caractéristiques les plus notables sont leur capacité d'auto-adaptation, collaboration, rapidité de déploiement, et le coût faible. Ils sont largement utilisés dans de nombreux domaines et sont considérés comme une solution rentable pour de nombreuses applications, notamment la surveillance de l'habitat, le contrôle de la qualité industrielle et les applications de commandement militaire, etc.

Dans ce chapitre, Nous allons explorer les réseaux capteurs sans fil. Nous exposerons tout d'abord la notion de réseau de capteurs, son architecture ainsi que ses types et ses caractéristiques, puis ses contraintes de conception ainsi que leurs objectifs et leurs communications et ainsi ses domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil et en termine par une petite conclusion.

I.2 Les capteurs

I.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur, habituellement appelé nœud, est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat. Il transforme l'état d'une grandeur physique (telles que la température, les vibrations et la pression) observée en une grandeur utilisable (intensité électrique, tension ou charge) [1]. Cependant chaque capteur assure trois fonctions principale [2] :

- Acquisition des données.
- Calculer des informations à l'aide des valeurs collectées.
- Communiquer ces données aux réseaux via les onde radio, a une autre entité (nœud, station de base) à courte portée.

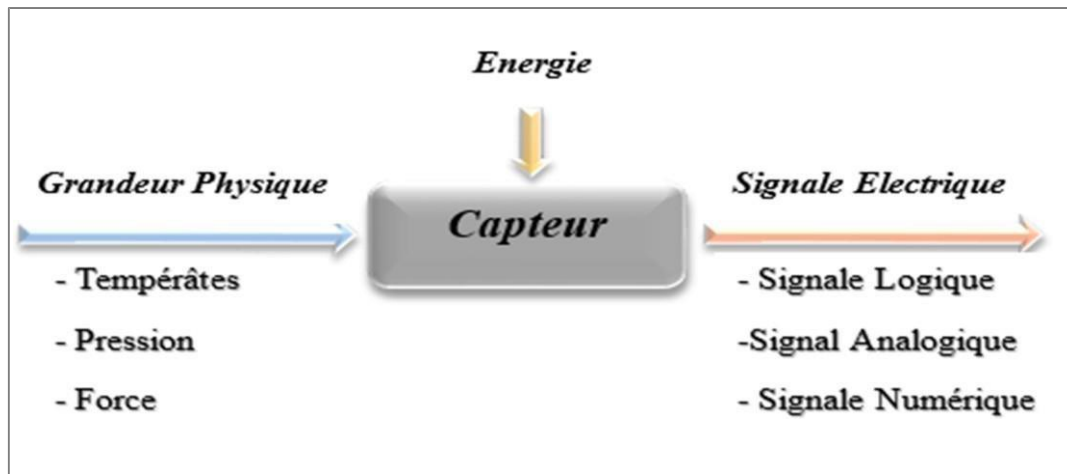


Figure n°I.1 : Fonctionnement d'un capteur sans fil

I.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 [3] :

- **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.

I.2.3 Les types de capteurs

Étant le neurone d'un RCSF, le type de capteur définit le ou les paramètres physiques à détecter.

Il y a une multitude de modèles des capteurs en relation avec l'application à laquelle il est destiné.

- **Systèmes micro électromécaniques (MEMS)** : capteurs tels que les gyroscopes, les accéléromètres, les magnétomètres, capteurs de pression, les capteurs à effet pyroélectrique et les capteurs acoustiques.
- **Capteurs à base de CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)** : utilisés pour détecter les niveaux de température, humidité, proximité capacitive et les compositions chimiques.

- Capteurs LED (Light Emitting Diode) : utilisés pour la détection de la lumière ambiante, la détection de proximité et les compositions chimiques.

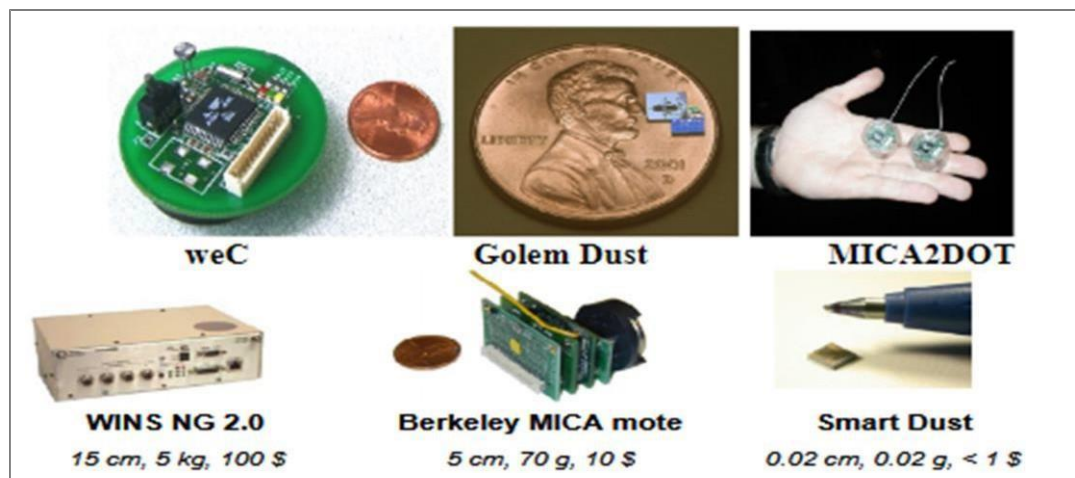


Figure n°I.2 : Exemples des nœuds de capteurs [3].

I.2.4 Architecture d'un capteur

I.2.4.1 Architecture matérielle d'un capteur

Un capteur est composé essentiellement de quatre unités de base : unité de captage, une unité de traitement, une unité de communication, stockage, et énergie. Ainsi des composants additionnels sont ajoutés selon le domaine d'application [4], tels qu'un système de localisation comme par exemple un GPS, un mobilisateur chargé de déplacer le micro capteur en cas de nécessité et un générateur d'énergie exemple une cellule solaire [5], comme montre la figure I.3.

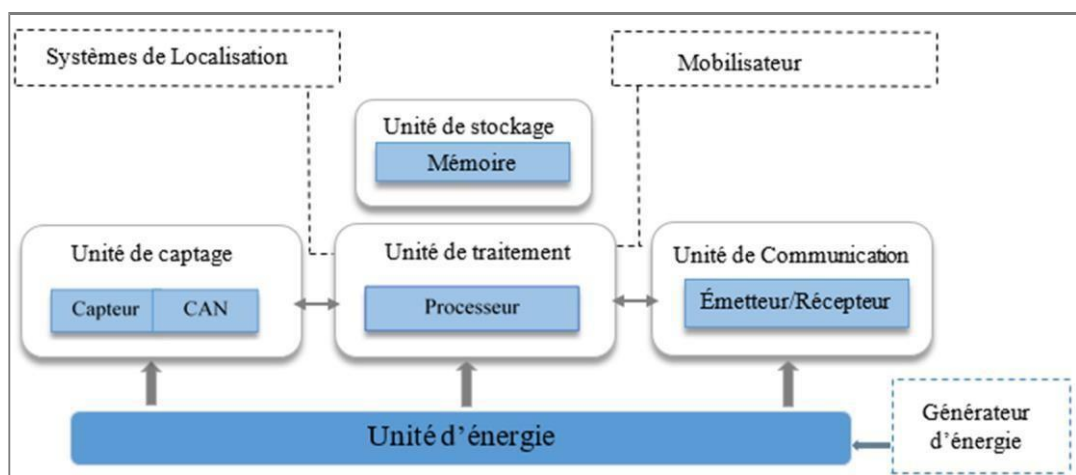


Figure n°I.3 : Architecture matérielle d'un nœud capteur

- **Unité de captage** : La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Il est généralement composé de deux (02) sous-unités : le capteur lui-même qui permet de capter le phénomène à observer, et un convertisseur analogique / numérique (CAN). Ce dernier transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage [6].
- **Unité de traitements** : C'est l'unité principale du capteur, est composée d'un processeur et d'une mémoire intégrant, un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteur (Tel que TinyOS). Il est utilisé pour effectuer des tâches telles que la compression, le cryptage et le filtrage des données, afin d'optimiser la transmission des données sur le réseau. [7]
- **Unité de communication** : Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil. [8]
- **Unité de stockage** : Unité de stockage inclut la mémoire de programme et la mémoire de donnée. Généralement la taille de cette mémoire est limitée. [9]
- **Unité d'énergie** : L'énergie est nécessaire pour les nœuds, elle effectue des opérations de contrôle de l'énergie restante et de mesure de la durée de vie du capteur. Et il peut s'agir d'une source indépendante comme une batterie, ou elle peut être chargée de l'extérieur par un appareil de la récolte énergétique qui lui permet de le faire par exemple à partir d'une source d'énergie solaire [10]
- **Système de localisation** : pour pouvoir déterminer la position du nœud.
- **Mobilisateur** : permet le changement de position du nœud.

I.2.4.2 Architecture logiciel d'un capteur

En plus des plateformes matérielles et des standards, plusieurs plateformes logicielles ont été également développées spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil. La plateforme la plus répandue est le TinyOS, qui est un système d'exploitation open source conçu pour les RCSF [11]. Il existe autre system exploitation tel que OSPM, SenOs, PicOs, MagnetOs, mais TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RCSF. Le rôle de tout systèmes exploitation (OS) est de promouvoir le développement de logiciel d'application fiables en fournissant une abstraction pratique et sûre des ressources matérielles [12].

I.3 Réseau de capteur sans fil

I.3.1 Définition d'un réseau de capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil RCSF ou WSN (Wireless Sensor Network) est un type spécifique de réseau ad hoc, un réseau décentralisé de petits appareils à faible consommation et peu coûteux équipés de capteurs, de processeurs et de capacités de communication sans fil. Ces capteurs sont placés plus ou moins aléatoirement dans une zone géographique appelée zone de chalandise (zone de couverture), ou zones d'intérêt [1], et fonctionnent ensemble pour collecter, traiter et transmettre des données sur un environnement ou un système à un dispositif appelé un nœud sink, ou station de base, qui le traite, en calculant par exemple le maximum, la moyenne ou la médiane [13].

I.3.2 Définition d'un réseau ad hoc

Un réseau ad hoc, appelé généralement MANET, sont des réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement. Les nœuds peut communiquer directement (mode point à point) avec n'importe quel nœud s'il est situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires [14].

I.3.3 Comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad hoc

Le tableau I.1 présente une comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc

Réseaux capteurs sans fil	Réseaux ad hoc
Nombre des nœuds réduit	Nombre des nœuds élevé
Les nœuds collaborent pour remplir un Objectif	Chaque nœud a son propre objectif
Flot «Any to many»	Flot de données «many to one»
Utilisation du broadcast	Communication point à point
Utilisation pour la surveillances en temps réel et pour collecte de donner	Utilisations dans urgences, zone sans couverture réseaux

Table n°I.1 : Comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc.

I.3.4 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs, nous citons :

- **Energie limitée** : L'énergie est considérée comme une ressource précieuse dans les RCSF. Elle représente la contrainte la plus importante dans la majorité des applications. Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie [15] pour atteindre cette autonomie, il est crucial de minimiser la consommation moyenne des capteurs. D'où pour préserver son énergie, il devrait passer en mode actif que lorsqu'il a de l'information à transmettre ou à recevoir, extraire l'énergie de l'environnement (énergie solaire, vibrations mécaniques, bruit acoustique et éviter les transmissions et les réceptions redondantes.
- **Petite portée de transmission** : La portée de transmission est limitée par la puissance du signal et la capacité de rayonnement des antennes utilisées, donc s'il y a une distance suffisante entre deux nœuds, le risque de perte de données entre nœuds est élevé et le coût de l'énergie est élevé [16].
- **Puissance de traitement et de stockage** : En raison de cout et de miniaturisation des capteurs, généralement des microcontrôleurs sont choisis comme unité de traitement pour les capteurs [17] [18]
- **Déploiement** : Les réseaux de capteurs sans fil qui nous intéressent sont souvent caractérisés par des déploiements à haute densité et à grande échelle. On distingue deux méthodes utilisation des nœuds capteurs :
 - **Méthode aléatoire** : Les nœuds sont distribués (largués par des avions par exemple) sur la zone de captage en raison de la difficulté d'accès à la zone.
 - **Méthode déterministe** : Les nœuds sont placés individuellement (emplacement précis dans la zone de captage). Toutefois, le plan général des déploiements initiaux doit être conçu pour réduire les coûts d'installation et promouvoir l'auto organisation et la tolérance aux pannes des nœuds. [19]
- **Durée de vie** : L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. Il faut donc que les capteurs gardent leurs énergies autant que possible afin de pouvoir travailler longtemps [20].

- **Auto organisation du réseau** : L'auto organisation dans les réseaux de capteurs fait référence à la capacité d'un réseau de points de capteurs à s'auto configurer et à s'adapter aux conditions changeantes du réseau sans nécessiter d'intervention humaine, ce qui peut être nécessaire dans de nombreux cas. Par exemple lorsqu'un nœud est inséré ou retiré (en raison d'une coupure de courant ou d'une destruction physique), le réseau doit donc pouvoir se reconfigurer pour continuer sa fonction.

I.3.5 Contraintes de conception des RCSF

La conception du RCSF est influencée par plusieurs facteurs, des technologies permanente et manipulée de manière appropriée :

- **Contrainte énergétique** : L'énergie est considérée comme la contrainte principale dans un réseau de capteurs lors de la transmission et la réception des données entre les nœuds. L'énergie doit être bien utilisée, de sorte que les piles ne s'épuisent pas rapidement. Les piles ne sont pas parfois facilement remplaçables dans des applications telles que la surveillance d'une zone inaccessible [21].
- **La tolérance aux pannes** : La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs. Certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence [22]. Par conséquent, ces pannes peuvent causer un dysfonctionnement du réseau et entraver ce dernier à effectuer sa mission dans des conditions favorables.
- **Contraintes liées à l'environnement** : Les capteurs interagissent avec l'environnement où ils mesurent leurs grandeurs physiques. Les nœuds de capteurs doivent être conçus pour résister une variété de conditions environnementales difficiles (chaleur extrême, pluie, Humidité). [23]
- **Contraintes de passage à l'échelle** : Le passage à l'échelle (scalability) indique que le réseau est suffisamment large et peut croître de manière illimitée. L'une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines ou des milliers de nœuds capteurs. C'est d'ailleurs la principale utilité des réseaux de capteurs qui doivent pouvoir s'auto organiser à une grande échelle et être efficace quel que soit le nombre. Pour cela les protocoles des réseaux de capteurs sans fil doivent être capables de fonctionner et de s'adapter selon le nombre de nœuds.
- **Contraintes liées à la qualité de service** : La qualité se définit par la capacité d'interpréter l'information collectée par le puits.

- **La sécurité** : La sécurité physique et la sécurité des communications sont l'une des contraintes essentielles surtout dans les applications critiques telles que les applications militaires ou les applications médicales. Ils peuvent être vulnérables aux menaces de sécurité, telles que le piratage, la falsification et le vol de données, qui peuvent compromettre la sécurité et la confidentialité des données collectées par le réseau.

I.3.6 Les objectifs d'un RCSF

Les objectifs de base des RCSFs dépendent généralement des applications, cependant les tâches suivantes sont communes à plusieurs applications [24] :

- **Déterminer les valeurs de quelques paramètres suivant une situation donnée.** Par exemple, dans un réseau environnemental, on peut chercher à connaître la température, la pression atmosphérique, la quantité de la lumière du soleil, et l'humidité relative dans un nombre de sites, etc.
- **Détecter l'occurrence des événements dont on est intéressé et estimer les paramètres des événements détectés.** Par exemple, dans les réseaux de contrôle de trafic, on peut vouloir détecter le mouvement de véhicules à travers une intersection et estimer la vitesse et la direction du véhicule.
- **Classifier l'objet détecté.** Par exemple, Dans un réseau de trafic, un véhicule est-il une voiture, un bus.

I.3.7 Types de réseaux de capteurs sans fil

Selon l'environnement dans lequel les nœuds de capteurs sont déployés, différents types de réseaux peuvent être distingués qui font face à différents défis et contraintes, tels que les réseaux de capteurs terrestre, souterrain, sous-marin, multimédia et mobile [25].

I.3.7.1 Les réseaux de capteurs terrestres

Se composent généralement de centaines à des milliers de nœuds de capteurs sans fils peu coûteux déployés dans une zone donnée, soit de manière pré planifiée, soit de manière ad hoc [1]. Les nœuds capteurs terrestres sont déployés dans un environnement dense pour communiquer efficacement les données collectées vers la station de base. La fiabilité de cette communication représente un enjeu très important pour ce type de réseau. Ainsi la limitation en termes d'énergie de capteur est un autre défi, lorsque sa batterie ne peut être rechargeable. Pour certaines applications, les nœuds capteurs terrestres peuvent être équipés d'une source d'alimentation alternative telle que l'énergie solaire. Pour un réseau de capteurs terrestre, l'énergie peut être conservée à travers un acheminement optimal multi saut des données.

I.3.7.2 Les réseaux de capteurs souterrains

Les réseaux de capteurs souterrains [26] consistent en un groupe de nœud capteurs enterrés sous terre ou dans une grotte ou une mine ou des installations de stockage souterraines. Ils sont utilisés pour surveiller la température, l'humidité et les niveaux de gaz, ainsi que pour suivre l'inventaire et le personnel. Le coût d'un réseau de capteurs souterrains est plus élevé que celui d'un réseau de capteurs terrestres cela est dû aux difficultés d'équipement, de déploiement et de maintenance. Les WSN souterrains sont confrontés à des défis uniques, tels qu'une communication en visibilité directe limitée et des conditions environnementales difficiles, qui nécessitent des capteurs et des protocoles de communication spécialisés.

I.3.7.3 Les réseaux de capteurs sous-marins

Les réseaux de capteurs sous-marins [27,28] sont constitués de nœuds ancrés au fond de la mer ou les océans, les lacs ou amarrés sur des véhicules autonomes déployés sous l'eau. Ils sont utilisés pour la recherche océanographique, la surveillance de la qualité et de la température de l'eau et le suivi des animaux aquatiques. Les WSN sous-marins sont confrontés à des défis spécifiques, tels que la durée de vie limitée de la batterie en raison de la haute pression, la portée de communication limitée et le besoin de capteurs spécialisés pouvant fonctionner dans un environnement sous-marin.

I.3.7.4 Les réseaux de capteurs multimédias

Des réseaux de capteurs multimédias sans fil [29] ont été proposés pour surveiller et suivre des événements sous des formes multimédias telles que la vidéo, l'audio et les images. Un RCSF multimédia se compose de nombreux nœuds de capteurs à faible coût équipés de caméras et de microphones. Ils sont utilisés dans la sécurité et la surveillance, ainsi que dans le divertissement et le sport. Les RCSF multimédias doivent avoir une communication à haut débit et à faible latence, ainsi que la capacité de gérer de grandes quantités de données.

I.3.7.5 Les réseaux de capteurs mobiles

Le réseau de capteurs sans fil mobile (MWSN) se compose de capteurs équipés de plateformes de locomotives pour suivre le mouvement après le déploiement initial [30]. Ils sont utilisés pour suivre le mouvement et l'emplacement des personnes, des actifs et des véhicules. Les WSN mobiles doivent être très économes en énergie, compacts et durables, ainsi que capables de gérer des changements d'emplacement rapides et fréquents.

I.3.8 Architecture d'un réseau de capteurs sans fils

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de : plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement des données [31]. Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de trois composants principaux :

- **Nœuds capteurs** : Ce sont les appareils qui collectent et traitent les données de l'environnement, dispersés dans une zone géographique, appelée champ de capture qui définit la zone d'intérêt pour le phénomène observé. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles. Ils comprennent généralement des capteurs, un microcontrôleur et un émetteur-récepteur radio.
- **SINK** : Le sink 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. La station de base ou le nœud puits constitue une passerelle entre le réseau de capteurs et l'utilisateur final [1]. Ainsi, les stations de base possèdent beaucoup plus de capacités que les capteurs tant au niveau De la mémoire que de la vitesse de traitement ou des réserves en énergie [32].

Il y a essentiellement trois types de puits (Sink) [33] :

1. Un nœud appartenant au réseau comme n'importe quel autre nœud.
 2. Une entité extérieure au réseau. Le Sink peut être un dispositif extérieur, par exemple, un ordinateur portable ou un PDA interagissant avec le réseau.
 3. Une passerelle vers un autre réseau tel qu'Internet, où la demande de l'information vient d'un certain centre de traitement lointain.
- **Centre de données** : Il s'agit du point central de communication du réseau. Elle est chargée de collecter les données des nœuds de capteurs et procédez comme suit :
 - Extraire de l'information utile exploitable.
 - Le centre de traitement peut être éloigné du sink, alors les données doivent être transférées travers un autre réseau.

En plus de ces composants, les réseaux de capteurs sans fil peuvent également inclure des dispositifs supplémentaires tels que des routeurs et des passerelles, qui sont utilisés pour transférer des données entre différentes parties du réseau.

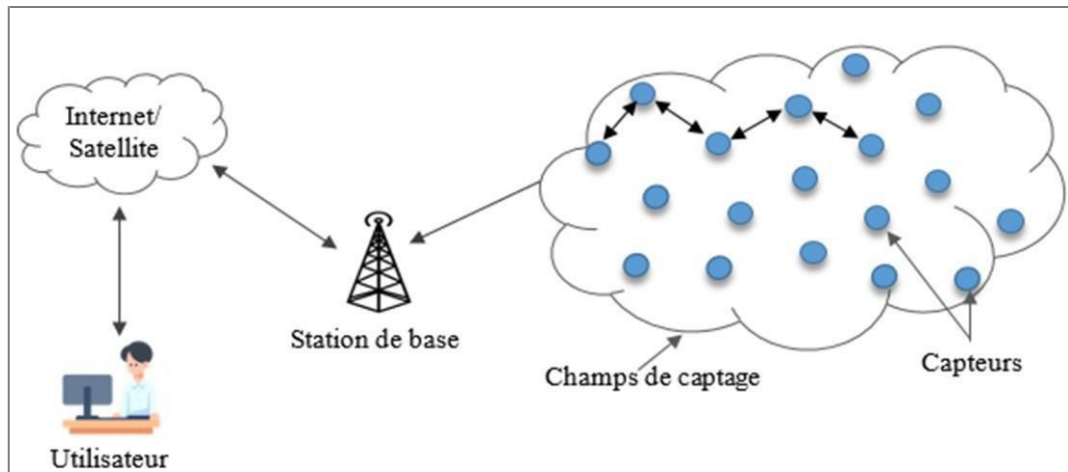


Figure n°I.4 : Architecture des réseaux capteurs sans fil

I.3.8.1 Topologies d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être organisés en différentes topologies, telles que [34] :

- **Topologies en étoile** : Dans une topologie en étoile, tous les nœuds capteurs communiquent directement avec un nœud central (la station de base).
- **Topologie maillée** : Les nœuds peuvent communiquer directement entre eux et avec la station de base.
- **Topologie hiérarchique** : Les nœuds sont organisés en plusieurs niveaux, avec la station de base au niveau supérieur et les nœuds capteurs aux niveaux inférieurs.

Le choix de la topologie dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que l'évolutivité, la tolérance aux pannes et la consommation d'énergie.

I.3.9 La communication dans RCSF (Le fonctionnement de la pile protocolaire)

Les réseaux de capteurs imposent de nouvelles restrictions de conception pour les protocoles de communication et ces protocoles doivent prendre en compte les limitations de conception de RCSF (nouvelle pile de protocoles). La pile de protocoles se compose de cinq couches [35] :

1. **Couche d'application** : La couche la plus élevée qui fournit des services spécifiques à l'application, tels que la collecte et le traitement des données, la détection des événements et la transmission des données vers d'autres systèmes.

2. **Couche transport** : La couche qui fournit un transfert de données fiable et efficace entre les nœuds. Il gère des problèmes tels que le contrôle de flux, la correction d'erreurs et la retransmission des paquets perdus.
3. **Couche réseau** : La couche est responsable de la gestion de la topologie, de l'adressage et du routage du réseau.
4. **Couche liaison de données** : La couche qui fournit une livraison fiable des trames de données entre les nœuds. Il gère des problèmes tels que la détection et la correction des erreurs, le contrôle de flux et le contrôle d'accès au support.
5. **Couche physique** : La couche la plus basse qui gère la transmission physique des données sur le support sans fil, comme les signaux de radiofréquence (RF).

En plus des 3 niveaux (plan) :

1. **Plan de gestion de l'énergie** : Gérez la consommation d'énergie.
2. **Plan de gestion de la mobilité** : Gestion des mouvements de nœuds.
3. **Plan de gestion des tâches** : Equilibrer les tâches entre les nœuds et économiser l'énergie.

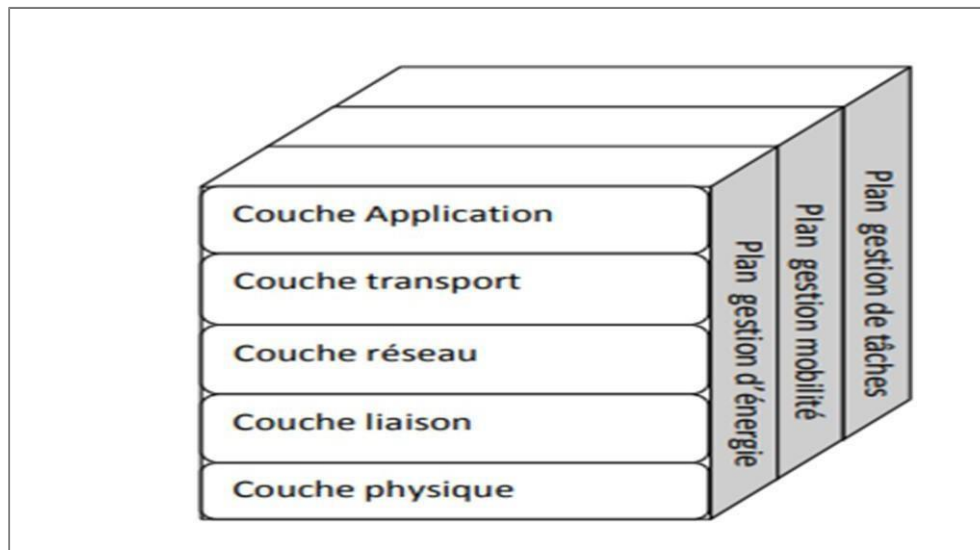


Figure n°I.5 : La pile protocolaire des RCSF

I.3.10 Les technologies de transmission dans les RCSF

La communication est un aspect important des réseaux de capteurs sans fil (WSN). La communication entre les nœuds capteurs permet aux données d'être pondérées, traitées et transmises à un nœud central ou à une station de base pour une analyse plus approfondie. Dans les WSN, la communication est généralement sans fil et repose sur divers protocoles de communication tels que : Wifi, le Bluetooth, et les communications radio Zig Bee.

- **Wi Fi (IEEE 802.11)**

Un protocole à haut débit de données couramment utilisé dans les WSN. Les réseaux Wi-Fi peuvent être utilisés pour les communications locales et étendues et offrent des fonctionnalités telles qu'un transfert de données rapide, une grande fiabilité et une configuration facile [36].

- **La technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1)**

Bluetooth [37,38] est une technique et un standard de communication radio de courte distance en utilisant des ondes radio. La communication permettant l'échange bidirectionnel de données. Son objectif est de simplifier les connexions entre les appareils électroniques en supprimant des liaisons filaires, généralement utilisée dans les téléphones mobiles et destinée pour simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Le seul inconvénient de cette technologie est sa grande consommation d'énergie. Il contient un débit théorique de 1 Mbps lui permettant une transmission de la voix, des données et des images.

- **La technologie Zig Bee (IEEE 802.15.4)**

Zig Bee est un système de communication sans fil de courte portée et de faible débit, faible consommation énergétique et d'une bonne souplesse d'installation [39]. Il est destiné pour les applications dans les réseaux personnels sans fil, principalement adopté dans l'implémentation des RCSF [40]. Il prend en charge les topologies en étoile et maillées et fournit des fonctionnalités telles que la formation de réseaux, la découverte de périphériques et la sécurité.

I.3.11 Avantages et inconvénients des RCSF

I.3.11.1 Les avantages

Parmi les avantages des réseaux de capteurs sans fil, on peut citer [1] :

- Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être facilement déployés dans divers environnements et emplacements, sans avoir besoin de connexions physiques.
- Les peuvent être moins coûteux à installer et à entretenir que les réseaux câblés.
- Les RCSF peuvent continuer à fonctionner même si un ou plusieurs capteurs tombent en panne, assurant ainsi la continuité de la collecte et de la transmission des données.
- Ils permettent une surveillance et une collecte de données en temps réel, fournissant des informations à jour sur l'environnement ou le système surveillé.

I.3.11.2 Les inconvénients

Les inconvénients des réseaux de capteurs sans fil peuvent être résumés comme suit :

- Les RCSF peuvent être soumis à des interférences provenant d'autres appareils et d'autres sources, ce qui peut perturber la communication et provoquer des erreurs dans la transmission des données.
- Ils peuvent être vulnérables aux menaces de sécurité, telles que le piratage et l'écoute clandestine, qui peuvent compromettre l'intégrité des données.
- Lorsque la taille du réseau augmente, il devient de plus en plus difficile de gérer et de maintenir le réseau, notamment en termes de puissance et de communication.
- Les réseaux capteurs sans fil peuvent être complexes à configurer et à entretenir, nécessitant des connaissances et des équipements spécialisés.

I.3.12 Domaine d'application des RCSF

La recherche dans le domaine du RCSFS connaît actuellement une révolution majeure, et ses applications prennent de plus en plus d'ampleur dans plusieurs domaines. Parmi eux, nous énumérons quelques domaines très importants :

I.3.12.1 Domaine militaire et sécurité

C'est le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs sans fil. Les RCSFs sont utilisés dans les opérations militaires et de sécurité pour avoir une meilleure connaissance de la zone de combat en particulier l'état des troupes et de l'armement, les changements de topologie du terrain, la détection et la collecte d'informations sur la position de l'ennemi, la reconnaissance des attaques nucléaires ou chimiques, surveillance des zones hostiles, détection d'attaques nucléaires, biologiques chimique et bactériologiques...

I.3.12.2 Domaine médical

La recherche sur l'usage des capteurs intelligents dans le domaine médical inclut les moyens d'hospitalisation à domicile, l'intégration des micro capteurs "sur ou dans" le corps (BAN : Body Area Network) et la gestion des urgences [41]. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, battements du cœur, À l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient [42]. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, ...) chez les personnes (handicapées ou âgées).

I.3.12.3 Domaine commercial et industrielles

Les RCSFs sont utilisés dans les processus industriels pour surveiller les machines, les processus de production et le suivi des stocks. Les WSN peuvent fournir des données en temps réel pour aider à optimiser la production, réduire les déchets et améliorer l'efficacité globale [43].

I.3.12.4 Domaine domestique et urbains

Les RCSFs peuvent être utilisés dans les maisons pour surveiller et contrôler l'éclairage, la température et les systèmes de sécurité. Cela peut améliorer l'efficacité énergétique et offrir plus de sécurité et de confort. Dans les zones urbaines, des capteurs sont déjà utilisés pour localiser les bus, les billets électroniques et la sécurité. Une application est la surveillance du trafic routier à l'aide de réseaux de capteurs déployés sur les autoroutes [44].

I.3.12.5 Domaine Environnementales

Les réseaux de capteurs sont beaucoup appliqués dans le secteur environnemental [45], comme, nous allons le voir ci-dessous :

- La détection de feux de forêts.
- La surveillance des catastrophes naturelles (La détection d'inondations et de tremblements de terre).
- Le contrôle de l'environnement marin (capteurs acoustiques)
- La recherche météorologique ou géophysique.

I.3.12.6 Agriculture

Les RCSFs sont utilisés dans l'agriculture pour surveiller la santé des cultures, l'humidité du sol et les conditions météorologiques. Les informations collectées par les WSN peuvent aider les agriculteurs à optimiser l'irrigation et la fertilisation et à prendre des décisions éclairées sur la gestion des cultures.

I.4 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil ont suscité un grand intérêt et sont entrés dans une nouvelle étape du développement des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant, et le développement de nouveaux capteurs permettra d'entendre de nombreux domaines d'application.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteur sans fil et les concepts généraux qui engendrent la description des composants d'un nœud capteur sans fil, en mettant le point sur l'architecture des capteurs et réseaux de capteur sans fil, en suite nous avons présenté leurs caractéristiques et contraintes de conception et quelques concepts nécessaires à la compréhension des réseaux de capteur sans fil. Ainsi Nous avons montré l'importance des réseaux de capteurs sans fil et leur principaux domaines d'applications, qui sont en plein développement.

Le chapitre suivant sera consacré sur les concepts fondamentaux de la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil et son utilité.

Chapitre 2

La tolérance aux pannes dans les RCSFs

II.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont sujets à différents types de pannes, qu'elles soient dues à des défaillances matérielles, des interférences électromagnétiques, des erreurs de transmission ou des attaques malveillantes. Ces pannes peuvent avoir des conséquences négatives sur la qualité des données collectées, la disponibilité du réseau, la consommation d'énergie et la durée de vie des nœuds. C'est pourquoi il est essentiel de mettre en place des mécanismes de tolérance aux pannes. Le principe de la tolérance aux pannes dans les RCSF consiste à concevoir des approches et des solutions pour réduire l'impact des pannes et assurer la continuité de fonctionnement des nœuds de capteurs et du réseau dans son ensemble.

Dans ce chapitre, nous aborderons la notion de tolérance aux pannes dans les RCSF, en commençant par une présentation générale des sources possibles de pannes. Nous explorerons les différentes techniques existantes qui permettent de détecter les pannes et de garantir la sûreté de fonctionnement dans les RCSF. Nous donnerons ensuite un aperçu des approches de tolérance aux pannes, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites.

II.2 Les pannes dans les réseaux de capteurs

II.2.1 Définition de concepts :

Pour mieux comprendre la notion de la tolérance aux pannes, nous introduisons dans cette section les terminologies suivantes :

- **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 [45]
- **Erreur** : Est un état système incorrect ou non défini qui peut éventuellement conduire le système à une défaillance totale [46]
- **Panne (défaillance)** : Une panne est un dysfonctionnement ou une défaillance temporaire ou permanente, qui empêche un système, un appareil ou une composante de fonctionner correctement [47]. Les causes peuvent être multiples, allant des défaillances matérielles aux erreurs de programmation. Les conséquences des pannes peuvent être significatives, affectant les performances et la fiabilité des systèmes, entraînant des coûts supplémentaires, des retards et des pertes de données. Pour minimiser les risques de panne et améliorer la tolérance aux pannes, il est important de concevoir et de maintenir les systèmes de manière adéquate.



Figure n° II.1 : La trilogie Faute/ Erreur/ Panne

II.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 [48] :

- **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•2) :

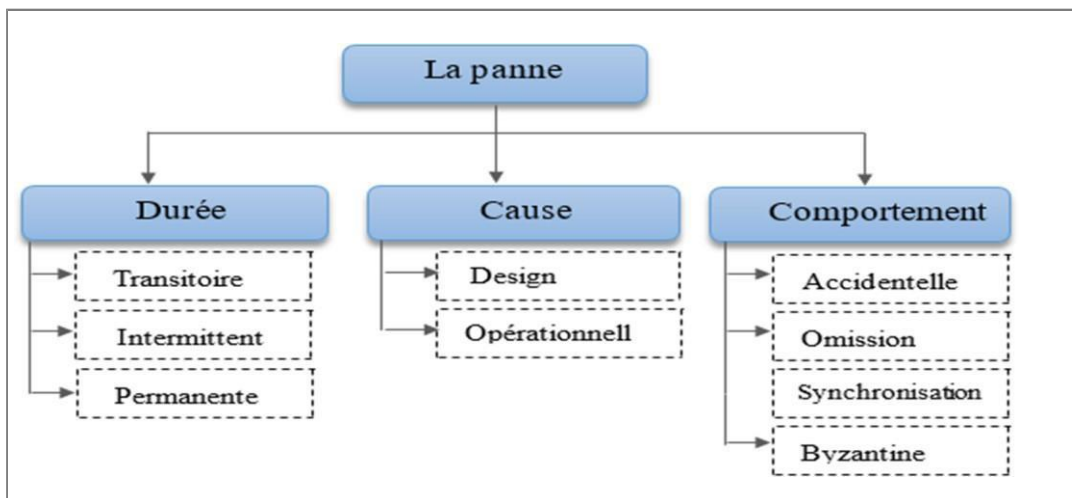


Figure n° II.2 : Classification des pannes.

II.2.2.1 Pannes selon durée

En basant sur la durée de la panne, on peut classer la panne en :

- **Panne Transitoire** : Elle peut être due à un impact environnemental temporaire, et elle peut éventuellement disparaître sans aucune intervention. (Elle se produit de manière isolée)
- **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.
- **Panne Permanente** : continue et stable dans le temps, la panne permanente persiste jusqu'il y aura une intervention externe pour la traiter. Un changement physique dans un composant provoque une panne matérielle permanente.

II.2.2.2 Pannes selon la cause

On distingue deux types de pannes selon leur cause

- **La panne de design** : il est possible que les pannes de design surviennent due à une structuration du réseau ou par des erreurs dans la fabrication des composants. En pratique, Ce genre de panne ne devrait pas exister grâce aux tests et simulations avant la réalisation finale du réseau.
- **La panne opérationnelle** : se produisent pendant le fonctionnement du système, après le déploiement du réseau. Ces pannes peuvent être causées par des problèmes physiques. En outre, on peut distinguer, spécialement pour les réseaux de capteurs, trois principales causes :
 - **Energie** : L'épuisement de la batterie due à la consommation d'énergie est un facteur crucial qui détermine la durée de vie des nœuds capteurs et du réseau dans son ensemble.
 - **Sécurité** : Le risque de pannes causées par la destruction physique accidentelle ou intentionnelle par des ennemis est plus élevé en l'absence de sécurité dans les réseaux de capteurs.
 - **Transmission** : Les fautes lors de la transmission de données peuvent être causées par la vulnérabilité de la transmission radio, la présence d'obstacles dans des environnements hostiles et les interférences électriques.

II.2.2.3 Pannes selon le comportement résultant

On distingue quatre différents comportements possibles du composant concerné, après l'occurrence d'une panne :

- **Panne accidentelle (Crash) :** Une panne accidentelle, également appelée panne catastrophique, est caractérisée par l'arrêt complet ou la poursuite d'un composant sans retour à un état stable et fonctionnel. Ce type de panne est généralement causé par un événement imprévu et potentiellement destructeur, comme un incendie ou un acte de vandalisme, et peut entraîner des dommages significatifs à l'équipement
- **Panne d'omission :** le composant n'est plus capable d'améliorer son service (échec total).
- **Panne de synchronisation (Timing) :** le composant effectue son traitement mais fournit le résultat en retard.
- **Panne Byzantine :** 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.

II.2.3 Origines des pannes dans les RCSFs

Les RCSFs sont généralement utilisés dans des environnements hostiles et donc ils peuvent être sujets à une grande variété de fautes et à un manque de fiabilité [49], cette partie a pour but de présenter les différentes pannes susceptibles de survenir au niveau d'un RCSF :

II.2.3.1 Pannes du nœud capteur

Les nœuds des RCSFs sont composés de différents composants matériels et pilotés par des logiciels, qui peuvent subir des pannes tout au long de leur fonctionnement en raison de la défaillance du matériel (unité de capture, CPU, mémoire, interface réseau, batterie, etc.) ou du logiciel (routage, MAC et application) [50,51]. De plus, En cas d'épuisement de la pile d'un nœud, ses composants peuvent ne plus fonctionner correctement, ce qui peut générer des données erronées. Toutefois, certains services du nœud peuvent toujours continuer à fonctionner correctement malgré une défaillance matérielle ou logicielle, par exemple, le nœud peut être utilisé pour le routage des paquets même si son unité de capture est défaillante. Les bugs logiciels sont les plus souvent sources d'erreurs dans les RCSFs. Dans [52], les chercheurs ont remarqué qu'un bug logiciel a causé la plus longue panne du réseau.

II.2.3.2 Pannes du réseau

Le routage est une fonctionnalité essentielle des réseaux de capteurs, c'est une technique fondamentale pour assurer la transmission des données. Cependant, il peut y avoir des problèmes tels que la perte de messages, l'acheminement incorrect, des retards inacceptables et des liens instables entre les nœuds en raison de pannes. Le protocole de routage peut être la principale cause d'inefficacité du réseau car il exige que les nœuds choisissent toujours le chemin le plus sûr, et les collisions peuvent survenir lorsque plusieurs nœuds émettent des signaux simultanément. Pour éviter ces problèmes, il est important de sélectionner des fréquences de transmission appropriées, de positionner les nœuds stratégiquement et d'utiliser des techniques de correction d'erreurs, de redondance et de tolérance aux pannes.

II.2.3.3 La panne de la station de base

La station de base est un composant essentiel dans un RCSF, par conséquent son panne peut avoir un impact négatif sur le fonctionnement d'un réseau de capteurs sans fil en causant une perte de connectivité et compromettant la qualité des données collectées si aucun mécanisme de tolérance aux pannes n'est mis en œuvre. La station de base peut être déployé dans un environnement où ils n'y ont pas de générateur d'énergie, dans un tel cas certaines applications utilisent, les batteries solaires sont employées pour produire assez d'énergie. Mais en cas de manque d'exposition solaire, cette technique n'est pas efficace, le nœud station de base peut souffrir d'un manque d'énergie [53].

II.2.3.4 Les sources mobiles d'interférence

Les nœuds communicants des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) peuvent être perturbés par d'autres dispositifs fonctionnant à des fréquences similaires, tels que des véhicules, des animaux et des humains [31]. Bien que les RCSF utilisent généralement des fréquences ISM (industrielles, scientifiques et médicales) qui ne nécessitent pas d'autorisation pour leur fonctionnement, ils sont exposés à des interférences provenant d'autres dispositifs opérant dans ces mêmes fréquences. Les nœuds capteurs utilisent souvent un seul canal radio avec une modulation fixe pour réduire les coûts de communication, ce qui limite l'utilisation de méthodes de choix dynamique de fréquence et de modulation, de détection d'interférences de canaux de base et de saut de fréquence [54, 55].

II.2.3.5 Panne de communication

Après avoir collecté et validé les données, les capteurs/nœuds capteur utilisent généralement une communication sans fil pour transmettre les données acquises à un nœud central ou à un serveur. Cependant, cette communication peut être affectée par des conditions environnementales défavorables, un partage des ressources du capteur (interférences) ou un partage de la même chaîne de communication avec d'autres capteurs du réseau (congestion), etc. Une communication défaillante peut entraîner des données erronées, des données manquantes, des retards de transmission ou même l'indisponibilité des sources. Ces facteurs ont un impact significatif sur la qualité de l'analyse des données en temps réel.

II.2.3.6 La panne de processeur

Le logiciel d'application peut comporter des erreurs de programmation qui peuvent causer des pannes du processeur. En raison de problèmes de synchronisation, un logiciel défectueux peut également entraîner un blocage du processeur. Pour éviter de telles situations, les capteurs (microcontrôleurs) sont équipés de « **watchdogs** » qui surveillent le fonctionnement du logiciel et redémarrent le processeur en cas de problème. Ainsi, si un nœud rencontre un dysfonctionnement, il sera temporairement indisponible avant de reprendre son fonctionnement normal [56].

II.2.3.7 Les défaillances malveillantes :

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont vulnérables aux défaillances causées par des attaques malveillantes visant à perturber leur fonctionnement. Ces attaques peuvent être lancées par des étrangers ou des nœuds corrompus. Cependant, il est possible d'éviter ou de récupérer partiellement certaines attaques de sécurité en utilisant des techniques de tolérance aux fautes qui évitent les routes passant par des zones sous attaque [57]. Des techniques de tolérance aux fautes peuvent également être utilisées pour prévenir les attaques de déni de service, telles que les attaques d'interférence, les attaques de collision et les attaques de trou de la station de base « **sinkhole** ». Ces attaques se comportent comme des défaillances silencieuses.

II.2.4 Gestion des pannes dans RCSFs

La gestion des pannes dans les réseaux capteurs sans fil est devenue une tâche essentielle pour assurer la fiabilité et la disponibilité du réseau, trois principales procédures doivent être effectuées [58].

II.2.4.1 La détection des pannes

La détection des pannes est la première phase de la gestion des pannes, Celle-ci doit être parfaitement identifiée afin de prendre les contre-mesures nécessaires. La détection des pannes dans les réseaux de capteurs dépend largement du type d'applications et du type de pannes. Il existe deux types d'approches de détection de pannes dans les RCSF :

- **Approche centralisée**

Dans cette approche, un nœud centralisé est chargé d'identifier les nœuds défectueux ou suspects dans le réseau en analysant les informations collectées à partir de chaque nœud capteur. Cette approche peut prolonger la durée de vie du réseau, mais elle peut également entraîner une concentration de trafic de données et un épuisement rapide de l'énergie dans les régions du réseau proches du nœud central. Des outils et algorithmes sont proposés pour minimiser ces problèmes, mais cette approche peut ne pas être applicable dans les réseaux de capteurs à ressources limitées et peut devenir inefficace dans les réseaux à grande échelle.

- **Approche distribué**

L'approche distribuée permet de répartir la gestion des pannes uniformément dans le réseau, en donnant aux nœuds la capacité de prendre des décisions avant de communiquer avec le nœud central. Il peut être classé en :

- **Autodiagnostic** : En utilisant l'auto diagnostic, un nœud peut détecter les défauts par lui-même.
- **Détection de groupe** : Dans cette méthode, les nœuds de capteurs déployés dans la même région effectuent la procédure de détection en collaboration en supposant que des valeurs similaires sont produites.
- **Détection hiérarchique** : Une procédure de détection est utilisée de manière hiérarchique. Il part des nœuds enfants de bas niveau et se dirige vers le nœud parent de niveau supérieur. Le nœud parent effectue l'agrégation et trouve le nœud défectueux.

II.2.4.2 Diagnostic des pannes

Le diagnostic des défauts est une étape importante de la gestion des pannes dans les RCSF, son rôle principal est de minimiser les temps d'arrêt du système et pour assurer un fonctionnement optimal du réseau. Cette étape consiste à identifier la cause profonde de la panne une fois qu'elle a été détectée 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 déterminer les mesures à prendre pour y remédier.

II.2.4.3 Recouvrement de panne

Après la détection des défauts et le diagnostic des défauts, 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 impliquent l'isolation des nœuds défaillants au niveau du routage. Une solution courante consiste à sélectionner un nouveau voisin pour acheminer les données si le nœud précédent devient silencieux, ce qui est souvent mis en œuvre grâce à la redondance des nœuds dans le réseau. Cette méthode peut être considérée comme un mécanisme de réplication. Il existe deux types d'approches de recouvrement de pannes basées sur la réplication (redondance) pour les RCSF [59] :

- **Redondance active :**

Pour garantir la disponibilité des données et la continuité de service dans les Réseaux de Capteurs sans Fil (RCSF), une méthode courante est l'utilisation de composants redondants qui traitent toutes les requêtes. Le routage multi-routes est une approche possible pour obtenir cette redondance en fournissant plusieurs routes alternatives pour acheminer les messages. Cela permet d'assurer la collecte de données malgré la panne d'un ou plusieurs nœuds dans le réseau.

- **Redondance passive :**

La redondance passive implique que seul le composant principal traite les requêtes, mais il est nécessaire de maintenir la cohérence avec les composants de secours en transférant régulièrement l'état et les informations sur les requêtes. Cela doit être fait en minimisant l'impact sur les ressources du système. Pour réduire l'impact sur la performance du réseau, il est important de limiter la taille des informations sur l'état du composant. Le processus de récupération en cas de panne dans un système de redondance passive comporte trois étapes.

1. **Détection de panne (vue précédemment)**

2. **Sélection du composant (nœud) relais :** Cette étape dans laquelle une panne du nœud original est avérée : Il est nécessaire dans ce cas à la sélection du nœud qui va prendre le relais. Il existe différentes approches de sélection :

- **Auto-sélection :** chaque nœud est programmé pour exécuter un algorithme qui lui permet de déterminer son rôle. Les nœuds peuvent constamment changer de rôle en fonction de l'état du système.
- **Groupe-sélection :** la sélection du nœud de secours se fait par un consensus entre un groupe de nœud.

- **Sélection hiérarchique** : Un coordinateur est chargé de sélectionner le nœud qui prendra le relais. Ce coordinateur a une vue globale du système et peut prendre des décisions en fonction de l'état du réseau.
3. **Distribution du service** : Une fois que le nœud de secours a été sélectionné, il doit être en mesure de fournir le service en question. Pour cela, plusieurs techniques peuvent être utilisées :
- **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

II.3 La tolérance aux pannes dans les Réseaux capteurs sans fil

II.3.1 Définition de la tolérance aux pannes

La tolérance aux fautes est l'ensemble de techniques de conception qui permet à un système de continuer à fonctionner et fournir ses services sans aucune interruption et sans affecter la tâche globale du réseau, malgré d'éventuelles pannes de nœuds du RSCF. [1]

II.3.2 Importance de la tolérance aux pannes dans les RCSF

La mise en place d'une stratégie de tolérance de pannes est vitale pour garantir le fonctionnement optimal de trois types de systèmes critique où celle-ci (tolérance aux pannes) est primordiale :

- **RCSF critiques** : Les RCSF (systèmes de contrôle de redondance) critiques sont des systèmes qui jouent un rôle crucial dans des domaines tels que la sécurité publique, la santé, la défense, l'aérospatiale, etc. Ils sont conçus pour maintenir un fonctionnement stable et ininterrompu, même en cas de panne d'un composant ou d'une défaillance du système. La tolérance aux pannes est primordiale dans ces systèmes car une panne peut avoir des conséquences graves pour la sécurité et la vie des personnes.

- **RCSF à environnement hautement hostile** : Le déploiement de ce genre de RCSF se fait dans des environnements présentant les particularités d'être instables et très risqués pour les nœuds qui composent ces RCSFs, ceci accroît considérablement la probabilité de pannes et de dysfonctionnements dus aux changements imprévisibles de l'environnement. Par exemple, un RCSF déployé dans une forêt, au pôle nord ou dans un volcan doit être capable de tolérer les conditions environnementales extrêmes Pour assurer la sécurité des personnes et de l'environnement.
- **RCSF critique à environnement hautement hostile** : Les RCSF critiques déployés dans des environnements hautement hostiles, tels que les navires de guerre, les plates formes offshore et les installations nucléaires, doivent être particulièrement tolérants aux pannes. Ces systèmes sont exposés à des conditions environnementales extrêmes et à des risques de sécurité élevés, ce qui rend leur fonctionnement interrompu inacceptable.

Les genres de RCSF cités précédemment mettent en avant l'importance de la présence d'une tolérance aux pannes au même titre que les autres critères nécessaires à la conception d'un RCSF robuste et efficace (sécurité, durée de vie et consommation d'énergie, routage...etc.)

II.3.3 Procédure générale de tolérance aux pannes

Les RCSF peuvent subir des pannes en raison de limites sur les ressources énergétiques, du déploiement difficile et des liens de communication peu fiables. Pour maintenir le fonctionnement du réseau, une tolérance aux pannes doit être incorporée rapidement, Cette stratégie passe par plusieurs étapes, comme s'est illustré dans la figure [50] :

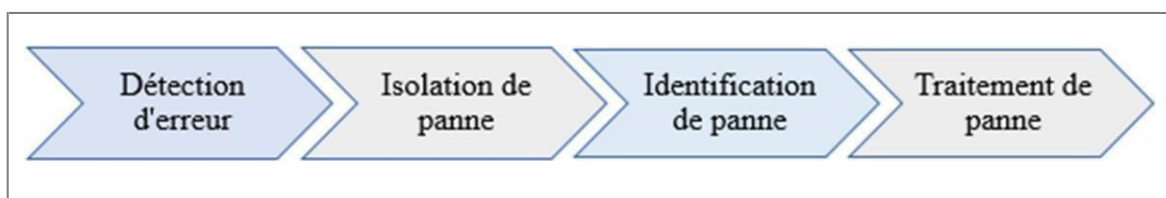


Figure n°II.3 : Procédure de la tolérance aux pannes.

- **Détection d'erreur** : Dans cette phase, un événement imprévu survient à la suite de changements dans le réseau qui perturbent son fonctionnement, malgré l'utilisation de mécanismes préventifs de pannes dans certains systèmes. Dans de tels cas, une technique de détection d'erreur doit être immédiatement mise en place pour éviter toute perte de données. La détection d'erreur dans les RCSF dépend du type de panne ainsi que des applications utilisées.
- **Isolation de panne** : Dans cette phase, il est essentiel de limiter l'impact de la panne sur une zone spécifique afin de protéger les autres zones et d'empêcher la propagation de la panne à travers l'ensemble du réseau.

- **Identification de panne** : Au cours de cette phase, le composant défectueux est identifié et sa panne est signalée à tous les nœuds voisins afin qu'ils puissent prendre les précautions nécessaires pour éviter toute perte de données. Si ce composant participe au routage, il sera contourné par les nœuds voisins qui ont des données à transmettre
- **Traitement de panne** : Une fois la panne isolée, la phase suivante consiste à réparer le composant défectueux, en fonction de la nature de la panne. Pour les pannes permanentes, il est nécessaire de remplacer le composant défaillant par un autre en état de fonctionnement. Ainsi, le système doit disposer d'un ensemble de nœuds redondants (ou en mode veille) prêts à remplacer les éléments défectueux.

II.3.4 Exemple de tolérance aux pannes dans un réseau de capteurs

Le problème de fusion dans un réseau de capteurs multimodal tolérant aux pannes peut être représenté à l'aide d'un exemple illustré dans la Figure II-4. Le réseau de capteurs est utilisé pour la reconnaissance de personnes dans une société pour identifier ses employés. Six personnes nommées A, B, C, D, E et F travaillent dans cette société [60]. Le système de reconnaissance utilise deux types différents de capteurs :

- **Capteur de taille (grandeur).**
- **Capteur pour la reconnaissance vocale qui demande à chaque entrant d'introduire une phrase secrète donnée à l'aide d'un microphone.**

La Figure (II-4) montre les caractéristiques de six personnes (leur taille et leur voix) représentées dans un graphe. Si deux personnes P1 et P2 sont représentées dans deux surfaces différentes sur le graphe, le système peut les distinguer.

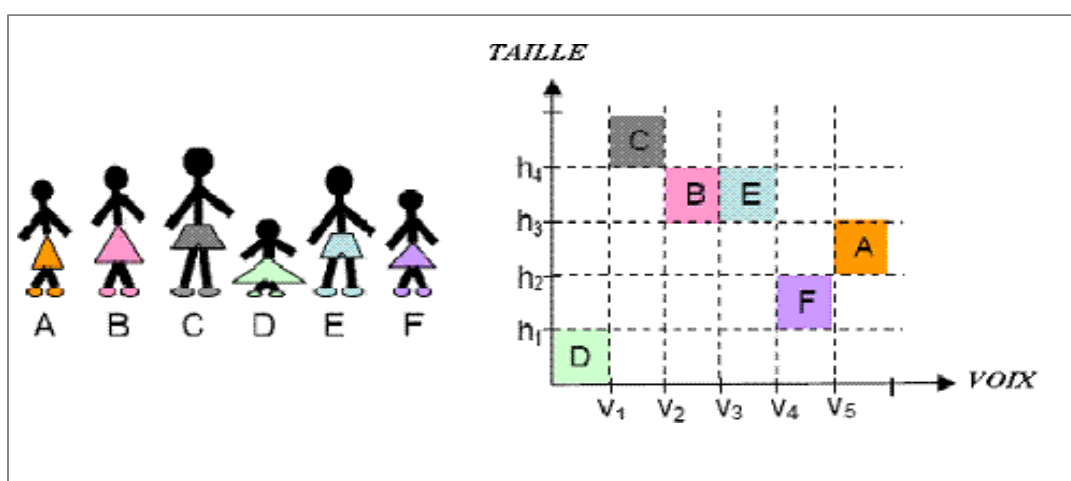


Figure n°II.4 : Réseau de capteur multimodal.

Selon l'exemple, si tous les capteurs fonctionnent correctement, chaque personne va occuper une surface différente. En outre, dans le cas de défaillance d'un des capteurs de taille ou de voix, le système de reconnaissance de personnes reste fonctionnel grâce à la tolérance aux pannes hétérogène. Cette tolérance permet de remplacer un capteur en panne d'un type par un capteur de l'autre type. Cependant, dans le cas des personnes B et E qui ont la même taille, la voix est le seul critère de distinction, donc le système ne peut tolérer aucune panne pour le capteur V3 qui permet de les différencier. Si l'on retire l'une des deux personnes de la société, le système sera complètement tolérant aux pannes. Ainsi, une bonne modélisation d'un réseau de capteurs est nécessaire pour offrir une tolérance aux pannes hétérogène qui assure la fiabilité du système en cas de défaillance d'un nombre précis de capteurs d'une modalité donnée.

II.3.5 Classification des techniques de tolérance aux pannes

La tolérance aux pannes est un aspect essentiel des réseaux de capteurs sans fil et peut être mise en œuvre de plusieurs manières. Les techniques de tolérance aux pannes peuvent être classées selon différents critères de classification :

II.3.5.1 Classification temporelle

Dans cette classification, les algorithmes sont divisés en deux catégories en fonction de la phase de traitement. Si le traitement est effectué avant la panne, on parle d'algorithmes préventifs. Dans le cas contraire, les algorithmes sont considérés comme curatifs. [22]

- **Algorithme préventif** : Des techniques tolérantes aux pannes sont mises en œuvre pour retarder ou éviter tout type d'erreur afin de maintenir le réseau opérationnel le plus longtemps possible. Un exemple de ces techniques est la conservation d'énergie, qui permet de réduire la consommation d'énergie et d'éviter une décharge prématurée de la batterie, ce qui augmente la durée de vie des nœuds.
- **Algorithme curatif** : Cette approche utilise une méthode optimiste, où le mécanisme de tolérance aux pannes n'est mis en œuvre qu'après la détection d'une panne. À cette fin, plusieurs algorithmes de récupération après la survenue de pannes sont proposés dans la littérature, tels que la récupération du chemin de routage, l'élection d'un nouvel agrégateur, etc.

II.3.5.2 Classification architecturale

Cette classification concerne les différents types de gestion des composants, que ce soit au niveau individuel des capteurs ou pour l'ensemble du réseau. Il est possible de distinguer trois catégories principales

- **Gestion de la batterie** : La gestion de la batterie est une approche préventive qui permet de mieux gérer la consommation d'énergie des nœuds capteurs, et de limiter les défaillances des nœuds afin d'augmenter la durée de vie du réseau. Les protocoles utilisés dans cette catégorie permettent de distribuer uniformément la dissipation d'énergie entre les différents nœuds, tout en évitant une décharge prématurée de la batterie. Ils utilisent également un mécanisme de mise en veille pour les nœuds capteurs inactifs, afin d'optimiser la conservation de l'énergie. [61]
- **Gestion de flux** : Cette catégorie regroupe les techniques qui visent à améliorer le transfert des données dans le réseau en identifiant des routes et des stations de base fiables pour établir le meilleur chemin entre les nœuds et récupérer en cas de défaillance du chemin. Cette approche permet de garantir une meilleure fiabilité et une meilleure qualité de service pour les applications des réseaux de capteurs sans fil [61].
 - **Routage multi-chemin** : Utilise un algorithme préventif pour déterminer plusieurs chemins depuis chaque capteur vers le nœud collecteur. Cette technique garantit la présence de plus d'un chemin fiable pour la transmission des données, offrant ainsi une reprise rapide de la transmission en cas de panne sur le chemin principal. En effet, en choisissant l'un des autres chemins disponibles, la communication peut être rétablie rapidement.
 - **Recouvrement de route** : après 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 consiste en l'allocation de canal, qui est mise en place au niveau de la couche MAC. Elle permet de réduire les interférences entre les nœuds voisins et d'éviter les collisions lors du transfert en allouant de manière optimale le canal de transmission.
 - **Mobilité** : Certains protocoles suggèrent une solution de tolérance aux pannes en ayant recours à des nœuds mobiles qui se déplacent entre les capteurs pour collecter les données. Cette approche permet de réduire la consommation d'énergie de chaque capteur en éliminant sa tâche de transmission. Les nœuds mobiles disposent généralement d'une batterie plus importante que les nœuds capteurs. De cette manière, la mobilité peut être utilisée pour améliorer la fiabilité du système en cas de défaillance de certains capteurs.

- **Gestion des données** : Les protocoles qui entrent dans cette catégorie permettent une gestion améliorée des données et de leur traitement. On distingue deux principales sous-catégories [62]
 - **Agrégation** : Cette approche est considérée comme préventive, car elle permet un traitement supplémentaire des données brutes collectées à partir de l'environnement. Un nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs nœuds pour former une information significative, réduisant ainsi considérablement la quantité de données transmises et consommant moins d'énergie pour leur dissémination. Cela permet d'augmenter la durée de vie du réseau. En outre, cette approche permet également d'atténuer les erreurs si le résultat de l'agrégation est une moyenne.
 - **Clustering** : Une des approches importantes pour gérer la structure d'un réseau de capteurs. Il permet la création d'un back one virtuel qui améliore l'utilisation des ressources limitées, telles que la bande passante et l'énergie. De plus, le clustering facilite le multiplexage entre différents clusters et améliore les performances des algorithmes de routage. De nombreux protocoles utilisent cette approche préventive, mais elle est parfois considérée comme une approche curative.

II.3.5.3 Classification selon la taille

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés selon leur taille. Cette classification permet de différencier les techniques adaptées aux réseaux de petite et de grande échelle en raison de la différence de leur structure [63].

- **Les réseaux de capteurs sans fil à petite échelle** : chaque nœud est crucial et a un rôle unique dans la production des résultats souhaités. Ainsi, si un nœud tombe en panne dans un réseau de petite échelle, cela peut affecter considérablement la qualité et la fiabilité du réseau.
- **Les réseaux de capteurs sans fil à grande échelle** : l'ensemble du réseau peut être divisé en petits groupes appelés "clusters". De cette manière, si un nœud tombe en panne dans l'un des clusters, cela n'affectera pas la qualité et la fiabilité du service final, car les autres nœuds du cluster continueront à fonctionner normalement.

II.3.5.3 Classification selon le niveau d'implémentation

Cette classification permet de distribuer les protocoles sur les différentes couches de l'architecture des réseaux de capteurs. Par conséquent, les algorithmes de routage sont placés au niveau du réseau, tandis que les techniques de sélection de canal sont situées sur la couche MAC, etc. [2]

II.3.6 Approches tolérantes aux pannes dans les RCSF

Les réseaux de capteurs utilisent une méthode de communication appelée communication multi-sauts, qui est efficace pour résoudre les problèmes de propagation de signal et les perturbations de signal qui se produisent lors de la transmission de données sur de longues distances sans fil. Pour que la transmission de données soit fiable et efficace en termes d'énergie, il est important de choisir le meilleur chemin possible vers le collecteur. Pour ce faire, il existe trois principales catégories de solutions proposées à ce niveau de couche sont classifiées en trois principales catégories : routage, clustering et agrégation.

II.3.6.1 Solutions de routage tolérantes aux pannes

Les protocoles de routage sélectionnent les meilleurs chemins pour transmettre les données de la source à l'utilisateur final et choisissent un chemin de remplacement en cas d'échec de la route initiale en raison d'une défaillance d'un ou de plusieurs nœuds

- **Algorithme PEQ (Periodic, Event-driven, Query-based)** : PEQ est un algorithme de routage qui vise à assurer une transmission fiable et efficace des données dans les réseaux de capteurs sans-fil, même en cas de défaillance ou de panne des nœuds. Il utilise les meilleures routes en fonction de la fiabilité des liens et de la consommation d'énergie pour acheminer les données. En outre, il utilise le paradigme Publish/Subscribe comme montre la figure II.5 [64] pour la communication entre le collecteur et les capteurs, permettant ainsi une réduction du trafic de données et une économie d'énergie. Les capteurs envoient des notifications d'événements au collecteur, qui s'abonne aux informations qui l'intéressent, puis les capteurs publient les informations souhaitées. En cas de panne d'un chemin, PEQ remplace automatiquement ce dernier par un autre chemin fiable et peu consommateur d'énergie.

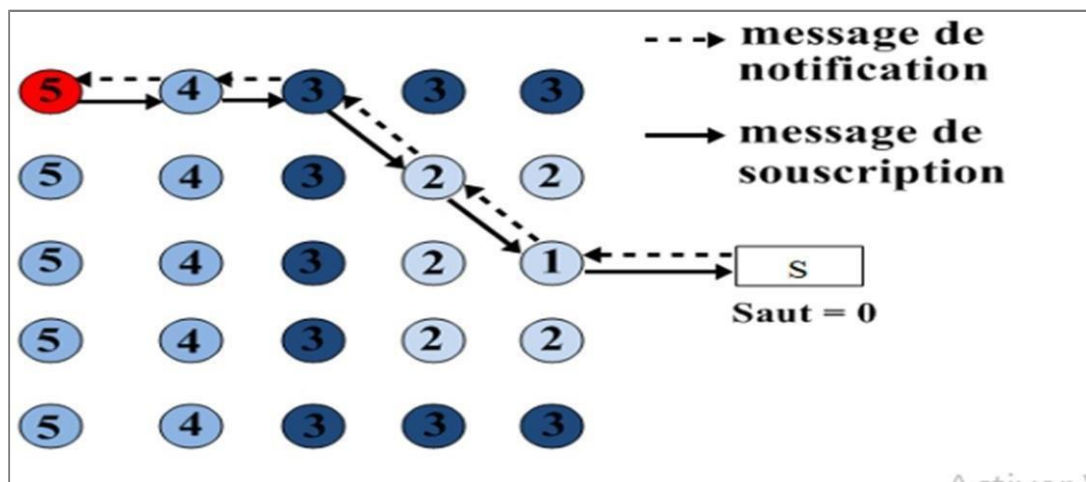


Figure n°II.5 : Mécanisme Publish/Subscribe

Les quatre principales phases du protocole sont :

- **Construction de l'arbre de routage** un arbre de routage est construit pour définir les différents chemins possibles. Chaque capteur envoie sa valeur de saut à ses voisins pour identifier les meilleurs chemins, qui sont enregistrés.
- **Transmission de paquets de notification** : les capteurs envoient des notifications d'informations selon leur table de routage et l'événement capté, en utilisant le chemin le plus rapide et le moins énergivore.
- **Propagation des paquets de souscription** ; les paquets de souscription sont propagés pour acheminer les données souhaitées jusqu'au capteur concerné, suite à la souscription effectuée par le collecteur.
- **Mécanisme de recouvrement de route** : le mécanisme de recouvrement de route est activé pour sélectionner un autre capteur destination tout en minimisant le coût du nouveau chemin. Si aucun capteur n'est trouvé, le capteur devient isolé et doit augmenter son rayon de transmission radio pour atteindre les capteurs voisins lointains.

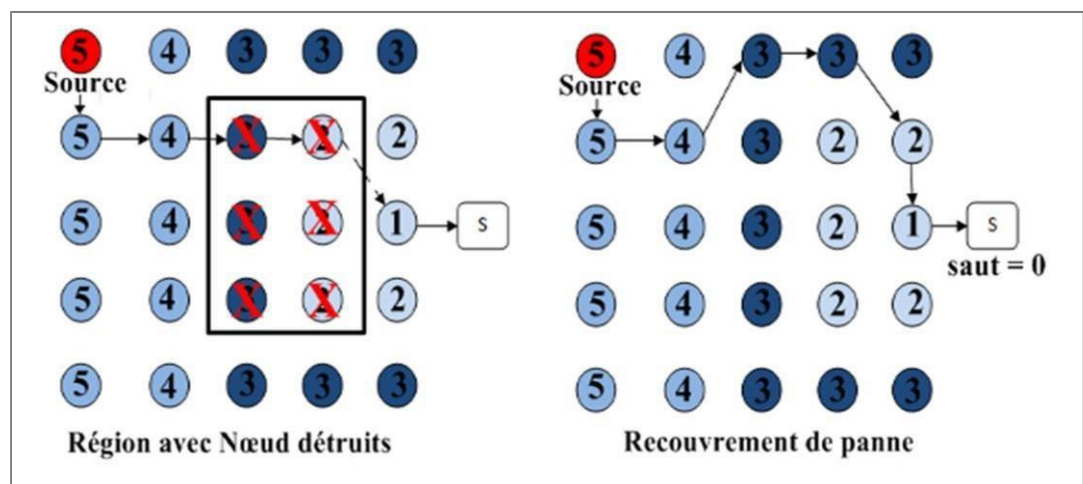


Figure n°II.6 : Recouvrement de routes dans PEQ

- **Protocole EAR : (Energy-efficient and Adaptive Routing)** : est une solution hybride pour la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil. Il utilise un concept préventif pour garantir une conservation d'énergie optimale et définit plusieurs chemins de routage pour augmenter la fiabilité du transport et la durée de vie du réseau. EAR utilise des clusters dirigés par des nœuds agrégateurs pour réduire la consommation d'énergie et optimiser le routage. Le protocole offre également un mécanisme de recouvrement de pannes en utilisant des routes alternatives et une stratégie de routage multi chemin pour sélectionner le meilleur chemin en fonction de la qualité de la liaison et du niveau de batterie de chaque nœud. EAR permet ainsi d'optimiser la gestion de l'énergie, d'améliorer la fiabilité du transport et de prolonger la durée de vie du réseau.

- **VTRP (Variable Transmission Range Protocol)** : est une solution qui permet d'ajuster la portée de transmission des capteurs pour mieux propager les données. Il utilise une variation du rayon de transmission pour augmenter la probabilité d'atteindre des nœuds actifs, même en cas de pannes ou d'inactivité des nœuds voisins. En utilisant des rayons de transmissions variés, VTRP offre une meilleure gestion de l'énergie des nœuds et une durée de vie prolongée pour le réseau. Le protocole permet également d'acheminer efficacement toutes les informations vers le collecteur.

II.3.6.2 Solutions basées sur le clustering pour la tolérance aux pannes

Le clustering est une technique qui consiste à regrouper plusieurs capteurs en un cluster, dirigé par un nœud principal appelé **cluster Head**. Ce dernier est chargé de récupérer les données de tous les capteurs dans le cluster, de les agréger et de les transmettre à la station de base. Cette méthode permet de mieux gérer le trafic et d'alléger la quantité d'informations qui circule en effectuant des traitements au sein du cluster avant de transmettre les données. Les algorithmes de clustering améliorent ainsi les performances de l'auto organisation du réseau.

- **Protocole CPEQ (Cluster-based PEQ)** : Est une variante de PEQ [65], un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil qui intègre des mécanismes de tolérance aux pannes. CPEQ utilise l'approche de clustering pour améliorer la gestion de routage en sélectionnant les capteurs ayant le plus d'énergie résiduelle comme nœuds agrégateurs ou "clusterheads". Dans un cluster, les nœuds membres envoient leurs données au clusterhead qui peut effectuer des traitements sur les données avant de les acheminer vers la station de base. Chaque capteur du réseau peut devenir clusterhead pendant une certaine période de temps selon son niveau de batterie. Le principal objectif de CPEQ est de distribuer uniformément la dissipation d'énergie entre les capteurs et de réduire la latence et le trafic de données dans le réseau. En utilisant l'approche de clustering, CPEQ améliore la gestion de routage et offre une meilleure tolérance aux pannes, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du réseau.
- **Algorithme K-CDS** : Est une méthode de clustering pour les réseaux de capteurs sans fil qui permet la construction d'un ensemble k-connexe dominant k•CDS (k-Connected, k-Dominating Set), qui agit comme un back one virtuel pour améliorer l'efficacité de routage et garantir une bonne tolérance aux pannes. Les différentes approches utilisées dans l'algorithme permettent de considérer différents critères pour la construction des clusters. Deux de ces approches sont basées sur des algorithmes probabilistes, une est déterministe et la dernière est une combinaison hybride des approches déterministes et probabilistes.

- **KAT-Mobility (K-means And TSP-based mobility) [66]** : Est une technique pour les réseaux de capteurs sans fil qui combine le clustering et la mobilité pour améliorer la gestion de l'énergie et prolonger la durée de vie du réseau. La méthode consiste à diviser le réseau en clusters grâce au clustering, puis à utiliser un collecteur mobile pour récupérer les données des capteurs des clusters visités en suivant le chemin optimal défini par la méthode du voyageur de commerce (TSP). KAT Mobility permet une couverture uniforme, une économie d'énergie et une prévention des pannes.

II.3.6.3 Solutions basées sur l'agrégation des données

L'une des approches adoptées pour améliorer la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil consiste à utiliser une solution basée sur l'agrégation des données. Cette méthode permet de minimiser le nombre de transmissions de données en rassemblant les informations pertinentes provenant de plusieurs capteurs en une seule donnée significative, évitant ainsi les données redondantes. Cette pratique allège la charge de travail des nœuds de capteurs individuels, réduisant ainsi leur consommation d'énergie. Parmi ces protocoles on choisit de détailler trois protocoles courants qui sont :

- **LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)** : Un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil qui utilise le clustering pour diviser le réseau en deux niveaux : les nœuds chef de cluster et les nœuds membres. Le protocole fonctionne en rounds et comporte deux phases : la phase de construction et la phase de communication [67]. Les nœuds membres rejoignent de manière aléatoire les nœuds chef de cluster les plus proches. Les nœuds chef de cluster agrègent les données collectées et les transmettent au nœud de destination. L'utilisation de LEACH permet de réduire la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau.
- **TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)** : Protocole de réseau de capteurs sans fil conçu pour la collecte efficace de données à partir de plusieurs nœuds de capteurs. Il est spécialement conçu pour les nœuds de capteurs à énergie limitée et vise à prolonger leur durée de vie en réduisant leur consommation d'énergie. Il a été développé pour répondre aux exigences des applications event-driven, contrairement à LEACH qui est destiné aux applications time-driven utilisant TDMA pour propager les données périodiquement [68]. Les chefs élus dans TEEN n'émettent pas un Schedule TDMA, mais un message contenant les informations suivantes :
 - **Attributs** : représentent la tâche demandée au capteur.
 - **Hard Threshold (HT)** : détermine la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leurs rapports de données.
 - **Soft Threshold (ST)** : spécifie le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport.

Donc, lorsqu'un nœud observe que la valeur captée a dépassé HT, il doit envoyer un rapport au chef. Il ne doit réémettre un rapport que si la valeur change radicalement, c'est à dire si la différence dépasse ST. Cette méthode permet de mettre en place un comportement réactif tout en limitant le nombre de messages utilisés.

- **COUGAR** : Dans le cadre de l'approche Cougar, les données produites par les capteurs sont considérées comme une table relationnelle. Chaque attribut de cette table représente soit des informations sur le capteur lui-même, soit des données collectées par le capteur. Cette approche permet une agrégation partielle des données au niveau des capteurs. Pour ce faire, chaque capteur conserve une liste d'attente des capteurs qui doivent lui envoyer des données. Le capteur agrège les données seulement lorsque toutes les données ont été reçues de tous les capteurs de la liste d'attente. Toutefois, certains capteurs peuvent devenir indisponibles en raison de leur mouvement ou d'un épuisement de leur batterie. Pour éviter une attente indéfinie dans ces cas-là, Cougar utilise un timer pour limiter le temps d'attente [69].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons débuté notre étude en examinant les différentes catégories de pannes pouvant survenir dans un RCSF. Nous avons également abordé le concept de tolérance aux pannes en fournissant des définitions générales, en décrivant les différentes étapes de sa procédure, ainsi que les classifications des techniques de tolérance aux pannes dans les RCSF selon différents critères, et nous avons donné un aperçu des approches de tolérance aux pannes, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites.

Enfin, nous avons conclu que la tolérance aux pannes est un concept clé pour assurer le fonctionnement continu, la disponibilité et l'efficacité des réseaux dans des environnements difficiles ou hostiles. Pour atteindre cet objectif, différentes stratégies sont mises en place, parmi lesquelles l'auto-organisation est primordiale. Elle permet d'adapter automatiquement la topologie et les ressources du réseau pour minimiser les effets des pannes.

Chapitre 3

Auto-organisation des RCSFs

III.1 Introduction

L'auto organisation est un critère important dans la conception des RCSF car elle permet aux nœuds de collaborer pour assurer le fonctionnement continu du réseau en cas de défaillances. Elle permet ainsi de minimiser les interventions manuelles et de réduire les coûts de maintenance et de gestion du réseau. Dans un RCSF, l'auto-organisation peut se faire de différentes manières, notamment par la redistribution des tâches entre les nœuds ou par l'activation de nœuds de secours pour remplacer les nœuds défaillants. Elle peut également se faire par l'utilisation de techniques de routage dynamique qui permettent de trouver les chemins les plus efficaces pour acheminer les données vers la station de base.

Ce chapitre se compose de deux parties distinctes. Dans la première partie, nous amorçons notre propos en introduisant et en définissant la notion d'auto-organisation. Ensuite, nous passons en revue plusieurs techniques d'auto-organisation, ainsi que les travaux pratiques existants dans ce domaine. Dans la deuxième partie, nous approfondissons les concepts clés de l'approche NARF (Novel Approach for Replacement of a Failure Node) en détaillant ses principaux aspects.

III.2 Auto organisation

III.2.1 Définition d'auto-organisation

Un système constitué de plusieurs entités, est dit organisé s'il possède une structure et un ensemble de fonctions. La structure vise à créer une relation entre les entités en les disposants d'une certaine manière particulière et à faciliter la communication entre ces entités. L'ensemble de fonctions a pour rôle de maintenir la structure et l'utilisation de celle-ci pour répondre à des besoins bien déterminés [70].

III.2.1 Objectifs de l'auto organisation

L'auto-organisation vise à créer une topologie logique au-dessus de la topologie physique d'un réseau, permettant de cacher la dynamique locale des entités et de faciliter le déploiement des protocoles de communication. Cette topologie logique doit être capable de s'adapter aux changements de la topologie et de se reconstruire de manière dynamique et locale. De plus, elle doit être capable de supporter le passage à l'échelle, ce qui est une caractéristique essentielle des réseaux auto-organisés. Les principaux objectifs de la construction de cette topologie logique sont [71] :

- Minimiser la consommation énergétique du réseau.
- Améliorer ses performances.
- Gérer les ressources disponibles dans le réseau.

III.2.2 Les principales structure d'auto organisation

L'auto-organisation consiste à construire une vue logique du réseau de manière à ce que, sur la base de cette vue logique, les protocoles de communication soient plus efficaces. Ainsi, un protocole d'auto-organisation est un protocole localisé visant à construire une organisation logique et virtuelle. Il existe plusieurs types de topologies logiques, parmi lesquelles figurent : **(voir la figure III.1) :**

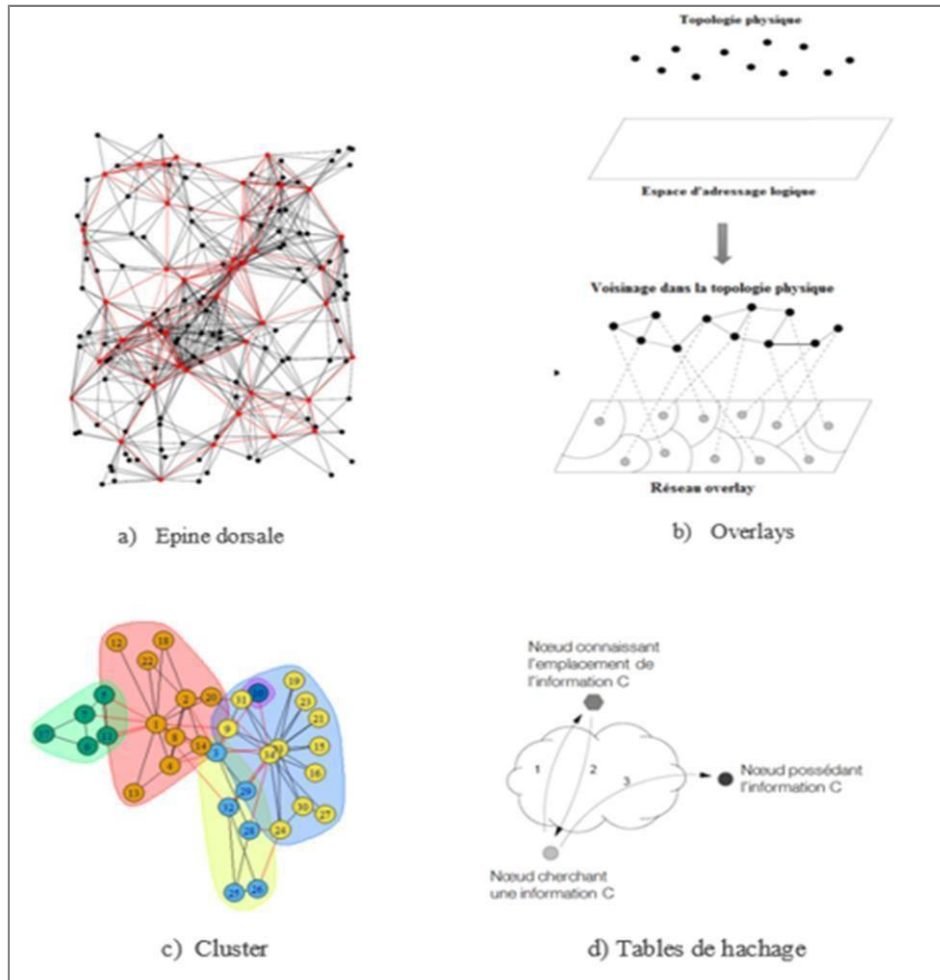


Figure n°III.1 : Les 4 stratégies principales d'auto organisation.

- a) Topologies basées sur les épines dorsales virtuelle :** Cette topologie est basée sur l'utilisation de nœuds spécifiques appelés épines dorsales pour interconnecter les autres nœuds dans le réseau. Les épines dorsales sont généralement des nœuds puissants et bien connectés qui peuvent fournir une connectivité à haut débit et à faible latence aux autres nœuds du réseau. Cette topologie est souvent utilisée dans les réseaux sans fil pour minimiser la consommation d'énergie et réduire les coûts de transmission [72].

- b) **Création d'overlays** : Les overlays sont une infrastructure de réseau logique construite sur le dessus d'un réseau physique existant. Cette topologie est souvent utilisée dans les réseaux po to po pour faciliter la communication entre les pairs sans nécessiter de serveurs centraux. Les overlays peuvent être créés en utilisant différentes techniques, telles que la création de tunnels ou l'encapsulation des paquets [73].
- c) **Techniques de clusters** : Les clusters sont des groupes de nœuds organisés autour de nœuds spécifiques appelés Clusterheads (CH). Les nœuds dans un cluster sont généralement situés dans un emplacement physique commun et sont gérés de manière centralisée. Les techniques de cluster peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité énergétique et la capacité de traitement des réseaux sans fil [72].
- d) **Tables de hachage distribués** : Les tables de hachage distribués sont une structure de données distribuée qui permet de stocker et de récupérer des informations de manière efficace dans un réseau de nœuds interconnectés. Cette topologie est souvent utilisée dans les réseaux pair-à-pair pour permettre une auto-organisation distribuée. Les tables de hachage distribués peuvent être mises en œuvre en utilisant différentes techniques, telles que le routage de distance vectorielle distribué (DVR) ou le protocole de résolution de noms distribués (DNR) [74].

III.2.3 Les protocoles d'auto organisation

Dans cette section on définit les deux grandes familles de protocoles d'auto organisation : les protocoles basés sur la mise en place d'une hiérarchie et les protocoles basés sur l'élagage des liens en ajustant la puissance de transmission.

III.2.4.1 Protocoles basés sur la mise en place d'une hiérarchie :

- **Connected Dominating Set-règle k (CDS règle-k) [75]** : Le but de ce protocole est de créer une topologie logique du réseau à travers la sélection de nœuds dominants dans un réseau de nœuds. Un CDS est un sous ensemble d'un ensemble de nœuds où chaque nœud dans l'ensemble est soit dominant, soit connecté à un nœud dominant. L'algorithme CDS-règle k est un algorithme localisé en deux phases [76] :
 - **Dans la première phase** : Chaque nœud se marque s'il possède deux voisins non connectés entre eux. (Voir figure III.2(a)).
 - **Dans la deuxième phase** : Chaque nœud marqué applique la règle k pour élaguer les nœuds dominants redondants. Si l'ensemble des voisins d'un nœud dominant est déjà couvert par un ensemble dominant de k nœuds voisins et que ce nœud a le plus petit identifiant, alors il devient un nœud dominé. (Voir figure III.3(b)).

L'algorithme CDS•règle k nécessite que chaque nœud ait accès aux informations sur son voisinage à deux sauts. Pour cela, il est indispensable d'utiliser des paquets « Hello (est un type de message utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil pour échanger des informations entre les nœuds voisins) ». L'algorithme garantit la construction d'un CDS connexe de poids maximal dans le voisinage.

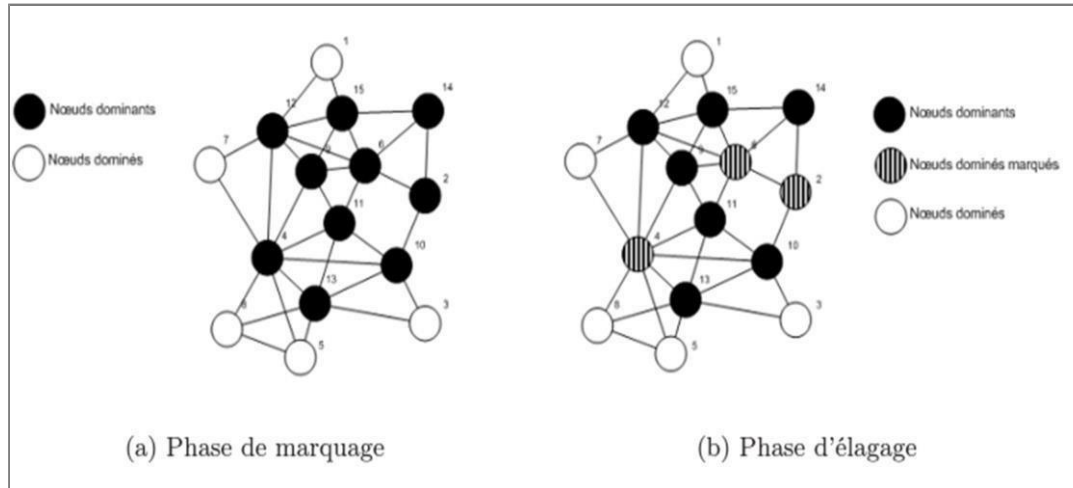


Figure n° III.2 : Principe du protocole CDS•règle k.

- **Low Energy Self Organisation Scheme (Legos) :** LEGOS [77] est un protocole d'auto-organisation des réseaux de capteurs. Il avait pour objectif de fournir un protocole d'auto-organisation simple, efficace en énergie, adapté aux topologies larges échelles qui permet de structurer le réseau et qui permet de s'adapter aux changements dans le voisinage. La structure du réseau devait répondre aux exigences suivantes :
 - Seules des interactions locales doivent être utilisées pour faire émerger un comportement global et réagir aux changements dans le voisinage ;
 - Eviter l'émission de paquets périodiques « hello » afin d'économiser de l'énergie
 - La complexité et la puissance de calcul requise doivent être efficaces pour être adaptés aux ressources limitées des capteurs.
- **Multi Point Relay•Dominating Set (MPR•DS) [78] :** un protocole été proposé pour améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil en minimisant le nombre de transmissions et en limitant le recouvrement de la zone de couverture des nœuds. Il utilise des nœuds sélectionnés appelés Multi Point Relays (MPRs) pour transmettre les données de manière efficace à d'autres nœuds dans le réseau. Les MPRs sont sélectionnés pour couvrir la zone de couverture maximale possible avec un minimum de recouvrement. Les nœuds qui ne sont pas sélectionnés comme MPRs utilisent ensuite les MPRs pour transmettre leurs données à d'autres nœuds dans le réseau.

III.2.4.2 Protocoles basés sur l'élagage des liens en ajustant la puissance de transmission. :

- **AnyBody (Adaptive Network-based Bio-inspired Dynamic self organisation) [79]** : Est un protocole d'auto organisation basée sur LEACH et destiné pour les WBANs. il s'articule sur l'approche de clustering afin de réduire le nombre de transmissions directes vers le SINK. Comme dans LEACH, une clusterhead est choisie de manière aléatoire dans chaque cluster à des intervalles de temps réguliers pour équilibrer la dissipation d'énergie entre les nœuds du réseau.
- **Hybrid Indirect Transmission (HIT) [80 ,81]** : un protocole basé sur le Clustering qui réduit le nombre de transmissions directes à le Sink et utilise des transmissions multi hop, parallèle et indirectes à la fois au sein d'un cluster et entre plusieurs clusters adjacents. L'analyse de HIT et HITm (HIT avec plusieurs clusters) ont montré un petit Delay de réseau, une bonne efficacité énergétique et une haute durée de vie du réseau.

Relative Neighborhood Graph (RNG) : L'algorithme RNG [82] est une méthode de construction de graphe. L'objectif est d'élaguer l'arête la plus longue dans chaque triangle dans le graphe, afin d'économiser les liens les plus longs en les élaguant et donc en émettant à une puissance plus faible. Par conséquent, l'arête (U, V) n'est pas incluse dans le sous graphe RNG car elle est la plus longue du triangle (U, V, W), comme illustré dans **la figure III.3**. La topologie logique construite en utilisant le graphe RNG permet ainsi de réduire les liens redondants et inutiles dans le réseau. L'algorithme de construction du graphe RNG repose sur la connaissance locale du voisinage direct et permet de conserver la propriété de connexité du graphe initial. Cette construction est donc basée sur un algorithme localisé et permet de réaliser des économies en éliminant les liens les plus longs grâce à l'élagage des arêtes les plus longues de chaque triangle dans le graphe.

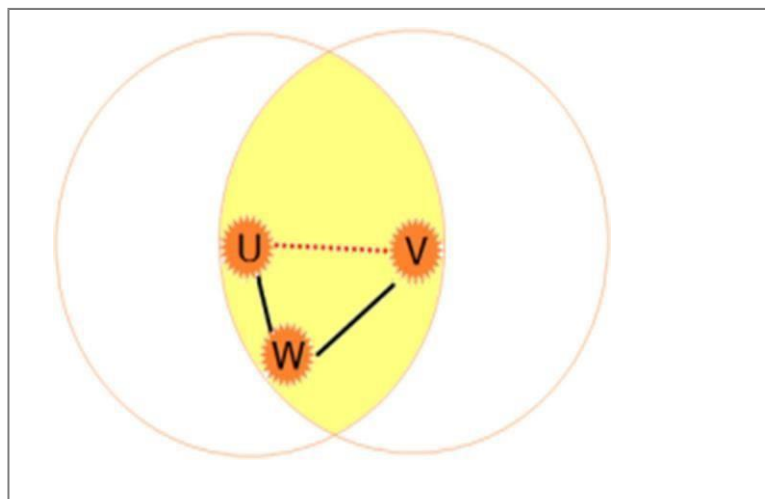


Figure n°III.3 : Élagage des liens avec RNG

- **Grphe de Gabriel (GG) :** Le GG [83] est un graphe de connectivité qui peut être utilisé pour faciliter la communication entre les nœuds dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce graphe Selon la figure 3.8, le lien entre deux nœuds U et V est supprimé si un autre nœud W, connecté aux deux nœuds U et V, se trouve dans le disque de diamètre (U, V) cela permet aux nœuds de communiquer efficacement tout en économisant l'énergie du réseau. La zone d'exclusion d'un GG est incluse dans celle d'un RNG (voir figure 3.9), ce qui signifie qu'une topologie RNG est un sous graphe de la topologie GG. Comme pour RNG, la topologie GG respecte les propriétés de connexité du réseau.

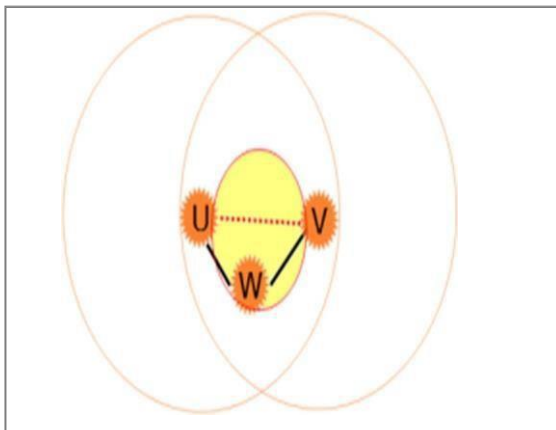


Figure n° III.4: Élagage du lien pour GG

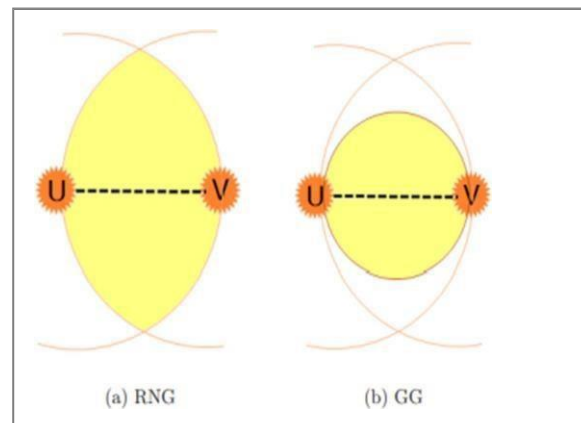


Figure n° III.5 : Comparaison des topologies RNG et GG.

III.3 L'état de l'art

Avant de conclure cette partie, nous allons faire un survol dans la littérature dans le cadre de notre recherche pour dénombrer quelques travaux traitant les problèmes de tolérance aux pannes ont utilisant l'auto organisation, nous allons être très brefs et restreints, car nous ne pouvons pas donner une liste exhaustive de tous ce qui a été fait.

Une stratégie a été développée par [84], qui est appelé par **DRFN** (Detection and Replacement approach of a Failing Node) consiste à détecter et remplacer un nœud qui tombe en panne dans un réseau de capteurs sans fil pour maintenir la connectivité et la couverture du réseau. Lorsqu'un nœud tombe en panne, l'un de ses voisins avec une énergie plus élevée le remplace et assure ses fonctions, tandis que l'un des voisins de ce dernier prend sa place et assure ses fonctions, et ainsi de suite, jusqu'à ce que toutes les zones du réseau soient couvertes. Si un nœud ne peut pas être remplacé parce qu'il n'a pas de voisin disponible pour le remplacer, il continue à assurer ses fonctions en se déplaçant périodiquement entre son emplacement et celui du nœud défaillant. La sélection du nœud de remplacement se fait en fonction de son niveau d'énergie, du nombre de ses voisins et de sa distance par rapport au nœud défaillant. L'objectif est de maintenir la connectivité et la couverture du réseau tout en optimisant la durée de vie globale du réseau.

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

Dans [85], les auteurs proposent une approche appelée **CASA** (Coverage-Aware Sensor Automation) dans le but de fournir une surveillance efficace des environnements de détection intelligents. Cette méthode implique l'utilisation de capteurs hétérogènes équipés de fonctions d'actionnement pour permettre un auto déploiement des capteurs. Elle est constituée de deux algorithmes : un algorithme de déploiement global des capteurs et un algorithme local de récupération de couverture conscient de la couverture. Afin de réaliser un réseau de surveillance intelligent automatisé, les auteurs ont proposé un protocole d'automatisation de capteurs comprenant deux algorithmes centralisés : un algorithme de forces virtuelles amélioré avec des forces aux limites et un algorithme d'auto-organisation des capteurs en présence de défaillances de nœuds.

L'approche **NAPS** a été proposé par [86], (Node Availability and Power-aware Selection) qui est une méthode de maintenance de la topologie des réseaux de capteurs sans fil (WSN) dans des environnements où les nœuds sont susceptibles de tomber en panne en raison d'un manque d'énergie. Elle sélectionne un nœud de secours parmi les nœuds voisins en fonction de sa disponibilité et de son niveau de puissance. Cette sélection est effectuée de manière distribuée par les nœuds eux-mêmes. Si un nœud tombe en panne, ses nœuds voisins déterminent le nœud de secours en fonction de critères de disponibilité et de puissance. L'approche vise à minimiser le nombre de remplacements de nœuds en utilisant des algorithmes d'optimisation pour déterminer le nœud de secours le plus efficace en termes d'énergie et de connectivité. De plus, elle prend en compte la mobilité des nœuds en considérant la distance entre les nœuds voisins et en tenant compte de la variation de la puissance de transmission due aux déplacements des nœuds.

Un algorithme de clustering a été développé dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN) par [87], qui est appelé **CEC** (Cluster-based Energy-efficient Coverage). Il s'agit d'un algorithme distribué et auto-organisé qui permet d'organiser les nœuds du réseau en groupes (ou clusters) autonomes et coopératifs pour améliorer l'efficacité énergétique et la couverture du réseau. Dans l'algorithme **CEC**, chaque nœud sélectionne le nœud le plus proche comme tête de cluster, puis il rejoint le cluster de cette tête de cluster. Les têtes de cluster sont ensuite sélectionnées pour former une couverture de nœuds qui couvre l'ensemble de la zone de surveillance. Les nœuds peuvent appartenir à plusieurs clusters, et certains nœuds peuvent être désignés comme passerelles pour relier les clusters entre eux. Il utilise des techniques de contrôle d'énergie pour prolonger la durée de vie des batteries des nœuds. Les têtes de cluster sont chargées de collecter les données des nœuds de leur cluster, de les agréger et de les transmettre aux nœuds passerelles ou à la station de base. Les nœuds peuvent être activés ou désactivés en fonction de leur état d'utilisation et de la qualité du signal.

Les auteurs de [88], ont présenté une approche nommée **DARA** (Dynamic Application-aware Resource Allocation), qui propose une méthode de gestion des ressources pour les réseaux de capteurs sans fil. Selon cette approche, la détection d'un nœud défaillant ne nécessite un ajustement de la

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

topologie du réseau que s'il divise ce dernier en parties distinctes. Autrement dit, la zone de couverture du nœud défaillant peut rester sans couverture si sa défaillance ne partitionne pas le réseau, même en présence de nœuds redondants dans son voisinage. DARA se concentre ainsi sur la maintenance de la connectivité, sans se préoccuper de la couverture du réseau. Dans cette approche, un substitut du nœud défaillant ou déplacé quitte définitivement sa zone sans couverture, même si aucun autre nœud ne peut le remplacer par la suite. En termes de couverture, ce nœud peut être considéré comme défaillant s'il laisse sa zone sans couverture.

Dans « **Coverage holes reduction in movable sensor networks using minimum movement technique** » [89], les auteurs présentent une stratégie en deux parties pour améliorer la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs mobiles. La première partie, appelée "migration des nœuds", consiste à déplacer des nœuds spécifiques pour réduire le nombre de liens brisés tout en maintenant la connectivité globale. Les auteurs ont utilisé l'algorithme de Dijkstra pour déterminer quels nœuds doivent être déplacés en fonction de leur connectivité et de leur impact sur le réseau. La deuxième partie, appelée "Minimum Movement Technique (MMT)", cherche à minimiser les "trous de couverture" causés par la migration des nœuds. Cette technique utilise un algorithme d'optimisation pour trouver la configuration optimale des nœuds en déplaçant le moins de nœuds possible pour réduire les zones non couvertes. Ces deux techniques sont considérées comme des stratégies d'auto-organisation car elles permettent au réseau de s'adapter aux changements de manière autonome et sans intervention externe.

Une stratégie a été développée dans [90], qui est nommé par **SECOAS** c'est un système de surveillance environnementale basé sur un réseau de capteurs sans fil auto-organisé. Les capteurs collectent des données environnementales et s'auto-organise en clusters pour économiser l'énergie et prolonger leur durée de vie. Des acteurs mobiles peuvent être utilisés pour rétablir la connectivité en cas de défaillance d'un capteur ou d'une liaison. L'objectif principal est de fournir des données précises et fiables pour la prise de décisions en matière d'environnement dans des environnements difficiles.

Les auteurs dans [91] ont traité un problème de relocalisation des capteurs en cas de panne et propose une solution en deux phases. Dans la première phase, des capteurs redondants sont identifiés en utilisant la solution "quorum de grilles" pour les localiser rapidement. Cette solution permet d'économiser du temps et des ressources en évitant la recherche exhaustive de chaque capteur individuellement. Dans la deuxième phase, les capteurs défectueux sont remplacés à leur emplacement cible en utilisant le mouvement en cascade.

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

Une stratégie de tolérance aux pannes appelée **NARF** (Novel approach for replacement of a Failure Node in Wireless sensor network), qui été proposer par les auteurs dans [92] est une nouvelle approche de remplacement d'un nœud défaillant dans un réseau de capteurs sans fil. Le principe général de cette approche est de sélectionner le meilleur nœud de remplacement en fonction d'un ensemble de critères, tels que la proximité avec le nœud défaillant, tout en considérant la durée de vie du réseau. Dans leur proposition, l'énergie totale consommée pour la restauration de la connexion est partagée entre plusieurs nœuds, de sorte que la consommation d'énergie individuelle serait minimale et donc prolongerait la durée de vie du réseau.

III.3.1 Quelques processus importants dans stratégie NARF

- Regroupement (Clustering)

Le regroupement est une technique de gestion de la topologie des réseaux de capteurs sans fil qui permet de regrouper les nœuds en groupes appelés "clusters". Cela permet de réduire la surcharge de communication et d'exploiter l'agrégation de données pour économiser l'énergie des nœuds. Il est utilisé pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau, en permettant de réduire le nombre de transmissions nécessaires et en permettant aux nœuds d'être mis en veille lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Les topologies WSN sont classées en quatre types de modèles, comme illustré à la **Figure [93]** :

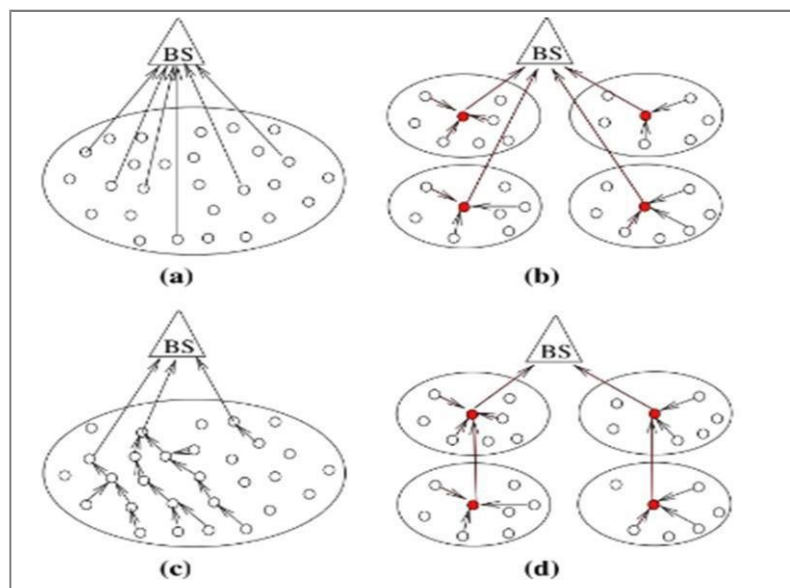


Figure n° III.6 : Classification des topologies de réseau de capteurs sans fil.

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

- **Les modèles à saut unique** : Sont des topologies de réseaux de capteurs sans fil dans lesquelles tous les nœuds capteurs transmettent directement leurs données à la station de base (BS) (Figure III.6.a et Figure III.6.b). Bien que ce modèle soit simple, il n'est pas pratique pour les zones étendues car les coûts de transmission deviennent coûteux en termes de consommation d'énergie et dans le pire des cas, la station de base peut devenir inaccessible en raison de la distance. Par conséquent, cette architecture est souvent limitée aux petits réseaux de capteurs sans fil qui couvrent des zones relativement restreintes.
- **Les modèles à sauts multiples** : Les modèles multi-sauts (**Figure. III.6 c et III.6 d**) permettent aux réseaux de capteurs sans fil de couvrir de vastes zones en utilisant des transmissions multi-sauts les auteurs dans [93] utilisent le modèle plat (**figure III.6 c**) et le modèle de regroupement (**figure III.6 d**).

Dans le modèle multi saut plat tous les nœuds doivent partager les mêmes informations telles que les tables de routage, ce qui peut entraîner une surcharge en termes de consommation d'énergie et de ressources. En revanche dans le modèle multi-saut de regroupement : les nœuds capteurs peuvent maintenir une faible consommation d'énergie et une faible surcharge car les nœuds de tête de chaque cluster agrègent les données et les transmettent à la station de base. En outre, le modèle multi-saut de regroupement permet une gestion plus efficace des ressources en évitant les collisions entre les clusters et en permettant une réutilisation des ressources de manière orthogonale pour chaque cluster. Cela en fait un modèle plus approprié pour les réseaux de capteurs sans fil déployés dans de vastes zones éloignées.

Dans la solution proposée (NARF), le modèle de regroupement a été choisi avec déchargeant les nœuds de tête de cluster de la tâche de routage entre les nœuds de tête de cluster. Cette tâche est assignée aux passerelles. Chaque regroupement se réfère à un nœud représentatif appelé nœud de tête de cluster, qui est responsable de la coordination du routage au sein de son cluster, tandis que les passerelles assurent la connexion entre les différents clusters. Les méthodes d'élection des têtes de cluster et de choix des nœuds de passerelle sont étudiées en profondeur dans la littérature [94,95].

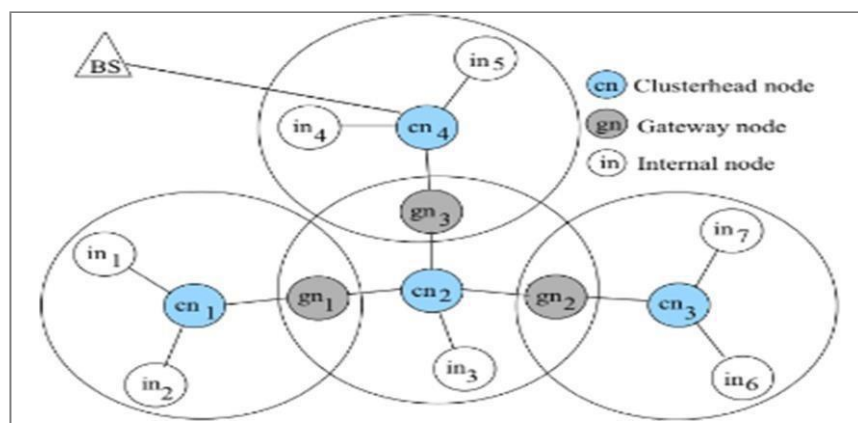


Figure n° III.7 Modèle à multi-sauts en regroupement.

▪ L'élection d'un nœud de tête de cluster (clusterhead)

Le choix du nœud de tête de cluster est un processus très important qui doit tenir compte de plusieurs facteurs pour élire le nœud le plus approprié [96]. Certains de ces facteurs incluent la position du nœud par rapport aux autres nœuds, la mobilité, l'énergie, la confiance et le débit du nœud. Compte tenu des ressources limitées des nœuds du WSN, le processus d'élection doit également tenir compte des limitations de traitement et d'énergie des nœuds [97]. Ainsi, un compromis entre l'énergie potentielle et la distance entre les nœuds voisins est essentiel pour la sélection du nœud de tête de cluster. Si la distance est grande, la probabilité que le nœud soit élu comme tête de cluster pour son voisin doit diminuer, ce qui diminue son poids. Pour prendre cela en compte, le poids d'un nœud (w_n) en fonction de son pourcentage d'énergie et de la distance qui le sépare de son voisin dans la formule suivant :

$$w_n = \frac{\%energy}{\alpha \times distance}$$

Où :

- **Distance** est la distance séparant le nœud de son voisin.
- **α** est une variable empirique (fixée à 1 pour des raisons de simplification).

▪ La dissipation d'énergie

L'étude des protocoles pour les radios à faible consommation d'énergie est un domaine de recherche crucial. Les caractéristiques des radios, telles que la consommation d'énergie en mode transmission et réception, peuvent influencer les performances des différents protocoles. Dans leurs études, ils basent sur le modèle présenté dans la figure 4 de l'article [98]. Ce modèle utilisé pour estimer la quantité d'énergie dépensée par une radio pour transmettre et recevoir des données sur une distance donnée.

Pour transmettre un message de k bits sur une distance d , la radio doit dépenser de :

$$ET_x(k, d) = ET_{x-elec}(k) + ET_{x-a}(k, d)$$

$$ET_x(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^2$$

De même, pour recevoir un message de k bits, la radio doit dépenser de l'énergie pour l'électronique de réception (ER_x-elec) qui est donnée par la formule :

$$ER_x(k) = ER_{x-elec}(k)$$

$$ER_x(k) = E_{elec} * k$$

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

Ce modèle suppose que l'énergie dépensée pour l'électronique de transmission est égale à celle de la réception. Ces informations sont importantes pour comprendre comment les différents protocoles de communication sans fil peuvent être comparés en termes de consommation d'énergie.

$$E_{Tx\text{-elec}} = E_{Rx\text{-elec}} = E_{elec}.$$

Où :

- **$E_{Tx\text{-elec}}$** : est la consommation d'énergie des électroniques de transmission
- **$E_{Tx\text{-amp}}/\epsilon_{amp}$** : est l'énergie dissipée par l'amplificateur émetteur pour obtenir un signal acceptable
- **$E_{Rx\text{-elec}}$** : est la consommation d'énergie des électroniques de réception
- **$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d$** : La quantité d'énergie dépensée pour la transmission

III.3.2 Procédure de l'approche NARF :

La méthode NARF (New Approach for Replacement of Failed Node) consiste à diviser le réseau en clusters pour faciliter la recherche de nœuds redondants en cas de panne. Un nœud redondant est défini comme un nœud dont la zone est entièrement couverte par ses voisins directs. Dans un premier temps, les têtes de cluster cherchent des nœuds redondants dans leur cluster, en mettant à jour mutuellement leurs informations. Ensuite, la seconde phase consiste à restaurer la connectivité. Cette méthode est particulièrement utile pour les réseaux de capteurs sans fil, où la perte d'un nœud peut entraîner des perturbations importantes. L'approche NARF comprend les trois étapes principales suivantes :

III.3.2.1 Processus de recherche de nœuds redondants

Après le déploiement du réseau et l'élection des têtes de cluster, ces dernières identifient les capteurs redondants. Pour ce faire, chaque tête de cluster identifie les capteurs redondants dans son propre cluster et diffuse un message annonçant ses capteurs redondants à travers les capteurs Gateway. Etant donné que chaque tête de cluster a uniquement connaissance des capteurs redondants dans son propre cluster, si une tête de cluster reçoit un message contenant des capteurs redondants, elle met à jour sa table RST (table des capteurs redondants) et envoie à nouveau le message à toutes les passerelles, sauf celle qui a reçu le message pour éviter une boucle infinie. L'algorithme 1 (enum-red()) décrit le processus d'énumération et d'envoi de la liste de capteurs redondants (RSL) effectué par la tête de cluster pour recenser les capteurs redondants.

Algorithme 1 Enum-red ()

```

SL ← {} ; // Initialisation
Pour tout capteur S appartenant à son cluster
  Si (S est redondant) Alors
    RSL ← RSL U S.id_capteur ; //S.id_capteur : identifiant du capteur
  S ;
  Fin Si ;
Fin Pour ;
Pour tout capteur S appartenant à son cluster
  Si (S.typ_capteur = "Passerelle") Alors
    Envoyer le message RSL_message ;
  Fin Si ;
Fin Pour ;
    
```

Les lignes 2 à 6 détaillent la procédure d'identification des capteurs redondants au sein de chaque cluster, tandis que les lignes 7 à 11 expliquent comment le message RSL_message, qui contient la liste RSL avec les nœuds affiliés et leurs positions, est envoyé à toutes les passerelles. La complexité de l'algorithme 1 dépend du nombre de clusters (n) et du nombre maximal de nœuds dans un cluster (m), et est de l'ordre de $O(mn)$.

L'algorithme 2 (RSL-receiv ()) décrit le processus de réception du message RSL_message par un nœud capteur. Ce dernier décrit les actions que le nœud doit entreprendre en réponse à la réception du message.

Algorithme 2 RSL-receiv () :

```

Si (message RSL_message reçu) Alors
  Si (typ_sensor = "tête de cluster") Alors
    Mettre à jour la RST ; // Tableau des capteurs redondants
  Fin Si ;
  Si (typ_sensor = "passerelle") Alors
    Pour tout capteur S ∈ CL faire // CL : liste des têtes de cluster
      Si (source du message RSL_message = S) Alors
        Envoyer le message RSL_message ;
      Fin Si ;
    Fin Pour ;
  Fin Si ;
  Si (typ_sensor = "nœud interne") Alors
    Ignorer le message ;
  Fin Si ; Fin Si ;
    
```

CHAPITRE III : Auto-organisation des RCSFs

Les instructions de l'algorithme 2 détaillent les étapes de réception d'un message RSL par différents types de nœuds. Les lignes 2 à 4 décrivent le processus de réception d'un message RSL par une tête de cluster, tandis que les lignes 5 à 11 décrivent le processus de réception d'un message RSL par une passerelle de capteur. Les lignes 12 à 14 expliquent comment un nœud interne de capteur reçoit un message RSL envoyé à son cluster. La complexité de l'algorithme 2 est de $O(m)$, où m représente le nombre maximal de nœuds dans un cluster.

III.3.2.1.1 Processus Détection de panne

Après le déploiement du réseau, le nœud capteur envoie un bref message "détecter" et attend ensuite un temps court prédéfini T . Si le nœud capteur ne reçoit pas de réponse dans le temps imparti (T), il considère que le nœud destinataire du message est défaillant. Ce temps T est équivalent au temps nécessaire pour le retour du message et au temps de traitement. Ce processus est répété après chaque période d'attente prédéfinie pour surveiller régulièrement l'état du réseau.

III.3.2.1.2 Processus Détection de panne

Après le déploiement du réseau, le nœud capteur envoie un bref message "détecter" et attend ensuite un temps court prédéfini T . Si le nœud capteur ne reçoit pas de réponse dans le temps imparti (T), il considère que le nœud destinataire du message est défaillant. Ce temps T est équivalent au temps nécessaire pour le retour du message et au temps de traitement. Ce processus est répété après chaque période d'attente prédéfinie pour surveiller régulièrement l'état du réseau.

III.3.2.1.3 Processus de remplacement de nœud défaillant

Lorsqu'un nœud redondant est désigné pour remplacer un nœud défaillant, déplacer directement le capteur redondant vers l'emplacement du nœud défaillant peut prendre trop de temps et consommer beaucoup d'énergie, risquant ainsi de causer la défaillance du capteur déplacé. Pour résoudre ces problèmes, il est suggéré d'utiliser une approche de mouvement en cascade (Voir Figure III.8), où plusieurs capteurs se relaient pour se rapprocher du nœud défaillant tout en partageant la perte d'énergie, jusqu'à ce que le capteur redondant puisse prendre sa place. Cette méthode réduit à la fois le temps d'attente et la consommation d'énergie, ce qui en fait un élément clé de la solution proposée pour remplacer un nœud défaillant par un nœud redondant.

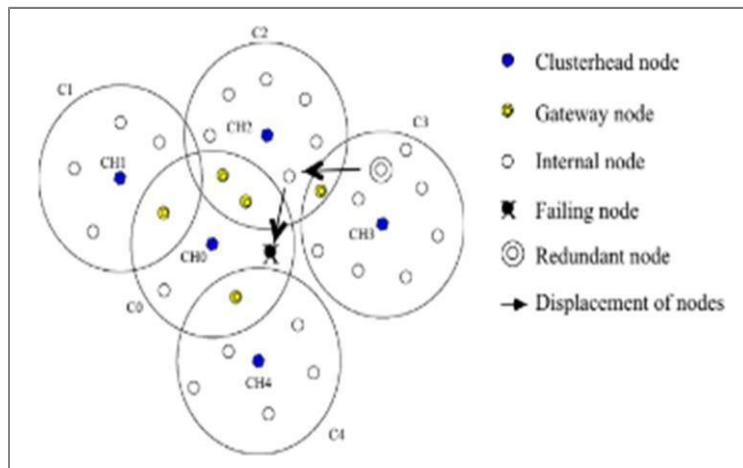


Figure n°III.8 : Mouvement en cascade.

Dans la figure 5, CH2 est désigné pour remplacer le nœud défaillant, car aucun de ses voisins directs n'a de nœud redondant et CH2 possède plus de nœuds parmi les voisins de CH0. Ensuite, CH2 cherche parmi ses voisins celui qui a un nœud redondant (ou qui a plus de nœuds internes) et trouve CH3, qui demande à son nœud redondant de se déplacer pour remplacer le nœud déplacé du cluster C2. Ce mouvement en cascade permet de surveiller la zone du nœud défaillant sans interruption.

a. Tête du cluster(Clusterhead)

Si un nœud capteur interne détecte un nœud défaillant F_n ou reçoit un message `elect_message` (message pour l'élection du remplacement du tête de cluster (clusterhead) défaillant) (Voir FigureIII.9), alors il exécute l'algorithme 3 (`detect-fail ()`).

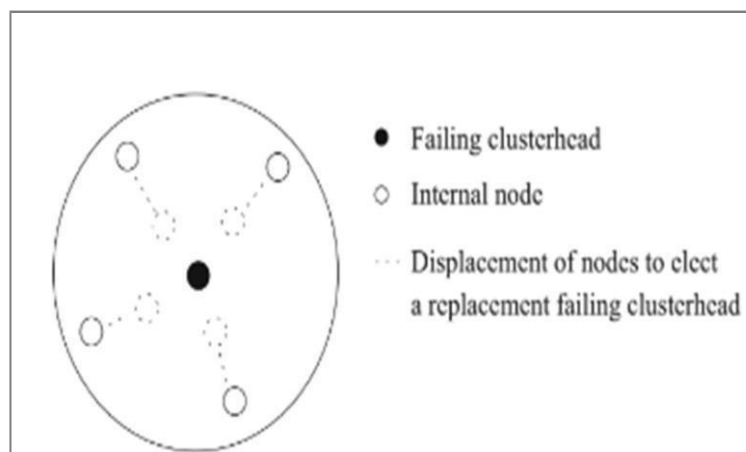


Figure n°III.9 Détection de tête de cluster échouant

Algorithme 3 décrit les actions à effectuer par un nœud interne du cluster en cas de détection d'un chef de cluster défaillant. Les lignes 9•12 décrivent le processus de réception de `elect_message` par un capteur de nœud interne. La complexité de l'algorithme 3 est $O(in)$, où in est le nombre de nœuds capteurs.

L'algorithme 3 (detect-fail ())

```
Si (détection d'un capteur f n défaillant) Alors
  Élu ← faux ;
  Si (fn.typ_sensor = "tête de cluster") Alors
    Élu ← vrai ;
  Se déplacer à une distance de Rc/2 de f n ;
  Diffuser le message elect_message contenant son niveau d'énergie ;
  Répéter
  Attendre une période de temps t1 ;
  Si (message elect_message reçu et niveau d'énergie < niveau d'énergie sur le
      capteur émetteur) Alors
    Élu ← faux ;
  Retourne à sa place ;
  Fin Si ;
  Jusqu'à ce que (élu = faux) ou (temps écoulé t2 =  $\alpha t1$ ) ;
  Si (élu = vrai) Alors
    Se déplacer pour assurer les fonctions de la tête de cluster défaillante ;
  Fin Si ;
  Fin Si ;
  Fin Si ;
```

b) Nœud passerelle(Gateway)

La défaillance d'un nœud passerelle (gn) peut entraîner la déconnexion de son cluster des autres clusters, en particulier s'il est le seul pont qui le relie au reste du réseau. Pour résoudre ce problème, la première priorité du chef de cluster est de se reconnecter en sélectionnant un nœud interne du cluster pour remplacer le nœud passerelle défaillant. Cependant, si le nœud passerelle est détecté par plus d'un chef de cluster, cela peut créer un problème. Pour résoudre ce problème, une solution primitive est proposée dans l'algorithme 4, qui implique que les chefs de cluster conviennent de qui gèrera la reconnexion entre leurs clusters. L'algorithme a une complexité de $O(ch.)$, où $ch.$ est le nombre de chefs de cluster.

Algorithme 4 détecter-Gatt ()

```

Elected ← faux ; // Initialisation
Si (détection d'un capteur gn défaillant et gn.typ_sensor =
"Gateway") Alors
    Elected ← vrai ;
    Se déplacer à une distance de Rc/2 à gn ;
    Diffuser le message élect_Gat_message contenant le nombre de
nœuds internes dans son cluster ;
    Répéter
    Attendre un temps t1 ;
    Si (message élect_Gat_message reçu et le nombre de nœuds est
    inférieur au nombre de nœuds internes du clusterhead qui
    envoie le message) Alors
        Elected ← faux ;
        Retourner à sa place ;
    Fin Si ;
Jusqu'à ce que (elected =faux) ou (délai t2 = αt1) ;
Fin Si ;

```

Après la détection de la défaillance de la passerelle, le chef de cluster élu exécute l'algorithme 5 (repl-Gat ()) pour élire un nœud interne qui remplacera la passerelle défaillante. Le chef de cluster demande à ses capteurs d'envoyer leur taux d'énergie et sélectionne le nœud avec le taux le plus élevé. Le clusterhead envoie un message de remplacement "repl_Gat_message" aux nœuds internes de son cluster (lignes 2-6), puis sélectionne le nœud interne avec la plus grande quantité d'énergie (voir lignes 7-14).

Une fois qu'il a reçu des réponses de tous les nœuds internes, le clusterhead envoie un message de remplacement (ligne 15) au nœud élu contenant le nœud qui doit être remplacé et assurant ses fonctions. L'algorithme 5 a une complexité $O(2i_n)$, où i_n est le nombre maximal de nœuds internes dans un cluster.

L'algorithme 5 repl-Gat () :

```

Si (élu) Alors
  Pour tout capteur S appartenant au cluster Do
    Si (S.typ_sensor = "nœud interne") Alors
      Envoyer le message repl_Gat_message ;
    Fin Si ;
  Fin Pour ;
  Répéter
    Attendre un message ;
    Si (message de réponse repl_Gat_message reçu) Alors
      Si (premier message) ou (quantité d'énergie de l'émetteur >
quantité d'énergie du substitut) Alors
        Substitut ← émetteur ;
      Fin Si ;
    Fin Si ;
  Jusqu'à (réception de la réponse de tous les nœuds internes)
;
  Envoyer un message de remplacement au nœud élu pour le
remplacement ;
Fin Si ;

```

c) Nœud interne

Lorsqu'un nœud interne tombe en panne ou est déplacé dans un cluster de nœuds de capteur, le clusterhead prend des mesures pour trouver un nœud de remplacement. Cette procédure se déroule en plusieurs étapes consécutives, qui consistent à rechercher des nœuds redondants dans la liste RSL du clusterhead, ainsi que dans les clusters voisins.

- Le clusterhead interroge sa liste RSL pour identifier un nœud redondant capable de remplacer le nœud défaillant. Si un tel nœud est disponible, le clusterhead choisit un nœud dans son propre cluster pour remplacer le nœud défaillant.
- Si la RSL ne contient aucun nœud redondant, le clusterhead élargit sa recherche aux clusters voisins. Il demande alors à ces clusters de chercher un nœud redondant qui pourrait remplacer le nœud défaillant. Si un nœud redondant est trouvé, le clusterhead demandeur envoie une demande au nœud redondant pour qu'il rejoigne son propre cluster et remplace le nœud défaillant.

L'algorithme 6 (fail-detect ()) fournit une description détaillée de cette procédure de recherche de nœuds redondants. La complexité temporelle de cet algorithme est de l'ordre de $O(r)$, où r représente le nombre maximal de nœuds redondants dans le système.

Algorithme 6 détection-d 'échec ()

```
Si (RSL =  $\varnothing$ ) Alors  
    S'il existe des capteurs redondants dans son groupe,  
    alors  
        Sélectionner parmi eux en fonction du critère de taux  
        d'énergie  
    Sinon  
        Envoyer un message, contenant les coordonnées du  
        nœud sélectionné, au clusterhead qui a plus de nœuds  
        redondants ;  
    Fin Si ;  
    Sinon  
        Envoyer un message search_red, contenant  
        l'emplacement du nœud défaillant à ses voisins directs ;  
    Fin Si ;
```

Lorsqu'un clusterhead reçoit le message search_red de ses voisins, il exécute l'algorithme 7 (reception-search-red ()) qui décrit sa réponse à la demande de recherche d'un nœud redondant. Les voisins du clusterhead élisent un nouveau clusterhead parmi eux en fonction du nombre de leurs nœuds redondants ou du nombre de leurs nœuds internes. Si le nouveau clusterhead a des nœuds redondants, il en choisit un qui a un taux d'énergie élevé. Sinon, il sélectionne l'un de ses nœuds internes avec le même critère. La complexité de cet algorithme est $O(ch)$, où ch est le nombre de clusterheads.

Algorithme 7 receipt-search-red ()

Si (search_red reçu) alors
 Élu ← vrai ;
 Se déplacer à une distance de $R_c/2$ du nœud émetteur ;
 Diffuser un message contenant le nombre de nœuds redondants dans la
 liste RSL ou le nombre de nœuds internes dans son cluster ;
 Répéter
 Attendre un message ;
 Si (message reçu) alors
 Si (RSL = \varnothing) et (le nombre de nœuds redondants dans la RSL du
 message reçu est > au nombre dans la RSL) alors
 Élu ← faux ;
 Retourner à sa place ;
 Sinon si (RSL = \varnothing) et (la RSL reçue n'est pas vide ou le nombre de
 nœuds internes dans le message reçu est > au nombre de nœuds internes)
 alors
 Élu ← faux ;
 Retourner à sa place ;
 Fin si ;
 Fin si ;
 Fin si ;
 Jusqu'à (temps suffisant pour l'élection) ;
 Si (élu = vrai) alors
 Si (RSL = \varnothing) alors
 Sélectionner le nœud redondant qui a le plus d'énergie et envoyer un
 message contenant les coordonnées du nœud à remplacer
 Sinon
 Sélectionner l'un de ses nœuds internes et envoyer un message contenant
 les coordonnées du nœud à remplacer ;
 Fin si ;
 Fin si ;
 Fin si ;

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les notions fondamentales de l'auto organisation, notamment sa définition et ses objectifs, ainsi que les principales structures et protocoles liés. Nous avons également examiné plusieurs travaux portant sur la tolérance aux pannes en utilisant l'auto organisation.

Nous avons conclu que les réseaux de capteurs sans fil peuvent rencontrer de défaillances de nœuds qui affectent leur connectivité globale. Pour résoudre ce problème, une approche innovante en deux phases a été proposée pour remplacer un nœud défaillant, en utilisant un algorithme distribué pour restaurer la connectivité du réseau. Cette approche, appelée NARF, implique une répartition équitable de la consommation d'énergie nécessaire pour rétablir la connectivité, ce qui permet de minimiser les défaillances précoces des nœuds de capteurs et d'optimiser la durée de vie du réseau.

Chapitre 4

Simulation et discussion des résultats

IV.1 Introduction

L'objectif principal de notre étude est d'analyser la capacité des réseaux de capteurs à s'auto-organiser et à tolérer les pannes. En d'autres termes, nous nous intéressons à la capacité du réseau à reconfigurer sa structure pour compenser les capteurs défectueux et maintenir le bon fonctionnement global. Nous commençons par décrire les outils d'implémentation disponibles pour la création de réseaux de capteurs. Ensuite, nous abordons la problématique des nœuds défectueux dans les réseaux de capteurs et présentons deux scénarios de remplacement. Nous nous concentrons sur l'utilisation de nœuds redondants situés dans le même cluster ou dans autre cluster pour assurer la continuité des opérations. Nous détaillons les critères de sélection des nœuds redondants, tels que l'énergie, la fiabilité et la distance, et nous évaluons les performances de ces scénarios en termes de temps de construction du DODAG (Directed Acyclic Graph) et de consommation d'énergie.

Enfin, nous analysons les résultats obtenus dans nos simulations, en mettant en évidence les variations des temps de construction du DODAG en fonction des métriques utilisées et du nombre de nœuds. Nous discutons également de l'impact du mouvement des nœuds sur les performances du réseau.

IV.2 Environnement de simulation

Les caractéristiques du PC sur lequel les simulations ont été effectuées sont :

- **Processeur** : Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU @ 2.00 GHz 2.00 GHz
- **RAM** :8.00 Go
- **Machine virtuelle** : VMware
- **Système exploitation** : CONTIKI 2.7
- **Simulateur** : COOJA

IV.3 Outils d'implémentation et de simulation

Les réseaux de capteurs sont considérés comme faisant partie des systèmes ayant des ressources limitées. Par conséquent, les outils logiciels classiques ne sont pas adaptés à leur utilisation. Heureusement, il existe des outils logiciels légers qui sont spécialement conçus pour les réseaux de capteurs, qu'il s'agisse de systèmes d'exploitation ou de langages de programmation. Dans cette partie, nous allons vous présenter une alternative aux outils logiciels classiques pour les réseaux de capteurs : le système d'exploitation CONTIKI, qui est largement reconnu pour être un système d'exploitation complet pour les réseaux de capteurs. Ensuite, nous vous présenterons le simulateur COOJA qui utilise CONTIKI comme base.

IV.3.1. Aperçu sur le système d'exploitation CONTIKI

CONTIKI est un système d'exploitation open source léger, flexible, multitâche et générique, qui utilise un modèle de fonctionnement hybride [99]. Il a été développé en 2002 par un groupe de développeurs provenant à la fois de l'industrie et du monde universitaire, sous la direction d'Adam Dunkels de l'Institut suédois d'informatique [100]. Ce système est conçu pour être intégré dans des capteurs de petite taille qui ont généralement des ressources limitées, et il a été créé en ayant en tête l'idée d'utiliser des communications IP à faible consommation d'énergie, pour les réseaux de capteurs de puissance.

Nous avons choisi CONTIKI en raison de ses avantages tels que :

- La simplicité.
- La disponibilité en open source.
- La programmation en langage C.
- La disponibilité sur le web, ainsi que la réduction de la consommation d'énergie.

IV.3.2 Simulateur COOJA

Pour effectuer les tests de simulation, nous avons utilisé le simulateur inclus dans le système Contiki, appelé Cooja, qui présente les caractéristiques suivantes :

- COOJA combine des simulations de capteur matériel de nœud et simulation du comportement de haut niveau en une seule simulation.
- COOJA offre la possibilité de tester les protocoles de communication utilisés par les capteurs
- COOJA est flexible et extensible en ce que tous les niveaux du système peuvent être modifiés ou remplacés.



Figure n°IV.1-Lancement du simulateur Cooja.

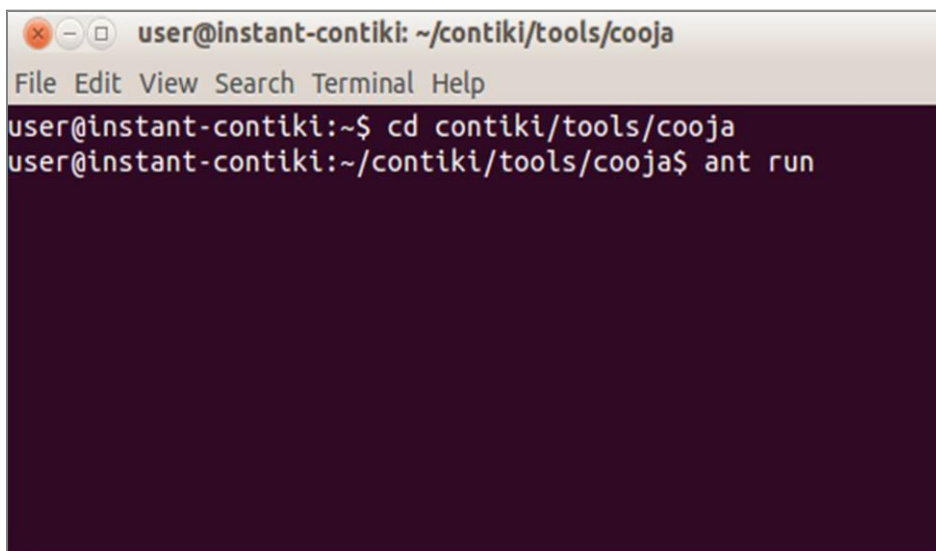


Figure n°IV.2 - L'interface principale du simulateur Cooja.

Nous présentons ci-après les différentes étapes de création utilisées pour la simulation :

1. Création d'une nouvelle simulation en cliquant sur le menu Fichier, puis sur nouvelle simulation.

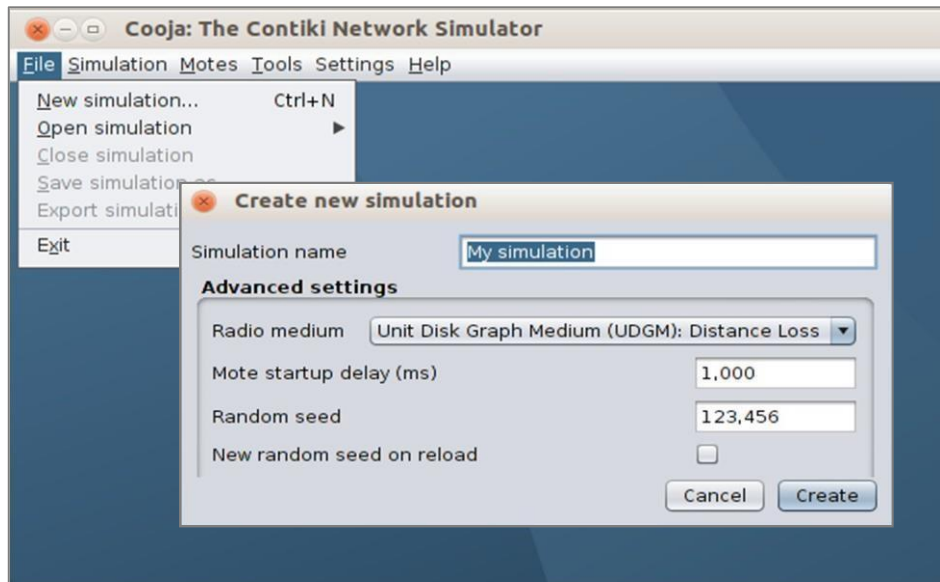


Figure n°IV.3– Création d'une nouvelle simulation.

2. Création du réseau en ajoutant des nœuds capteurs ("Sky mote") :
 - Dans le menu "Motes", sélectionnez "Nouveau type de mote" et choisissez "Sky mote"
 - Dans la boîte de dialogue "Créer un type de mote" ouverte par Cooja, conservez le nom du type de mote par défaut et cliquez sur le bouton "Parcourir". Naviguez jusqu'à votre application Contiki, qui se trouve dans le répertoire `/home/user/Contiki 3.0/examples/ipv6/rpl-collect`.
 - Sélectionnez le fichier `udp-sink.c` pour créer le nœud sink (station de base) et `udp-sender.c` pour créer des nœuds capteurs.

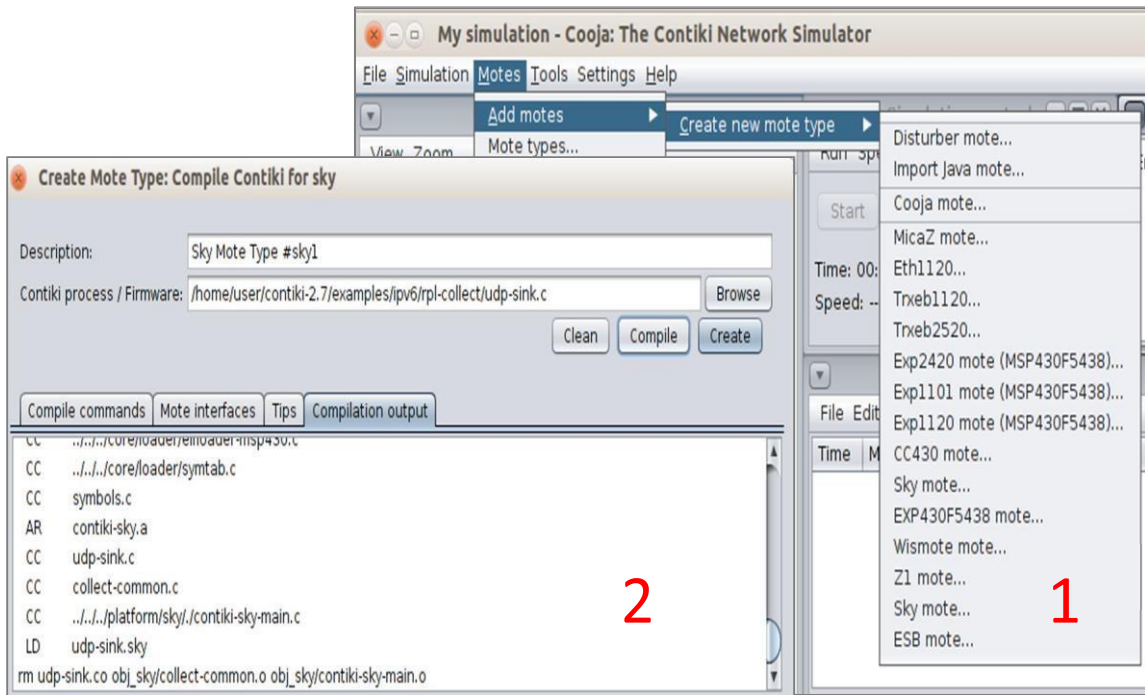


Figure n°IV.4-Création des nœuds (capteurs).

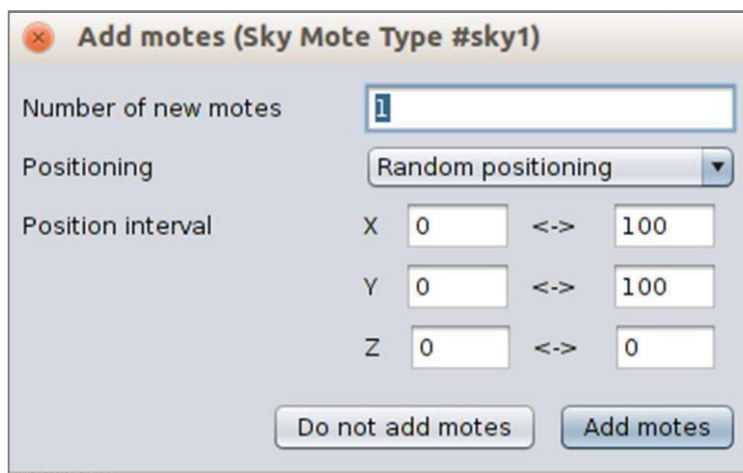


Figure n° IV.5-Nombre de nœud ajouté.

IV.4 Implémentations et déroulements de SIMULATION

IV.4.1 Paramètres des simulations et hypothèses

1. Les paramètres des simulations sont exprimés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Simulateurs	Contiki Cooja 2.7
Nombres de Nœuds	29,40,51
Le nœud puit (sink)	1
Le type de nœuds	Sky mote
Les topologies du RCSFs	Aléatoires
Protocole utilisé	RPL

Table n°IV.1 : Les paramètres de simulation

2. Hypothèses

Nous avons considéré que les clusters sont formés uniquement par les nœuds les plus proches les uns des autres. De plus, nous avons supposé que les nœuds redondants et les clusters sont placés de manière aléatoire grâce aux zones inaccessibles (zones hostiles). Nous avons également considéré que le SINK (Station de base) et les têtes de cluster ne tombent jamais n'en panne. Cependant, en cas de panne, il est nécessaire qu'un nœud remplace directement ou indirectement le nœud défaillant, que ce nœud se trouve dans le même cluster que le nœud défaillant ou dans un autre cluster. Nous avons également supposé que le nœud de remplacement choisit le nœud redondant qui présente la plus petite distance par rapport au nœud défaillant, ou bien le nœud redondant qui possède la plus grande quantité d'énergie ou encore le plus grand ETX.

IV.4.2 Stratégie de déroulement des simulations

La Figure suivante illustre l'organigramme et les étapes de l'exécution de notre simulation.

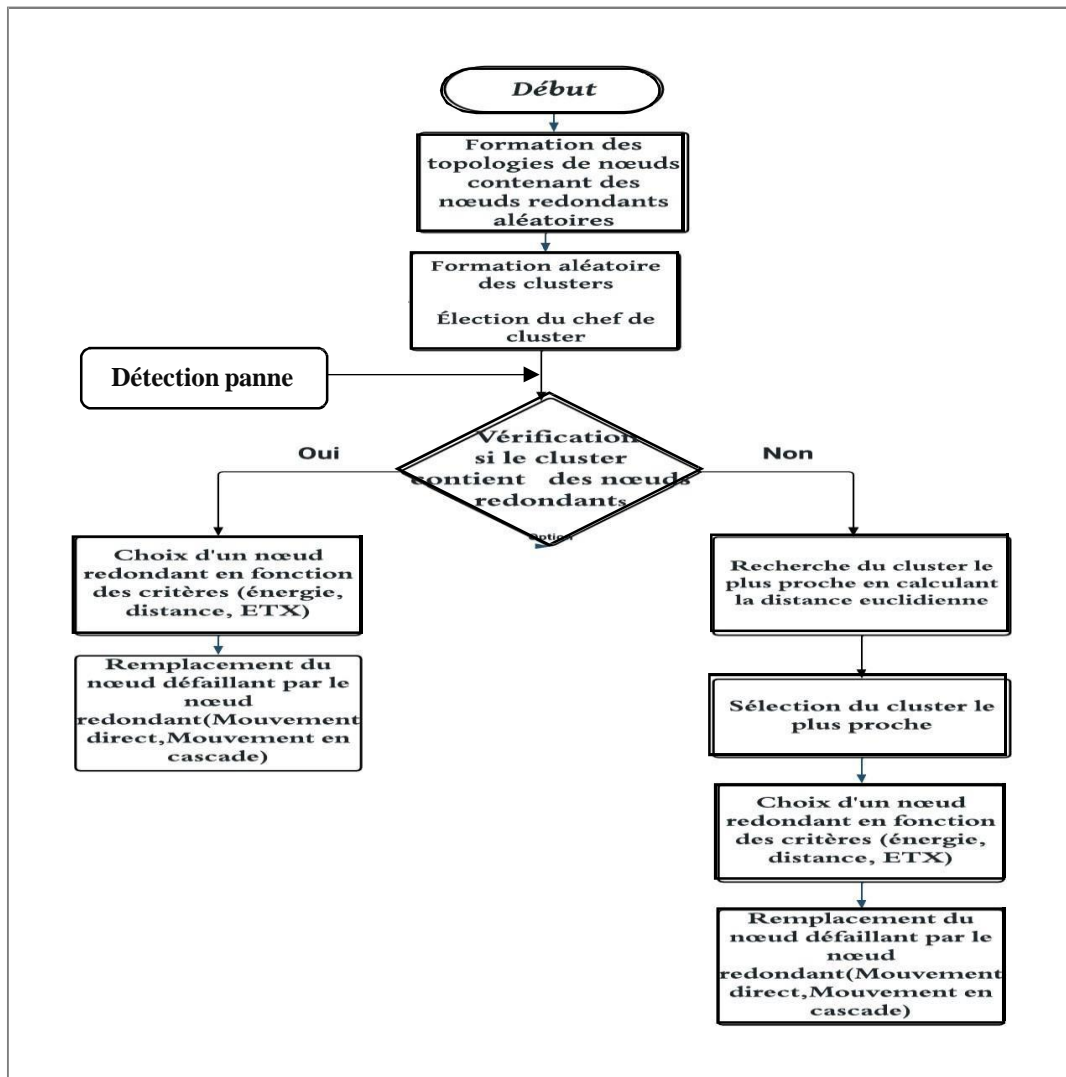


Figure n° IV.6 – Organigramme de simulation.

IV.4.3 Approche de CLUSTERING pour la tolérance aux pannes

Nous détaillons l'approche de clustering que nous utilisons pour assurer la tolérance aux pannes dans les réseaux de capteurs sans fil. Le clustering est une approche largement adoptée dans ce domaine en raison de ses nombreux avantages lorsqu'il s'agit de faire face aux pannes de capteurs. Le clustering réduit la charge de communication, prolonge la durée de vie du réseau et permet une utilisation efficace des ressources. En cas de panne d'un capteur, les données sont facilement redirigées vers un nœud redondant afin de minimiser son impact sur le réseau.

IV.4.4 Topologies et formation de clusters

Nous avons utilisé différentes topologies pour notre étude, notamment des réseaux de capteurs Composés de 29, 40 et 51 nœuds respectivement comme illustré dans **la figure (IV.7)**, Les nœuds Représentés en vert sont les nœuds "sink (station de base), les nœuds violets sont les nœuds redondants, et les nœuds jaunes sont les nœuds capteurs." Ces différentes tailles de réseaux nous permettent d'analyser les performances du système à différentes échelles et de comprendre l'impact de la taille du réseau sur la tolérance aux pannes.

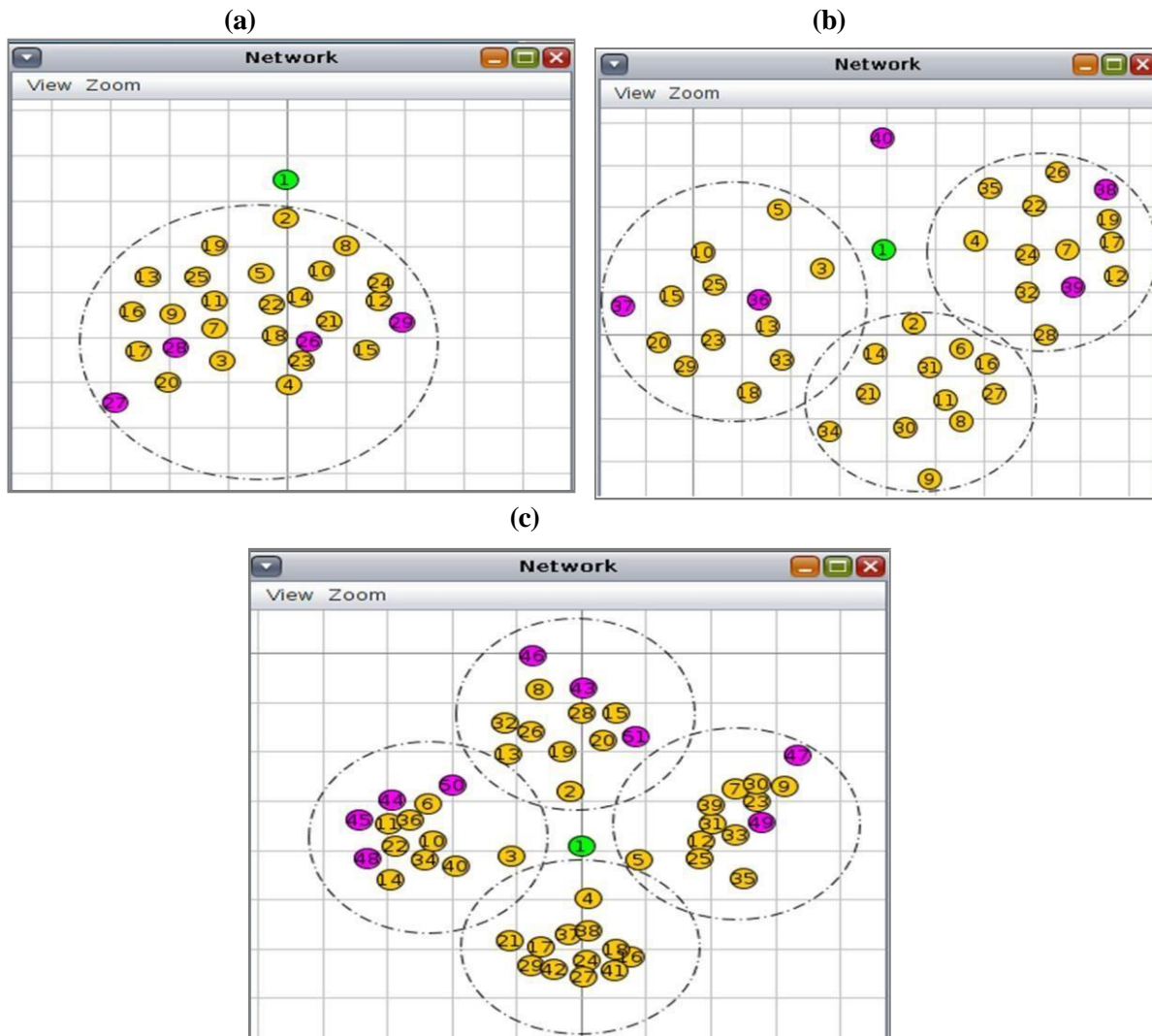


Figure n° IV.7-Les différentes topologies de simulation (a).29 nœuds (b).40noeuds (c) 51noeuds.

IV.4.4.1 La formation des clusters

La formation des clusters a été réalisée de manière aléatoire. Cela signifie que les capteurs ont été regroupés de manière aléatoire en différents clusters. Chaque cluster est composé d'un nœud tête de cluster et de plusieurs capteurs ordinaires ou redondante. La méthode de formation des clusters aléatoires et le déploiement des nœuds redondante permet de simuler des conditions réelles (zone hostiles,) où les capteurs peuvent être déployés de manière irrégulière dans un environnement. Selon la Figure IV.6 :

- **La topologie avec 29 nœuds** : Se caractérise par la présence d'un seul cluster comprenant une tête de cluster et une station de base (SINK).
- **La topologie avec 40 nœuds** : On observe la présence de trois clusters, chacun comprenant une tête de cluster et une station de base (SINK).
- **La topologie avec 51 nœuds** : On remarque la présence de quatre clusters, chacun étant composé d'une tête de cluster et d'une station de base (SINK).

IV.4.4.2 La sélection des têtes de cluster

La sélection des nœuds tête de cluster est un aspect crucial de la formation des clusters. Les nœuds tête de cluster sont responsables de la coordination et de la communication avec la station de base. Dans notre étude, nous avons utilisé des critères de sélection spécifiques pour garantir une communication directe et efficace entre les têtes de cluster et la station de base. Ces critères incluent :

- **La proximité des têtes de cluster par rapport à la station de base**
- **La communication directement avec station de base**

Sélectionnant les têtes de cluster proches de la station de base, nous optimisons l'efficacité énergétique, réduisons la latence et améliorons la coordination et la fiabilité de la transmission des données.

IV.4.5 Déroulement des simulations

Lors de notre simulation, nous avons choisi une topologie comprenant 40 nœuds pour représenter notre travail on faire la même chose a été fait pour les autre topologies (29,51 nœuds).

Une fois la simulation lancée, nous avons attendu que le DODAG (Directed Acyclic Graph) se forme. Il joue un rôle crucial dans l'organisation hiérarchique du réseau, en assurant une communication efficace entre les nœuds. Une fois que le DODAG s'est formé, nous avons examiné l'organisation globale du réseau pour comprendre les connexions entre les nœuds. La figure ci-dessus représente de la formation du DODAG :

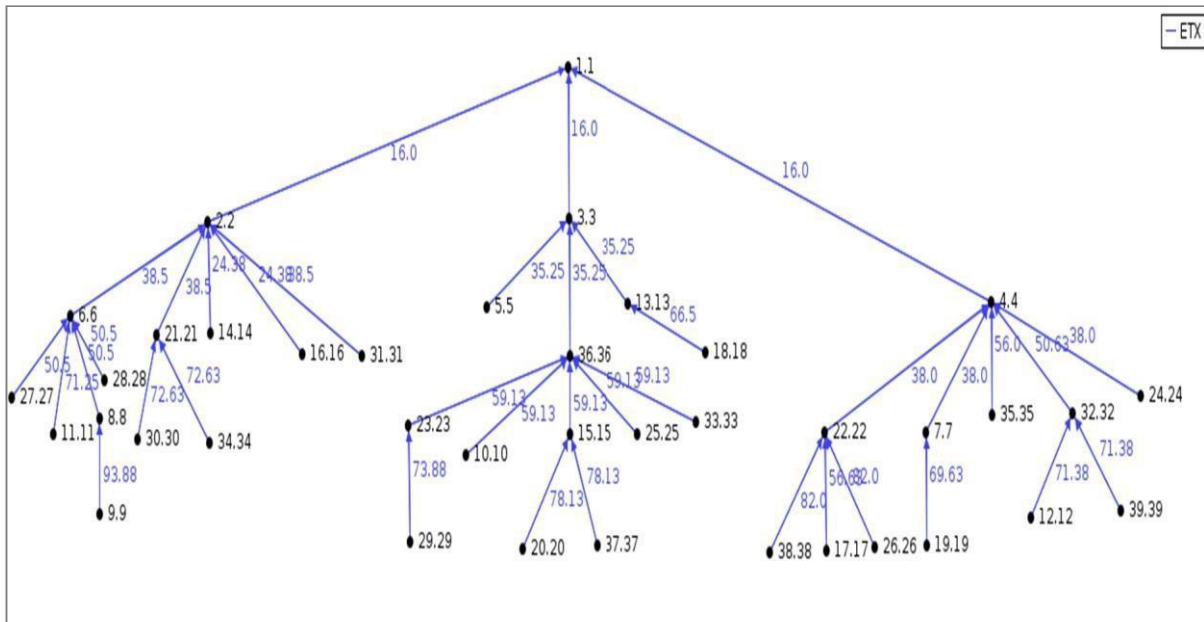


Figure n° IV.8– Formation du DODAG - Avant déclenchement d'action correctif

Par la suite, nous avons identifié un nœud défaillant dans différents clusters (**par exemple, le nœud 7 dans le cluster numéro 4 et le nœud 6 dans le cluster numéro 2**), ce qui nous a permis d'analyser l'impact de ces pannes sur le réseau. Après la défaillance, nous avons observé le DODAG résultant, où les liens associés aux nœuds défaillants ont été supprimés.

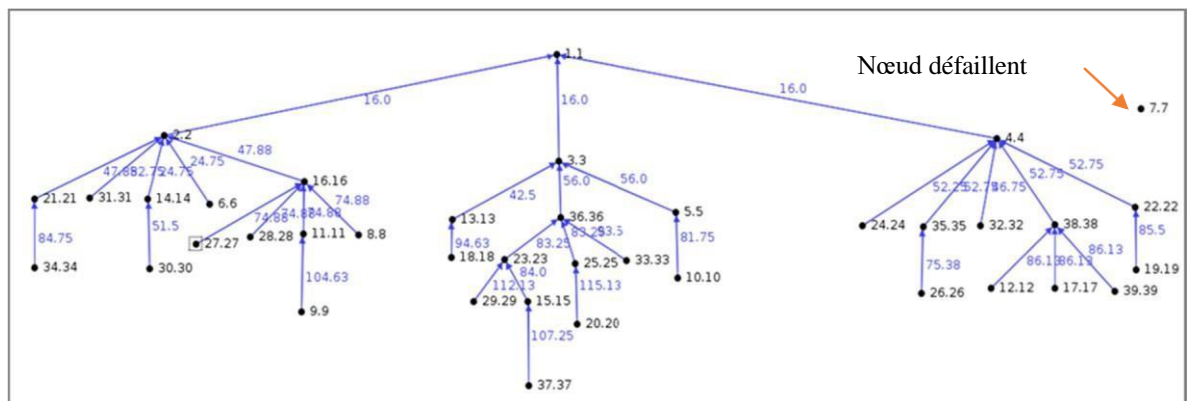


Figure n°IV.9– Formation du DODAG- durant déclenchement d'action correctif

Après la survenue d'une panne, il est essentiel de remplacer les nœuds défaillants par des nœuds redondants afin de maintenir la continuité des opérations du réseau.

IV.4.5.1 Scénarios de remplacement des nœuds défaillants

Nous présentons deux scénarios de remplacement des nœuds défaillants dans notre réseau de capteurs. Ces scénarios impliquent l'utilisation de nœuds redondants pour remplacer les nœuds défaillants, garantissant ainsi la continuité des opérations et la tolérance aux pannes.

- **1^{er} scénario le remplacement des nœuds défaillants par des nœuds redondants situés dans le même cluster** : Dans ce cas, nous avons identifié les positions des nœuds défaillants et des nœuds redondants au sein du cluster.
- **2^{ème} scénario le remplacement des nœuds défaillants par des nœuds redondants situés dans un autre cluster** : Dans ce cas, nous calculons la distance entre les différents têtes des clusters pour déterminer le cluster approprié contenant des nœuds redondants pouvant remplacer les nœuds défaillants. Nous utilisons des techniques de calcul de distance, telles que la distance euclidienne, pour déterminer la proximité entre les clusters.

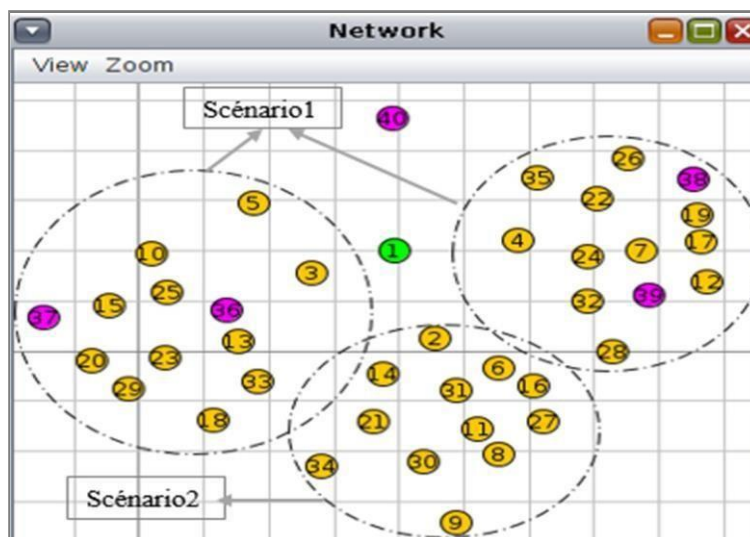


Figure n°IV.10 - Scénarios de remplacement des nœuds défaillants

IV.4.5.2 Remplacement des nœuds défaillants avec des nœuds redondants

Les nœuds redondants jouent un rôle essentiel dans le maintien des performances et de la fiabilité du réseau en cas de défaillance des capteurs. En ce qui concerne les critères de sélection des nœuds redondants, nous avons pris en compte les métriques de RPL [101]. Nous considérons :

- **L'énergie** : Il est préférable de sélectionner des nœuds avec une énergie plus grande afin de garantir leur capacité à prendre en charge les tâches supplémentaires en cas de défaillance d'un capteur.
- **La fiabilité** : En utilisant la métrique ETX (Expected Transmission Count). L'ETX mesure la qualité de la liaison radio entre les nœuds et est utilisée pour estimer la probabilité de transmission réussie. Ainsi, nous favorisons la sélection de nœuds ayant une meilleure qualité de liaison et une plus grande probabilité de succès de transmission des données.
- **La distance** : Il est préférable de choisir des nœuds redondants qui sont proches des nœuds défaillants afin de minimiser la latence et d'optimiser la réactivité du système

Dans notre étude, nous réalisons des comparaisons entre différentes stratégies de sélection des nœuds redondants basées sur ces critères. Cela nous permet d'évaluer l'impact de chaque critère sur les performances et la fiabilité du réseau.

IV.4.5.3 Le mouvement des nœuds redondants.

Dans le cadre du remplacement des nœuds défaillants, nous considérons également le mouvement des nœuds redondants. Il existe deux cas principaux de mouvement des nœuds redondants : le mouvement direct et le mouvement en cascade.

- **Mouvement direct** : Un nœud redondant est sélectionné pour remplacer directement le nœud défaillant. Le nœud redondant se déplace vers l'emplacement du nœud défaillant et prend en charge ses fonctions. Ce type de mouvement est généralement privilégié lorsque les nœuds redondants sont situés à proximité du nœud défaillant, ce qui permet une transition rapide et efficace. Pour faire la mobilité et remplacer les nœuds défaillants, il faut fournir directement à un réseau redondant la position des nœuds en panne.
- **Mouvement en cascade** : Le nœud redondant se déplace vers le nœud voisin le plus proche qui est connecté au nœud défaillant (dans le DODAG). Ce nœud voisin, à son tour, se déplace vers un autre nœud connecté au nœud défaillant. Ces déplacements de nœuds se déroulent en parallèle.

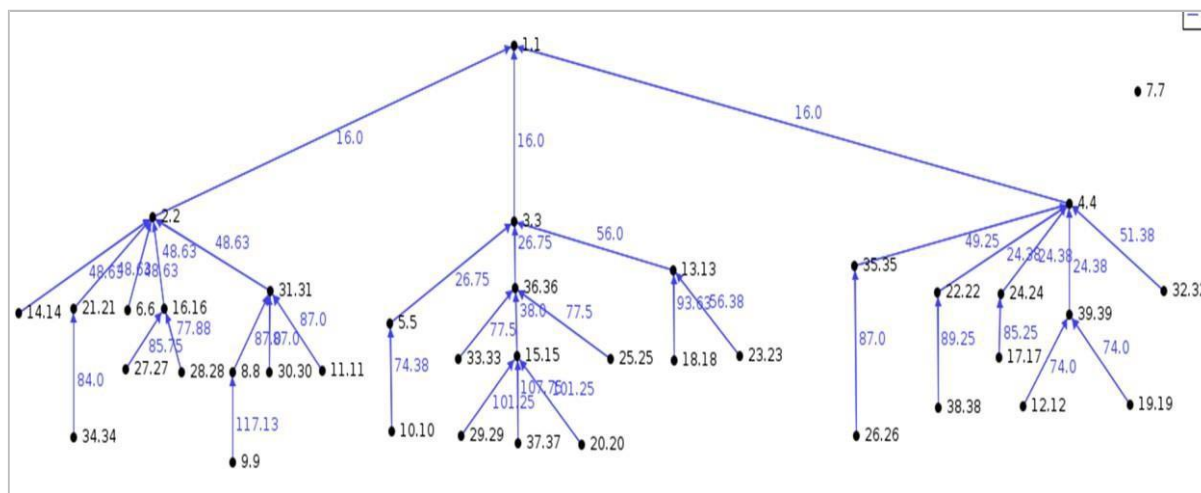


Figure n° IV.11– Formation du DODAG- après déclenchement d’action correctif

IV.5 L’évaluation des performances (comparaison) :

Dans nos simulations, nous avons évalué le temps de construction du DODAG et la consommation d’énergie après le déclenchement d’une action corrective, c’est-à-dire le remplacement d’un nœud défaillant, en utilisant trois métriques : l’énergie, la distance et l’ETX (Expected Transmission Count). Et nous avons comparé pour les deux approches de mouvement : le mouvement direct et le mouvement en cascade des nœuds redondants

IV.5.1 Comparaisons des temps de construction du DODAG

- 1^{er} scénario le remplacement des nœuds défaillants par des nœuds redondants situés dans le même cluster

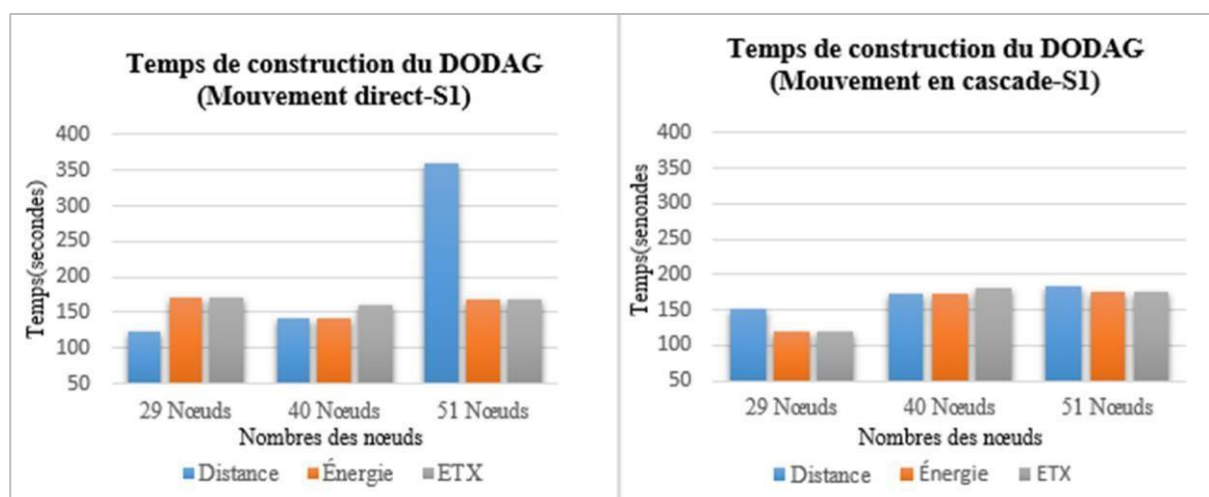


Figure n° IV.12-Temps de construction de DODAG Scénario1- Mouvement direct

- mouvement en cascade

La figure IV.12 illustre la comparaison des temps de construction du DODAG en secondes pour chaque métrique (distance, énergie et ETX), associées pour différents nombres de nœuds (29,41 et 51 nœuds), après le remplacement d'un nœud défaillant, en utilisant 1^{er} scénario, avec le mouvement direct et le mouvement en cascade. En analysant ces résultats, on peut constater les variations des temps de construction du DODAG en fonction des métriques utilisées pour chaque nombre de nœud.

- Dans le mouvement direct les résultats montrent que :
 - **Pour 29 nœuds** : la métrique de distance privilégie les chemins les plus courts en termes de distance physique entre les nœuds. Elle fonctionne bien pour les réseaux de 29 nœuds, car les chemins courts permettent une transmission rapide des données.
 - **Pour 40 nœud** : Dans le cas des 40 nœuds, la métrique d'énergie offre des résultats légèrement meilleurs que la métrique de distance et ETX, indiquant que l'optimisation de la consommation d'énergie est importante pour ce réseau spécifique.
 - **Pour 51 nœud** : les deux métriques énergie et ETX il sont légèrement moins efficace en termes de temps.
- Dans le mouvement en cascade les résultats montrent que :
 - **Pour 29 nœud** : Métrique d'énergie Offre des temps de construction plus courts que la métrique de distance pour les 29 nœuds
 - **Pour 40 nœud** : dans ce cas la métrique d'énergie présente des temps de construction similaires à la métrique de distance, indiquant que les deux métriques sont compétitives en termes de temps de construction du DODAG.
 - **Pour 51 nœud** : les métriques d'énergie et d'ETX sont légèrement moins performantes en termes de temps.

- 2^{ème} scénario le remplacement des nœuds défaillants par des nœuds redondants situés dans un autre cluster

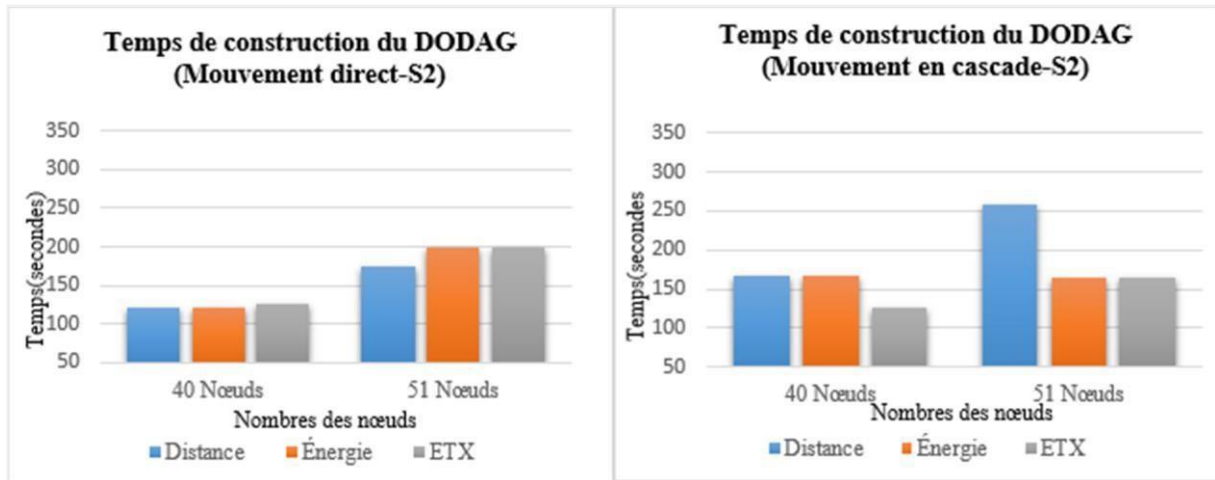


Figure n° IV.13 -Temps de construction de DODAG Scénario 2-Mouvement direct
-Mouvement en cascade.

Dans la Figure IV.13 on peut observer la comparaison des temps de construction du DODAG et des métriques correspondantes pour différents nombres de nœuds après une panne. Cette comparaison est effectuée en utilisant le scénario 2 avec le mouvement direct et en cascade.

- Dans le mouvement direct les résultats montrent que :
 - **Pour 40 nœuds** : Dans ce cas, les métriques de distance et d'énergie sont toutes deux aussi efficaces en termes de temps de construction du DODAG, et elles sont plus rapides que la métrique ETX.
 - **Pour 51 nœuds** : Dans ce cas, la métrique de distance est la plus lente, suivie de près par les métriques d'énergie et ETX. Les métriques d'énergie et ETX prennent le même temps de calcul, qui est supérieur à celui de la métrique de distance.
- Dans le mouvement en cascade les résultats montrent que
 - **Pour 40 nœuds** : Dans ce cas, la métrique ETX est la plus rapide, suivie par les métriques d'énergie et de distance.
 - **Pour 51 nœuds** : Dans ce cas, la métrique ETX est la plus rapide, suivie par la métrique d'énergie, tandis que la métrique de distance est la plus lente.

Le choix de la meilleure métrique pour le temps de construction d'un DODAG dans les réseaux de capteurs dépend de plusieurs facteurs, tels que le nombre de nœuds, le type de mouvement (direct ou en cascade) et les objectifs spécifiques du réseau.

Nous observons dans le cas du mouvement direct les nœuds se déplacent directement vers le nœud défaillant. La métrique de distance se révèle généralement être la meilleure option pour les réseaux de 29 nœuds. Cette métrique favorise les chemins les plus courts entre les nœuds, ce qui permet un remplacement rapide des nœuds défaillants et une meilleure organisation du réseau.

Pour les réseaux de taille moyenne, composés d'environ 40 nœuds, la métrique d'énergie est généralement préférable. Cela est dû au fait que l'économie d'énergie est cruciale dans ces réseaux, et la métrique d'énergie permet de minimiser la consommation d'énergie globale du réseau. Cependant, pour les réseaux plus importants, avec environ 51 nœuds, il est possible que la métrique d'énergie ou de fiabilité (comme l'ETX) soit plus appropriée, tandis que la métrique de distance pourrait ne pas être idéale. Cela s'explique par le fait que si un nœud est remplacé par un nœud distant, le nouveau nœud de remplacement peut perdre de l'énergie lors de la transmission des données sur une plus longue distance. Cette perte d'énergie peut avoir un impact sur les performances globales du réseau, rendant ainsi la métrique de distance moins favorable dans ce scénario.

Dans le cas du mouvement en cascade, où les nœuds se déplacent de manière séquentielle à travers le réseau, la métrique d'énergie tend à présenter des temps de construction plus courts, ce qui peut être avantageux. Cependant, pour les réseaux de taille moyenne, les métriques d'énergie et de distance peuvent être compétitives en termes de temps de construction du DODAG.

IV.5.2 Comparaison consommation d'énergie

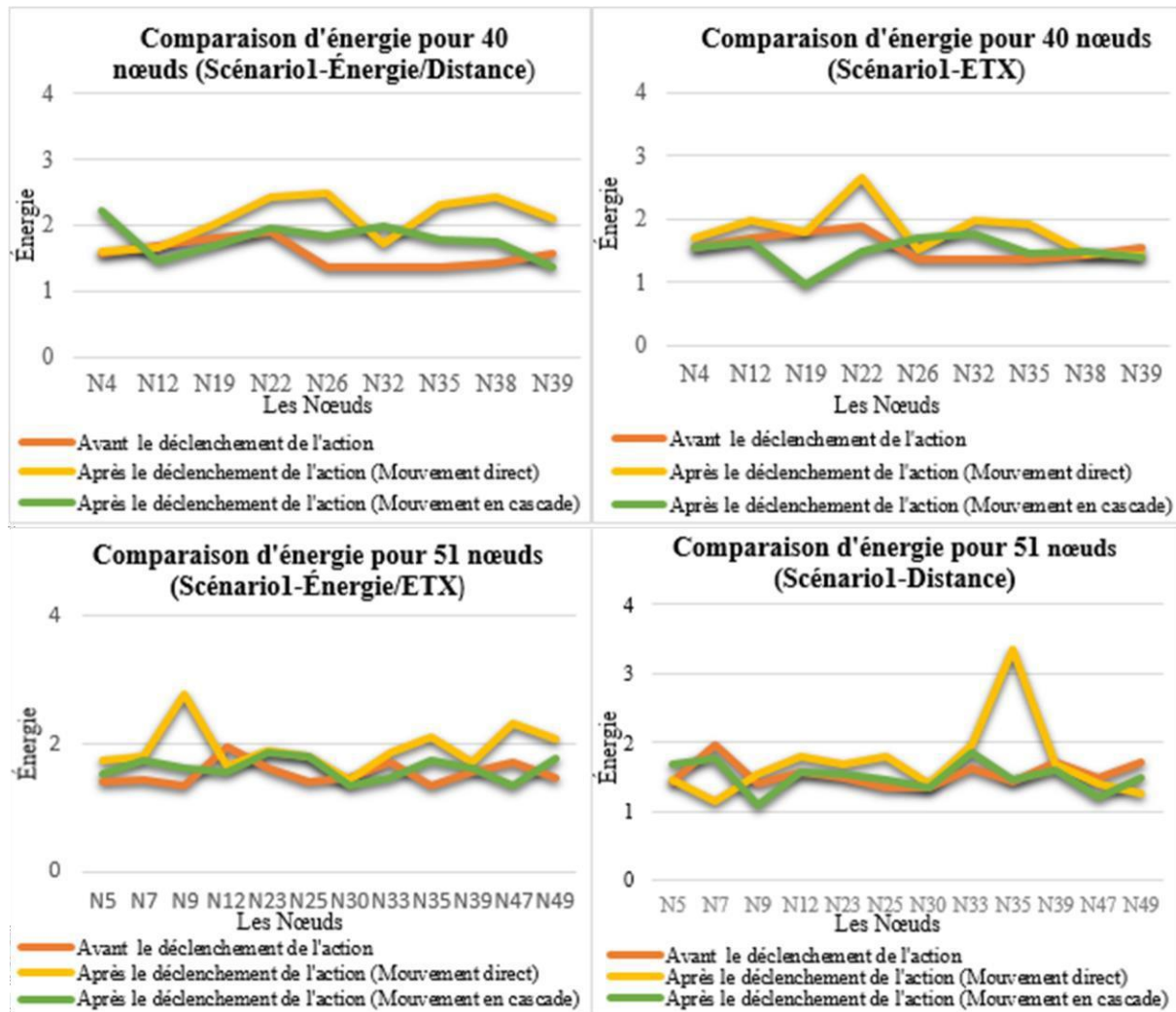


Figure n° IV.14- Comparaison d'énergie pour les différentes NBR des nœuds avant et après le déclenchement de l'action correctif, (Mouvement direct-cascade) pour les différentes métriques – S1

La Figure IV.14 présente une comparaison des niveaux d'énergie pour différentes métriques (distance, énergie et ETX) dans le premier scénario (remplacement des nœuds défectueux par des nœuds redondants situés dans le même cluster). L'objectif était de déterminer la méthode de remplacement la plus efficace en termes de consommation d'énergie. Les résultats indiquent que le mouvement en cascade est préférable, car il permet de répartir la charge de travail entre les nœuds voisins, réduisant ainsi la consommation d'énergie globale. De plus, il améliore la distance et l'ETX. En examinant les résultats spécifiques pour différents nombres de nœuds, nous constatons que le mouvement en cascade entraîne une diminution de l'énergie et de l'ETX pour plusieurs nœuds. Ces observations renforcent l'efficacité du mouvement en cascade dans la réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration des performances des réseaux de capteurs sans fil. La comparaison des niveaux d'énergie pour différentes métriques met en évidence les avantages du mouvement en cascade dans le remplacement des nœuds défectueux. Cette approche permet d'optimiser les performances du réseau en répartissant la

Charge de travail de manière équilibrée, ce qui conduit à une consommation d'énergie réduite et à une amélioration de la distance et de le ETX.

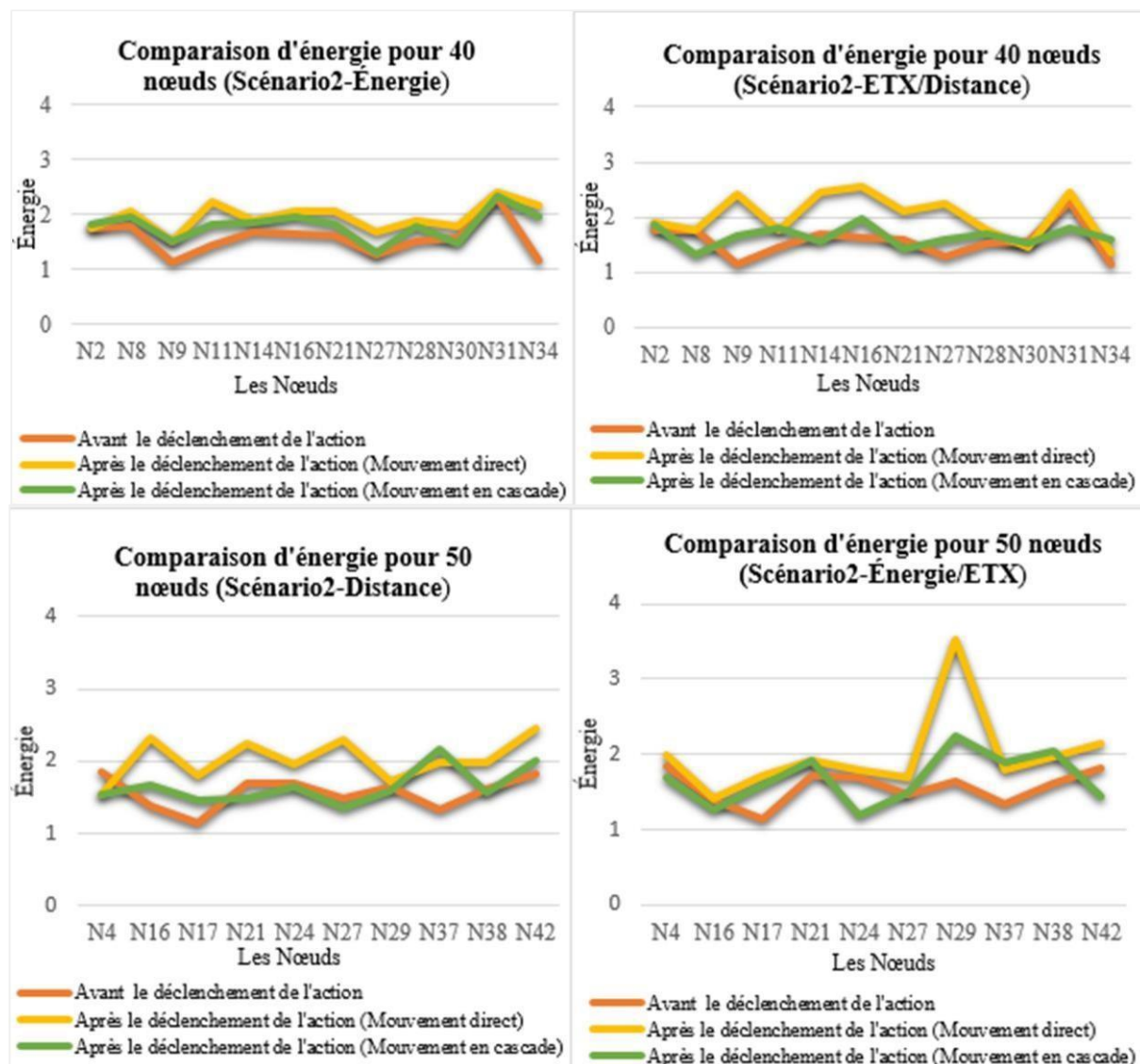


Figure n° IV.15- Comparaison d'énergie pour les différents NBR des nœuds avant et après le déclenchement de l'action correctif, (Mouvement direct-cascade) pour les différentes métriques – S2

La Figure IV.15 présente les niveaux d'énergie associés à chaque métrique (distance, énergie et ETX) dans le deuxième scénario (remplacement des nœuds défectueux par des nœuds redondants situés dans un autre cluster). Dans ce scénario, la distance entre les nœuds joue un rôle crucial dans le choix du mouvement. Les résultats révèlent que, dans le scénario 2, où les nœuds redondants appartiennent à un autre cluster, la distance entre les nœuds est généralement plus grande. Cela se traduit par une consommation d'énergie plus élevée lors du déplacement vers ces nœuds redondants. Cette situation présente un risque d'épuisement rapide de l'énergie des nœuds redondants, ce qui compromet la stabilité globale du réseau. En revanche, le mouvement en cascade se révèle avantageux dans ce contexte.

Il permet de minimiser la distance parcourue par les nœuds redondants, réduisant ainsi leur consommation d'énergie. Cette approche contribue à maintenir les nœuds redondants dans un état énergétique plus favorable, favorisant ainsi une meilleure durabilité du réseau. L'analyse des résultats du deuxième scénario met en évidence l'importance de considérer la distance lors du choix du mouvement pour le remplacement des nœuds défaillants. Le mouvement en cascade se révèle être une stratégie efficace pour minimiser la distance parcourue et préserver l'énergie des nœuds redondants, assurant ainsi une stabilité et une durabilité accrues du réseau.

IV.6 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur les outils d'implémentation et de simulation dans le contexte des réseaux de capteurs. Nous avons étudié différentes topologies de réseaux de capteurs et formé des clusters de manière aléatoire afin de simuler des conditions réelles. Deux scénarios de remplacement des nœuds défaillants ont été présentés, en utilisant des nœuds redondants situés soit dans le même cluster, soit dans un autre cluster. Lors de la sélection des nœuds redondants, nous avons pris en compte des critères tels que l'énergie, la fiabilité et la distance. Nous avons analysé les temps de construction du (DODAG) et la consommation d'énergie dans chaque scénario, en tenant compte des métriques utilisées et du mouvement des différents nombres de nœuds. Les résultats obtenus ont montré des variations dans les temps de construction du DODAG en fonction des métriques utilisées et du nombre de nœuds. Nous avons constaté que le choix du mouvement en cascade était le plus optimal pour toutes les métriques étudiées et pour différents nombres de nœuds.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des technologies révolutionnaires composées de petits dispositifs de communication autonomes et à ressources limitées. Ils sont largement utilisés dans divers domaines, mais ils sont confrontés à des défis tels que les limitations de la batterie, les contraintes de communication, les environnements hostiles et les pannes au niveau des nœuds. La tolérance aux pannes est donc essentielle pour assurer la fiabilité et le bon fonctionnement de ces réseaux.

Notre mémoire a été divisé principalement en quatre chapitres, Tout d'abord, nous avons introduit dans le premier chapitre les RCSF en soulignant leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application en plein essor.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la tolérance aux pannes dans les RCSF. Nous avons exploré les différentes catégories de pannes susceptibles de se produire et avons abordé le concept de tolérance aux pannes. Nous avons souligné l'importance de l'auto-organisation en tant que stratégie clé pour assurer un fonctionnement continu et efficace des RCSF, en minimisant les effets des pannes dans des environnements difficiles ou hostiles.

De plus dans le troisième chapitre, L'auto-organisation a été étudiée en profondeur, mettant en évidence sa définition, ses objectifs et les principales structures et protocoles associés. Nous avons également décrits divers travaux de recherche utilisant l'auto-organisation pour améliorer la tolérance aux pannes dans les RCSF. Une approche innovante en deux phases, appelée NARF, a été présentée, permettant de remplacer les nœuds défaillants et de restaurer la connectivité du réseau de manière équilibrée et efficace.

Et enfin, dans le dernier chapitre, nous avons discuté des simulations que nous avons effectuées et des résultats auxquels nous sommes parvenus.

Notre étude s'est concentrée sur la gestion des pannes dans les réseaux de capteurs en utilisant des nœuds redondants. Pour atteindre cet objectif, nous avons organisé les nœuds en clusters avec des nœuds tête dirigeant chaque cluster. Nous avons exploré deux scénarios de remplacement des nœuds défaillants le remplacement par un nœud redondant du même groupe ou la recherche d'un nœud redondant dans un groupe voisin. Le choix du nœud redondant s'est basé sur des critères(métriques) tels que la distance, l'énergie et la fiabilité.

L'analyse des résultats nous a permis de prendre en compte le temps de reconstruction du réseau et la consommation d'énergie, en tenant compte des métriques utilisées pour sélectionner le nœud redondant et son mode de mouvement (direct ou en cascade). Nous avons constaté que le mouvement en cascade présente des avantages significatifs dans les deux scénarios. Il réduit la distance parcourue

par le nœud redondant, ce qui contribue à une réduction de sa consommation d'énergie et à un maintien de son niveau d'énergie optimal, améliorant ainsi la durabilité du réseau. De plus, nos résultats ont montré que le choix de la métrique dépend de la taille du réseau. Pour les petits réseaux, la distance est préférée pour des déplacements plus courts. Pour les réseaux de taille moyenne, l'énergie est privilégiée afin de réduire la consommation. Dans les grands réseaux, l'énergie ou la fiabilité peuvent être des critères plus appropriés.

Ainsi, notre étude démontre clairement que l'utilisation du mouvement en cascade pour remplacer les nœuds défaillants dans les réseaux de capteurs est extrêmement efficace. En prenant des décisions de remplacement basées sur des mesures appropriées, telles que la distance, l'énergie et la fiabilité, nous pouvons améliorer de manière significative le temps de reconstruction et réduire la consommation d'énergie. De plus, nous avons constaté que la position stratégique des nœuds redondants joue un rôle crucial dans la tolérance aux pannes. En les plaçant judicieusement dans des emplacements clés du réseau, nous pouvons minimiser l'impact des défaillances et renforcer la résilience globale du système. Les nœuds redondants positionnés de manière optimale permettent de réduire les distances de déplacement et les coûts énergétiques associés à la reconstruction du réseau après une panne.

Notre travail de recherche présente néanmoins certaines limites qu'il convient de souligner. Tout d'abord, nous avons utilisé le système d'exploitation Contiki pour nos simulations. Bien que Contiki soit couramment utilisé dans les études sur les RCSF, il présente certaines limitations, notamment en termes de temps de simulation. Cette contrainte temporelle peut avoir un impact sur la précision et la fiabilité des résultats obtenus. De plus, une autre limite de notre travail réside dans la supposition de la détection de la panne. Nous avons choisi les nœuds défaillants de manière aléatoire, ce qui peut ne pas correspondre à la réalité des situations de panne réelles. Une approche plus réaliste serait d'utiliser des techniques de détection de pannes pour identifier les nœuds défaillants de manière plus précise.

En ce qui concerne les clusters, nous avons formé des clusters de manière aléatoire pour reproduire des conditions réelles. Cependant, cette approche peut ne pas prendre en compte les différences de performances entre les clusters et ne pas refléter fidèlement les scénarios réels.

Malgré ces limites, Notre recherche a contribué à approfondir notre compréhension des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) et de la tolérance aux pannes en se concentrant sur l'amélioration de cette tolérance grâce aux techniques d'auto-organisation. Nous avons exploré l'utilisation de nœuds redondants et de mécanismes de remplacement pour maintenir la continuité des opérations en cas de défaillance d'un nœud. Les résultats de nos simulations et analyses soulignent l'importance cruciale de l'auto-organisation en tant que stratégie clé pour assurer la fiabilité et le bon fonctionnement des RCSF

De plus, dans les perspectives de nos futurs travaux, nous envisageons de tester la stratégie de Nœuds Redondants avec Formation (NARF) dans le traitement de plusieurs défaillances simultanées. Nous nous Concentrerons sur l'évaluation de l'efficacité de cette stratégie dans des scénarios où plusieurs nœuds

CONCLUSION GENERALE

défaillants se produisent en même temps ainsi d'utilisée le protocole LEACH ainsi le simulateur ns3.

Enfin, nous espérons que ce travail pourra aider et servir de bonnes références à toutes personnes qui voudront s'engager dans un travail similaire.

Bibliographie

- [1] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). "A survey on sensor networks." *IEEE Communications Magazine*.
- [2] Challal, Y. (2008). "Réseaux de capteurs sans fils [Wireless sensor networks] ". Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne.
- [3] Lamine, M. M. (2007). " Sécurité dans les Réseaux de Capteurs Sans-Fil". Mémoire de Magistère en Informatique Ecole Doctorale d'Informatique de Bejaïa, 2008.
- [4] Chamberod, E., & Poupot, C. (1999). "Intelligence locale et processeur de signal dans Capteurs intelligents et micro actionneurs intégrés [Local intelligence and signal processor in Intelligent sensor and integrated microactuators] ". LAAS-CNRS, Cépaduès Editions, 199-200.
- [5] Sankarasubramaniam, E., Cayirci, E., Akyildiz, I. F., & Su, W. (2001, Décembre). "Wireless sensor networks : A survey. " *IEEE Communications Magazine*, 393-422.
- [6] Cristian, D. (2009). "Transmission d'images sur les réseaux de capteurs sans fil sous la contrainte de l'énergie" [Transmission of images over Wireless sensor networks Under the constraint of Energy]. PhD thèses, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 9.
- [7] Sanatan, M. (2010). "Energy efficient Routing algorithms for Wireless sensor networks and performance evaluation of quality of service for IEEE 802.15.4 networks", 9-10.
- [8] Ilyas, M., & Mahgoub, I. (2005). *Handbook of sensor networks Compact Wireless and wired Sensing Systems*. CRC Press LLC. ISBN 08493196864.
- [9] Dunkels, A., B. Grönvall, et T. Voigt. Contiki : à Lightweight and Flexible Operating System.
- [10] Chelloug, S. (2013). "Optimisation d'énergie dans les algorithmes de routage pour réseaux mobiles" (Thèse de doctorat). Université de Constantine.
- [11] 7 Tinyos. (2010). <http://www.tinyos.net/>
- [12] Wang, Q., & Balasingham, I. (2010). "Wireless sensor networks" : An introduction. In *Wireless sensor networks : Application-centric design* (pp. 1-14).
- [13] Castelluccia, C., & Francillon, A. (2008). "Protéger les réseaux de capteurs sans fil (SSTIC08) ".19
- 11
- [14] Ilyas, M. (2003). *The Handbook of ad hoc Wireless networks*. CRC Press LLC.
- [15] Badet, M., & Bonneau, W. (2006). "Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation". *Projet de Master Technologie de l'Internet 1ere année, Université Pau et des pays de l'Adour*.

- [16] Bouallegue, M. (2016). "Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil".
- [17] Mettu. (2011). "Telosb datasheet" [Online] Disponible sur : <https://fr.scribd.com/doc/68138250/Telosb-Datasheet-t> [Accessed on 2023-01-29].
- [18] Malli. (2011, May). "Micaz datasheet" [Online]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/doc/56641260/Micaz-Datasheet>. Citation dans le texte : (Malli, 2011).
- [19] Akyildiz, I. F., Melodia, T., & Chowdhury, K. R. (2007). "A survey on Wireless multimedia sensor networks". *Computer Networks (Elsevier)*, 51, 921-960.
- [20] Kacimi, R. (2009). "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil." Thèse de Doctorat : Réseaux et Télécommunications, Université de Toulouse, France.
- [21] Drissi, O. (2014). "Implémentation d'une stratégie de routage multi-niveau de données d'un réseau capteurs sans fil dans le domaine ferroviaire." L'université du Québec à Trois-Rivières.
- [22] Challal, Y. (2016). Réseaux de Capteurs Sans Fils.
- [23] Kazi Tani, C., & Benhaddouche, W. (2014). "Implémentation et test d'un protocole de prévention de l'attaque Clone dans un réseau de capteurs sans fil." Université Abou Bekr Belkaid– Tlemcen.
- [24] Messabih, H. Contribution des réseaux de capteurs à la conscience des contextes des systèmes [Magister en Informatique Option : Systèmes informatiques Intelligents et Communicants (SiIc)].
- [25] Puccinelli, D. Haenggi, M. (septembre 2005). WSN : Applications & Challenges », CAS Magazine.
- [26] Li, M., & Liu, Y. (2007). "Underground structure monitoring with Wireless sensor networks". In *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (pp. 69-78).
- [27] Akyildiz, I. F., Pompili, D., Melodia, T., & Melodia, D. (2004). "Challenges for efficient communication in Under water acoustic sensor networks". *ACM Sigbed Review*, 1(2), 3-8.
- [28] Heidemann, J., Li, Y., Syed, A., Wills, J., & Ye, W. (2005). "Under water sensor networking : Research challenges and potential applications". USC/ISI Technical Report, ISI-TR-603.
- [29] Akyildiz, I. F., Melodia, T., & Chowdhury, K. R. (2007). "A survey on Wireless multimedia sensor networks". *Computer Networks (Elsevier)*, 51, 921-960.
- [30] Mohamed, S., Hamza, S., & Saroit, I. A. (2017). "Coverage in mobile Wireless sensor networks (M-WSN) « : A survey. *Computer Communications*, 110, 133-150.

- [31] Romdhane, M. Y. (2007). "Evaluation des performances des protocoles S-MAC et Directed Diffusion dans les réseaux de capteurs «. [Thesis, École Supérieure des Communications de Tunis].
- [32] Boukerche, X. Fei et R.B. Araujo (30 juin 2007), "An optimal coverage-preserving scheme for Wireless sensor networks Based on local information exchange. », Journal of Computer Communications (Elsevier), pp. 2708-2720.
- [33] Karl, H., & Willig, A. (2005). " Protocols and architectures for Wireless sensor networks." John Wiley & Sons.
- [34] Xue, Y., Aguilar, A., Gonzalez, A., & Barroux, M. (2010). "Agrégation de données dans les réseaux de capteurs [Final report]. "
- [35] Hongwei, H., Youzhi, X., Hairong, Y., Mubeen, S., & Hongke, Z. (2009). "An elderly health care system using wireless sensor networks at home. " In Proceedings of the 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'09), June, pp. 158-163.
- [36] PUGH, Jim et MARTINOLI, Alcherio (2004). "Local Range et Bearing Sensing Using Infrared Transceivers in Mobile Robotics. « Swarm-Intelligent Systems Research Group. Doi : 10.1.1.147.6376.
- [37] Zhang, Y., & Xiao, H. (2009, November). "Bluetooth-based sensor networks for remotely monitoring the physiological signals of a patient. " IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 13(6), 1040-1048.
- [38] Yu, C. M., & Yu, B. Y. (October 2014). "Reconfigurable algorithm for Bluetooth sensor networks." IEEE Sensors Journal, vol. 14, no. 10, pp. 3506-3507.
- [39] Camus, M. (2008). "Architecture de réception RF très faible coût et très faible puissance. Application aux réseaux de capteurs et au standard ZigBee. " (Doctoral dissertation). Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [40] De Francisco, R., Li, H., Dolmans, G., & de Groot, H. (Year). In Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications.
- [41] Lorincz, D., Malan, T. R. F., Fulford-Jones, A., Nawoj, A., Clavel, V., Shnayder, G., Mainland, M., Welsh, M., & Moulton, S. (2004). "Sensor networks for emergency response : Challenges and opportunities. " IEEE Pervasive Computing, 3(4), 16-23.
- [42] Langendoen, K., & Reijers, N. (2003, November). " Distributed localization in wireless sensor networks : A quantitative comparison. « Computer Networks, 43(4), 518.
- [43] Lamundson, X., & Koutsoukos, D. (2009, September). "A survey on localization for mobile wireless sensor networks. "In International Workshop on Mobile Entity Localization MELT.

- [44] Cheung Coleri, S., Varaiya, S., & P., S. (2004). "Sensor networks for monitoring traffic." In 42nd Allerton Conference on Communication, Control and Computing.
- [45] Pottie, G. J., & Kaiser, W. J. (2002). "Wireless integrated network sensors." *Communications of the ACM*, 43(5), 51-58.
- [46] Arora, A., Blum, M., Gouda, M., & Telikepalli, K. (1993). "Closure and convergence : A foundation of fault-tolerant computing." *IEEE Transactions on Software Engineering*, 19(11), 1015-1027.
- [47] Postma, A. (1998). "Classes of Byzantine fault-tolerant algorithms for dependable distributed systems « (Doctoral dissertation, University of Twente).
- [48] Peng, S., & Low, C. P. (2015). "Energy neutral clustering for energy harvesting wireless sensor networks." *Journal of Ad Hoc Networks*, 26, 1-16.
- [49] Walters, P. (n.d.). "Wireless Sensor Network Security : A Survey. "
- [50] Paradis, L., & Han, Q. (2007). "A survey of fault management in wireless sensor networks." *Journal of Networks Systems Management*, 15(2), 171-190.
- [51] Martinez, K., Padhy, P., Riddoch, A., Ong, H., & Hart, J. (2005). "Glacial environment monitoring using sensor networks." In *Proceedings of Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'05)*. ACM.
- [52] Szewczyk, R., Polastre, J., Mainwaring, A. M., & Culler, D. E. (2004, April). "Lessons from a sensor network expedition." In *Wireless Sensor Networks* (pp. 307-322). Springer Berlin Heidelberg.
- [53] Ruiz, M., Marcillo, O., Johnson, J., Lees, J., Werner-Allen, G., Lorincz, K., & Welsh, M. (2006). "Deploying a wireless sensor network on an active volcano." *IEEE Internet Computing*, 10(2), 18-25.
- [54] Reijers, N., Halkes, G., & Langendoen, K. (2004). "Link layer measurements in sensor networks." In *Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS '04)* (pp. 607-611). IEEE.
- [55] Walke, B., Esseling, N., Habetha, J., Hettich, A., Kadelka, A., Mangold, S., ... & Vornefeld, U. (2001). "IP over Wireless Mobile ATM—Guaranteed Wireless QoS by HiperLAN/2." *Proceedings of the IEEE*, 89(1), 21-40.
- [56] Peterson, L. L., & Davie, B. S. (2003). "Computer networks » : A systems approach (3rd ed.). Morgan Kaufmann Publishers.
- [57] Zemmar, A. (2008). "Tolérance aux défaillances dans les réseaux de capteurs sans fil." *Mémoire, Université Abderahmane Mira de Bejaïa*.

- [58] Wood, A. D., & Stankovic, J. A. (2002). "Denial of service in sensor networks." *Computer*, 35(10), 54-62.
- [59] Yu, M., Mokhtar, H., & Merabti, M. (2007 June). "A survey on fault management in wireless sensor networks." In *Proceedings of the 8th Annual PostGraduate Symp. On the Convergence of Telecommunications, Networking and Broad casting*,
- [60] Ould-Mohamedi, N. (2018). "Tolérance aux pannes d'une station de base (SINK) dans un réseau de capteurs sans fil" (Doctoral dissertation).]
- [61] Koushanfar, F., Potkonjak, M., & Sangiovanni-Vincentelli, A. (2005). "Fault tolerance in wireless sensor networks." In *Handbook of Sensor Networks* (pp. 1-20). Springer.
- [62] Rahim, K. (2009). "Techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil " (Doctoral dissertation, Université de Toulouse).
- [63] Chouikhi, S., El Korbi, I., Ghamri-Doudane, Y., & Azouz Saidane, L. (2015). "A survey on fault tolerance in Small and large scale wireless sensor networks." *Computer Communications*, 69, 22-37
- [64] Neison, V. P. (1990). "Fault-Tolerant Computing : Fundamentals Concepts." *IEEE Computer*, 23(7).
- [65] Wakerly, J. (1978). "Error Detecting Codes, Self-Checking Circuits and Applications." Elsevier North-Holland.
- [66] Hidehisa, N., et al. (2007). "Fault-resilient sensing in wireless sensor networks." *Journal of Computer Communications*, 30(11-12), 2375-23
- [67] Crossbow. (2009) Fiche technique du MICA2. Récupéré sur http://www.xbow.com/products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA2_Datasheet
- [68] Taïani, F., Olivier Killijian, M., & Fabre, J. Ch. (2006). "Intergiciels pour la tolérance aux fautes Etat de l'art et défis." *Revue des sciences et technologies de l'information, série TSI*, Éditions Hermès Lavoisier, 25(5), 599-630.
- [69] Dhibeya, N. (2007). "Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs." Rapport de projet de fin d'études, Ecole supérieure des communications, Tunis.
- [70] Romdhani, B. (2012). "Exploitation de l'hétérogénéité des réseaux de capteurs et d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage." Thèse de doctorat.
- [71] Valois, F. (2007). "Auto-organisation de réseaux radio multi-saut. Réseaux et télécommunications [cs.NI]." Université Claude Bernard - Lyon I.

- [72] Banerjee, S., & Khuller, S. (2001). "A clustering scheme for hierarchical control in multi-hop wireless networks. « In Proceedings of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM01 (pp. 1028-1037). Alaska, USA.
- [73] Calomme, S., & Leduc, G. (2006). "Conception d'un protocole de contrôle de topologie pour les overlays construits sur des réseaux ad hoc." In Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles - CFIP 2006 Session 4 : Réseaux sans fil multi-sauts, Tozeur, Tunisie.
- [74] Viana, A. C., de Amorim, M. D., Fdida, S., & de Rezende, J. F. (2005). "Self-organization in spontaneous networks " : the approach of DHT-based Routing Protocols. *Ad Hoc Networks*, 3, 589-606.
- [75] Berge, C. (1958). "Théorie des graphes et ses applications." Collection Universitaire des Mathématiques, Dunod, Paris.
- [76] Wu, J., & Dai, F. (2003). "Distributed dominant pruning in ad hoc networks. " In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC03 (pp. 353–357), Alaska, USA.
- [77] Lu, J. L., Valois, F., & Barthel, D. (2007). "Low-energy self-organization scheme for wireless ad hoc sensor networks. " In Proceedings of the 4th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, WONS07 (pp. 138–145), Obergurgl, Tyrol, Austria.
- [78] Adjih, C., Jacquet, P., & Viennot, L. (2005). "Computing Connected dominated sets with multipoint Relays." *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2), 27–39.
- [79] Yang, G. Z., & Yacoub, M. (2006). " Body sensor networks. "
- [80] Culpepper, B. J., Dung, L., & Moh, M. (2004). "Design and analysis of Hybrid Indirect Transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks." *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 8(1), 61-83.
- [81] Moh, M., Culpepper, B. J., Dung, L., Moh, T. S., Hamada, T., & Su, C. F. (2005, December). "On data gathering Protocols for in body biomedical sensor networks." In Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (pp. 351-352). Sydney, Australia
- [82] Toussaint, G. T. (1980). " The relative Neighborhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*", 12(4), 261-268.
- [83] Gabriel, R. K., & Sokal, R. R. (1969). "A new statistical approach to geographic variation analysis." *Systematic Zoology*, 18(3), 259-278.
- [84] Boudries, A. M., Aliouat, M., & Siarry, P. (2014). " Detection and replacement of a Failing Node in the wireless sensors networks." *Computer and Electrical Engineering Journal*, 40(2), 421–432.

- [85] Lin, T.-Y., Santoso, H. A., & Wu, K.-R. (2015). "Global sensor deployment and local Coverage-aware recovery schemes for smart environment." *IEEE Transactions Mobile Computing*, 14(7), 1382–1396.
- [86] Frye, L., Liang, C., Du, S., & Bigrigg, M.W. (2006). "Topology maintenance of wireless sensor networks in Node failure-prone environment." In *Proceedings of IEEE international conference on networking, sensing and control*, pp. 886-891
- [87] Xu, Y., Bien, S., Mori, Y., Heidemann, J., & Estrin, D. (2003). "Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks " (Technical Report No. 6). Center for Embedded Networked Computing, University of California, Los Angeles.
- [88] Abbasi, A. A., Younis, M., & Akkaya, K. (2009). "Movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks." *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 20(9), 1366–1379.
- [89] Gandhi, K.I., Narayanasamy, P., & Ushapreethi, P. (2011). "Coverage holes reduction in movable sensor networks using minimum movement technique." *IEEE International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT*, pp. 275-280.
- [90] Britton, M., & Sacks, L. (2007). "The SECOAS project—Development of a self-organising, " wireless sensor network for environmental monitoring.
- [91] Wang, G., Cao, G., La Porta, T., & Zhang, W. (2005). "Sensor relocation in mobile sensor networks." In *Proceedings of the 24th annual joint conference of IEEE computer communications societies (INFOCOM'05)*, Miami, FL.
- [92] Abdelmalek Boudries, Mourad Amad, & Patrick Siarry. (2016). "Novel approach for replacement of a Failure Node in wireless sensor network". Springer Science Business Media New York.
- [93] Ramesh, K., & Somasundaram, K. (2011). "A comparative study of clusterhead selection algorithms in Wireless Sensor Networks." *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES)*, 2(4), 153–164.
- [94] Venkata Subbaiah, K., & Naidu, M. M. (2010). "Cluster Head Election for CGSR Routing Protocol Using Fuzzy Logic Controller for Mobile Ad Hoc Network." *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 1(4), 246–251.
- [95] Nocetti, Fabian Garcia, Gonzalez, Julio Solano, & Stojmenovic, Ivan. (2003). "Connectivity Based k-Hop Clustering in Wireless Networks." *Journal of Telecommunications Systems*, 22(1), 205–220.

- [96] Nguyen, D., Minet, P., Kunz, T., & Lamont, L. (2011). "New findings on the complexity of cluster Head selection algorithms." In IEEE international symposium on world of wireless, mobile and multimedia networks. pp. 1–10, ISBN : 978-1-4577-0352-2.
- [97] Hussain, K., Abdullah, A. H., Awan, K. M., Ahsan, F., & Hussain, A. (2013). "Cluster Head election schemes for WSN and MANET : a survey." World Applied Sciences Journal, 23(5), 611–620.
- [98] Heinzelman, W., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000). "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks." In Proceedings of 33rd HICS, vol 2, pp. 1–10.
- [99] Youcef, B., & Mohamed Cherif, M. (2015). "Simulation d'un réseau de capteurs sous Cooja : adaptation du protocole CSMA/CA au temps réel." Mémoire de master professionnel, Université de Bejaïa.
- [100] Dunkels, A., Grönvall, B., & Voigt, T. (2011). "The Contiki Operating System - Scheduling for the Internet of Things." IEEE Transactions on Industrial Informatics, 7(3), 529-539.
- [101] Ropitault, T. (2016, 10 mai). "Protocole de routage RPL."

Résumé :

La tolérance aux pannes dans les réseaux joue un rôle essentiel dans notre société moderne. Les pannes peuvent avoir de graves conséquences, c'est pourquoi il est essentiel de développer des stratégies, des technologies et des mécanismes pour maintenir le fonctionnement des réseaux malgré ces pannes.

Notre objectif principal est de mettre en place une solution basée sur l'auto-organisation pour assurer la continuité des opérations, même en cas de défaillance des nœuds du réseau. Pour cela, nous avons utilisé l'approche de clustering, qui permet de regrouper les nœuds en groupes pour faciliter la gestion des pannes et le remplacement des nœuds défectueux. Cette approche permet de créer des groupes de nœuds redondants au sein de chaque cluster, afin d'assurer une meilleure tolérance aux pannes. Nous avons également analysé l'impact de facteurs tels que la taille du réseau, les métriques de performance (comme l'énergie, la distance et la fiabilité) et les mouvements des nœuds sur l'efficacité de remplacement des nœuds défectueux. Ces avancées ouvrent la voie à de nouvelles recherches et à des améliorations pratiques pour assurer la fiabilité et la résilience de ces réseaux essentiels.

Mot clés : Auto-organisation, Clustering, Défaillance des nœuds, Tolérance aux pannes, Fiabilité, Remplacement des nœuds défectueux

Abstract:

Fault tolerance in networks plays a crucial role in our modern society. Failures can have serious consequences, which is why it is essential to develop strategies, technologies, and mechanisms to maintain network operations despite these failures.

Our main objective is to implement a self-organizing solution to ensure operational continuity even in the event of node failures. To achieve this, we have utilized a clustering approach, which involves grouping nodes together to facilitate the management of failures and the replacement of faulty nodes. This approach allows for the creation of redundant node groups within each cluster to ensure improved fault tolerance. We have also analyzed the impact of factors such as network size, performance metrics (such as energy, distance, and reliability), and node mobility on the efficiency of replacing faulty nodes. These advancements pave the way for further research and practical improvements to ensure the reliability and resilience of these critical networks.

Key Word : Self-organization, Clustering, Node failure, Fault tolerance, Reliability, Replacement of faulty nodes.

ملخص: التسامح مع الأعطال في الشبكات يلعب دورًا أساسيًا في مجتمعنا الحديث. يمكن أن تكون الأعطال لها عواقب خطيرة، ولذلك فمن الضروري تطوير استراتيجيات وتقنيات وآليات للحفاظ على تشغيل الشبكات رغم هذه الأعطال. هدفنا الرئيسي هو تنفيذ حل قائم على الذاتية التنظيم لضمان استمرارية العمليات حتى في حالة فشل عقد الشبكة. ولتحقيق ذلك، استخدمنا نهج التجميع، والذي ينطوي على تجميع عقد الشبكة معًا لتسهيل إدارة الأعطال واستبدال العقد المعيبة. يتيح هذا النهج إنشاء مجموعات من العقد المتكررة داخل كل مجموعة لتحقيق تحمل أفضل للأعطال. كما قمنا أيضًا بتحليل تأثير العوامل مثل حجم الشبكة ومقاييس الأداء (مثل الطاقة والمسافة والموثوقية) وحركة العقد على كفاءة استبدال العقد المعيبة. تمهد هذه التطورات الطريق لمزيد من البحث والتحسينات العملية لضمان موثوقية وقدرة التعافي لهذه الشبكات الحيوية.

الكلمات المفتاحية: الذاتية التنظيم، التجميع، فشل العقد، التسامح مع الأعطال، الموثوقية، استبدال العقد المعيبة

1