

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة سعيدة د. مولاي الطاهر

كلية التكنولوجيا

قسم: الإعلام الآلي

Mémoire de Master

Spécialité : réseaux informatiques et systèmes réparties

Thème

Etude des performances de
routage des réseaux de
capteurs sans fil sous-marins

Présenté par :

Rahmani Wafaa

Bakhtaoui Mohamed El Amine

Dirigé par :

Benyahia Kadda



Promotion 2021 - 2022

REMERCIEMENTS:

Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude. Nous remercions Très sincèrement Mr. Benyahya Kadda notre encadreur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions a grandement facilité ce travail. Nous remercier également ma Co-encadreur Melle Manel Baba Ahmed pour m'avoir orienté dans ce thème, aussi pour sa sympathie, ses idées, conseils et qui m'a aidé pour faire ce travail. Sans oublier les membres du jury pour avoir accepté d'être des examinateurs de ce mémoire Un remerciement spécial aux étudiants de la 2ème année Master de la Spécialité de réseaux informatique

Dédicace

Je dédie cet humble travail à mes parents, ceux qui m'ont donné la vie, qui ont sacrifié pour mon bonheur et ma réussite. Leur amour inconditionnel et leur grande charité forment la perle de mon existence .et grâce à eux, je profite aujourd'hui du meilleur de la vie. Quis trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de ma Profonde affection et de mon attachement indéfectible. Nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leur dois ue Dieu leur reserve la bonne santé est une longue vie inchallah ,À mes sœurs S ihem Souad, Leila et la petite yousra Je vous aime À mes cousines Fatima et Zineb À mes amis et tous les gens qui me connaissent, À mon binôme Bakhtaoui med el amine, À Tout personne qui m'a aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Wafaa. R

Dédicace

Je dédie ce modeste travail : À ma chère maman, À mon cher père. qui n'a pas arrêté de me soutenir et de m'aider pour que je puisse atteindre mes objectifs. À la mémoire de mes grand-mères Sayad Fatma et Khoudja Khaira j'aurais tant aimé que vous soyez présents. À mon cher grand-père, a qui je souhaite bonne santé et longévité. À mes chers professeurs qui m'ont appris tout au long de ma carrière universitaire. À mes tantes et oncles. À mes sœurs man, Khaira, Maryam, Habiba, Fatiha et Bahia. À mes frères Ossama et Ahmed et Jalal eldin Pour leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de mes études. pour leur soutien dans les moments difficiles et leur patience sans fin À mon binôme Rahmani Wafaa. À mes chers amis. À chaque membre de la famille bakhtaoui et mechahed..

Mohamed el amine .B

Table des matières

Introduction générale.....	12
Chapitre I : Généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins (UWSNs)...	14
1. Introduction	15
2. Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)	15
3. Types des réseaux de capteurs sans fil	16
3.1 Les réseaux de capteurs terrestres	16
3.2 RCSF souterrain.....	17
3.3 RCSF sous-marins (aquatique)	17
3.4 RCSF multimédia.....	18
3.5 RCSF mobile.....	19
4. Applications des réseaux de capteurs sans fil	20
4.1 Applications environnementales	20
4.2 Le domaine militaire.....	21
4.3 Le domaine médical	21
4.4 Le domaine domestique.....	22
4.5 Le domaine agricole	22
4.6 Applications commerciales.....	23
4.7 Applications des RCSF sous-marins	23
4.8 Surveillance de l'environnement	23
4.9 Application scientifique.....	24
4.10 Militaire	25
5. Définition d'un réseau de capteurs sous-marin	25
6. Architecture du capteur sous-marin	26
7. Les différentes architectures de communication dans les RCSF-SM.....	27
7.1 Les réseaux de capteur sous-marins à deux dimensions (2D).....	27
7.2 Les réseaux de capteur sous-marins En trois dimensions (3D).....	28
8. Différentes techniques de communication sans fil aquatique	29
8.1 Communication par onde radio	29
8.2 Communication par l'onde optique	30
8.3 Communication par l'onde acoustique	30
9. Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique	30
10. La différence entre réseaux de capteur terrestre et sous-marins.....	31
11. Les contraintes des UWSN.....	32
12. Conclusion.....	33

Table des matières

<i>Chapitre II : Etat del'art sur les protocoles</i>	34
1. Introduction	35
2. Le routage dans les réseaux de capteurs sous-marins	35
3. Les principaux défis dans le développement des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins	36
4. Facteurs décisifs de la conception	37
4.1 L'énergie consommée	37
4.2 Le lien de la communication	37
4.3 Puissances de l'unité de traitement	38
4.4 La mise à l'échelle (Scalabilité)	38
4.5 Les panne des capteurs	38
5. Critères de performances d'un protocole de routage	38
6. Classification des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins	39
6.1 Routage à plat	41
6.2 Routage hiérarchique	43
6.3 Routage basé sur la localisation	45
6.4 Routage multi-chemins	49
6.5 Routage à un seul chemin	51
6.6 Routage initié par la source	52
6.7 Routage piloté par table	53
6.8 Routage basé sur l'agrégation de données	53
7. Comparaison entre les protocoles étudiés	55
8. Conclusion	57
<i>Chapitre III : Evaluation des performances du routages dansles UWSNs</i>	58
1 Introduction	59
2 Outil de simulation	59
2.1 NS-2 (Network Simulator 2)	59
2.2 AQUA-Sim	60
3 Choix du simulateur NS2	62
4 Objectifs de la simulation	62
5 Métriques d'évaluation	62
6 Méthodologie expérimentale	63
7 Création du modèle de simulation	63
8 L'influence de pipeline	64
8.1 Etude de taux de livraison des paquets	64
8.2 Etude de l'énergie consommée	66
8.3 Etude du délai moyen de bout en bout (AE2ED)	67

Table des matières

8.4 Etude de l'efficacité énergétique	69
9L'influence de la densité des nœuds	70
9.1 Etude de taux de livraison des paquets.....	70
9.2 Etude de l'énergie consommée	71
9.3 Etude du délai moyen de bout en bout	73
9.4 Etude l'Efficacité énergétique.....	74
10Conclusion	75
Conclusion générale et perspective.....	76
Bibliographie.....	77
Résumé	

Figure I.1 : Exemple de réseau de capteurs	16
Figure I.2 : RCSF terrestre.....	17
Figure I.3: RCSF souterrain.....	17
Figure I.4 : RCSF aquatique.....	18
Figure I.5 : Architecture de référence d'un RCMSF.....	19
Figure I.6 : RCSF mobile.....	20
Figure I.7 : Applications environnementales	20
Figure I.8 : Réseau de capteur militaire	21
Figure I.9 : Réseau de capteur médical.....	21
Figure I.10 : Ensemble de capteur dans une maison intelligente.....	22
Figure I.11 : Domaine agricole.....	22
Figure I.12 : Station de surveillance climatique.....	23
Figure I.13 : Exploration des fonds marins avec l'AUV Cyclops	24
Figure I.14 : Système australien d'alerte au tsunami.....	24
Figure I.15 : Les réseaux de capteur sous-marins	26
Figure I.16 : Architecture du capteur sous-marin.....	26
Figure I.17 : les différents capteurs sous-marins.....	27
Figure I.18 : Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D.....	28
Figure I.19 : Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins à trois dimensions.	29
Figure I.20 : Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique.....	31
Figure II.1 : Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous- marins.....	42
Figure II.2 : Sélection de nœud de Transfert dans le protocole DBR.....	43
Figure II.3 : Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP.....	45
Figure II.4 : VBF Facteur de désirabilité.....	47
Figure II.5 : Topologie du protocole VBF pour les RCSF-SMs.....	48
Figure II.6 : Principe du protocole HH-VBF pour les RCSF-SMs.....	49
Figure II.7 : Illustration du protocole FBR.....	50

Figure II.8 : Exemple de réseau avec DUCS	56
Figure III.1: diagramme de classe d'Aqua-Sim	64
Figure III.2 : Taux de livraison des paquets vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100.....	69
Figure III.3 : L'énergie Consommée vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100.....	70
Figure III.4 : Délai moyen de bout en bout vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100.....	72
Figure III.5 : L'efficacité d'énergie vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100.....	73
Figure III.6 : Taux de livraison des paquets vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100.....	75
Figure III.7 : L'énergie consommée vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100.....	76
Figure III.8 : Délai moyen bout en bout vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100.....	77
Figure III.9 : L'efficacité d'énergie vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100.....	78

Tableau II.1 : La comparaison des protocoles de routage en fonction de leurs caractéristiques et performances.....	56
Tableau III.1 : principaux protocoles et modèles disponibles sous NS2.....	63
Tableau III.2 : environnement de la simulation.....	67
Tableau III.3 : Paramètres du contexte de simulation.....	68
Tableau III.4 : le taux de livraison de paquets de VBF et HH-VBF en fonction du rayon du pipeline.....	68
Tableau III.5 : l'énergie consommée de VBF et HH-VBF en fonction du rayon du pipeline.....	70
Tableau III.6 : le délai moyen bout en bout de VBF et HH-VBF en fonction de rayon du pipeline.....	71
Tableau III.7 : l'efficacité d'énergie de VBF et HH-VBF en fonction de rayon du pipeline.....	73
Tableau III.8 : Taux de livraison des paquets de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds.....	74
Tableau III.9 : L'énergie consommée de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds.....	76
Tableau III.10 : Le Délai moyen de bout en bout de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds.....	77
Tableau III.11 : L'efficacité d'Energie de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds.....	78

AoA :Angle of Arrival

AUV : Autonomous Underwater Vehicle

CH : Cluster Head

CPU : Central Processing Unit

CTS : Clear To Send

DBR : Depth Based Routing

DUCS : Distributed Underwater Clustering Scheme

FBR : Focused Beam Routing

HH-VBF : Hop-by-Hop VBF

ICRP : Information Carrying based Routing Protocol

MCCA : Minimum Cost Clustering Algorithm

MCCP : Minimum Cost Clustering Protocol

NS-2 :Network Simulator-2

PVC :polyvinyl chloride

RCSF : Réseaux de capteurs sans fil

RCSF-SM : Réseaux de capteurs sans fil sous marins

RF :Radio Frequency

RREQ : Route Request

RTS : Request To Send

SB : Station de Base

TDMA : Time-Division Multiple Access

ToA :Time of Arrival

UWSN : underwater wireless sensor networks

VBF : Vector Based Forwarding

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) influencent chaque mouvement de la vie humaine. Ceux-ci sont utilisés pour fournir les solutions à nos problèmes de la vie quotidienne de manière très efficace et efficiente. Les applications des réseaux de capteurs sans fil sont presque dans tous les domaines. Il est utilisé dans le domaine de la défense, les prévisions météorologiques, la détection des incendies de forêt pour avoir des connaissances sur les animaux de la forêt, la détection des catastrophes naturelles etc. Outre ces avantages, les capteurs sont également utilisés dans les appareils ménagers, dans l'environnement des soins de santé et également utiles pour développer des applications basées sur l'Internet des objets (IoT).

En outre, les réseaux de capteurs sont également utilisés dans la détection de l'environnement sous-marin. Comme tout le monde le sait, 70 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau. La détection de l'environnement sous-marin est donc à nouveau un grand défi et une grande réussite dans le domaine du WSN. La détection sous-marine contient diverses applications de détection de l'environnement sous-marin pour un grand nombre d'applications. Ces applications comprennent l'étude des créatures marines, la surveillance des déchets chimiques, la surveillance des catastrophes naturelles, des tremblements de terre et des tsunamis.

Les réseaux de capteurs sans fil terrestres (WSN) et les réseaux de capteurs sans fil sous-marins (UWSN) ont certaines propriétés communes aux deux, mais ils présentent également un très grand nombre de différences. Par de telles différences, la détection sous-marine nécessite de nouveaux protocoles spécialisés. La première différence est le coût. Le coût des nœuds utilisés dans les réseaux sans fil sous-marins est très élevé par rapport à le WSN terrestre. La différence de coût est principalement due aux émetteurs-récepteurs complexes utilisés dans UWSN. Les nœuds de capteurs utilisés pour la détection sont différents pour l'environnement sous-marin que pour l'environnement terrestre en raison des signaux acoustiques utilisés en milieu sous-marin. De plus, dans les nœuds de capteurs sous-marins, la charge de la batterie n'est pas possible car pour charger la batterie, le nœud sera amené au terrain pour le recharger puis le remettre à l'emplacement, dans ce processus, le coût est très élevé que le déploiement d'un nouveau nœud, il consomme également beaucoup de temps et d'argent. Ainsi, pour la communication de données dans les nœuds acoustiques, le chemin suivi doit être économe en énergie.

Les nœuds de capteurs sont utilisés dans de nombreuses applications réelles et reposent sur une source de batterie irremplaçable. Dès que la batterie est épuisée, le nœud est mort et la fonctionnalité du réseau est affectée. Ainsi, un protocole efficace est nécessaire pour utiliser efficacement cette énergie limitée afin que le réseau puisse survivre plus longtemps. Cette exigence

conduit à l'utilisation d'un routage économes en énergie.

Le choix du protocole de routage doit être dans le souci d'efficacité énergétique d'un part et les performances du routage d'autre part.

Le présent travail présente une étude sur les protocoles de routage dans les réseaux de Capteurs sous-marins. Nous évaluons les performances du protocole VBF et les comparer avec HH-VBF selon plusieurs métriques.

Notre mémoire est s'organisé selon trois chapitres :

Le premier chapitre est une présentation des réseaux de capteurs sous-marins, leurs architectures, ses composants et ses principes de fonctionnement.

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fils fait l'objet du deuxième chapitre, dans lequel nous présenterons les deux principaux protocoles de routage VBF et le HH-VBF.

Dans le troisième chapitre , une étude des performances des deux protocoles VBH et HH-VBF selon des différentes métriques est discuté dans la partie simulation suivi par analyse des résultats obtenus.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins (UWSNs)

1. Introduction

Plus des 2/3 de la surface de la Terre sont recouverts d'eau. Les progrès technologiques récents ont conduit à l'exploration des réseaux de capteurs sans fil sous-marins (UWSN), qui sont devenus une technologie habilitante pour l'exploration sous-marine. Un réseau de capteurs aquatiques est un réseau de nœuds de capteurs Autonome, distribué dans l'espace sous-marin pour détecter les propriétés liées à l'eau comme la masse, la température et la pression. Les capteurs sont fixes ou mobiles et sont connectés sans fil via un module de communication pour transmettre diverses informations. Les réseaux de capteurs sont utilisés dans une large gamme d'applications.

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins diffèrent principalement dans les moyens de communication utilisés pour la transmission de l'information.

Cette partie introduit des généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins (UWSNs) et décrit ses caractéristiques, ses applications et ses différentes architectures de communication.

2. Les réseaux de capteurs sans fil (WSN)

Un réseau de capteurs sans fil ou WSN (Wireless Sensor Network) sont un type particulier de réseaux Ad-hoc, composé d'un grand nombre de nœuds capteurs, avec une communication sans fil entre ces nœuds. Ces capteurs sont dispersés dans l'environnement (à surveiller) situé loin de l'utilisateur. Les entités principales qui constituent un réseau de capteurs sont :

- Les nœuds capteurs qui forment le réseau.
- La station de base qui communique avec l'utilisateur par l'intermédiaire d'internet ou par une communication par satellite.
- Le phénomène faisant l'objet des mesures présentant de l'intérêt pour l'utilisateur.

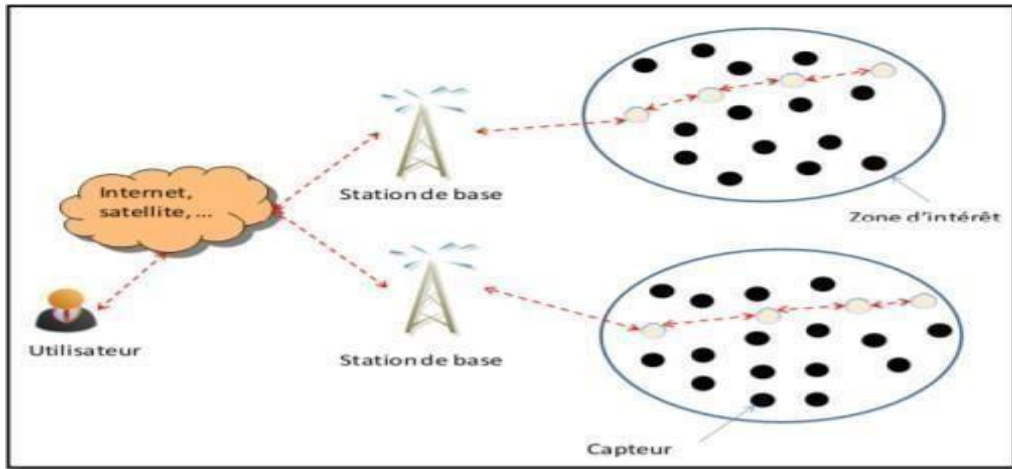


Figure I.1 : Exemple de réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs viennent en soutien de l'environnement, de la santé et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans fil. Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques telles que la température, la pression ou encore la luminosité est essentielle pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques. [1]

3. Types des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs actuels sont déployés sur terre, sous terre et sous l'eau. Selon l'environnement, un réseau de capteurs est confronté à différents défis et contraintes. Il existe plusieurs types de réseaux de capteurs parmi eux : terrestre, souterrain, sous-marin, multimédia et mobile...

3.1 Les réseaux de capteurs terrestres

Un RCSF terrestre consiste en un grand nombre (centaines à milliers) de nœuds à faible coût qui sont déployés sur terrain dans une zone donnée, de manière ad hoc (déployé à partir d'un hélicoptère par exemple). Dans le RCSF terrestre [2], les nœuds capteurs doivent être capables à transférer des données vers SB dans des environnements denses. Car la Batterie est limitée et nœuds de capteurs pour la plupart inaccessibles La terre peut être équipée de sources d'énergie secondaires telles que des cellules solaires. Les applications courantes des RCSF terrestres sont la capture et la surveillance l'environnement (voir Figure I.2), la surveillance industrielle et l'exploration de surface.

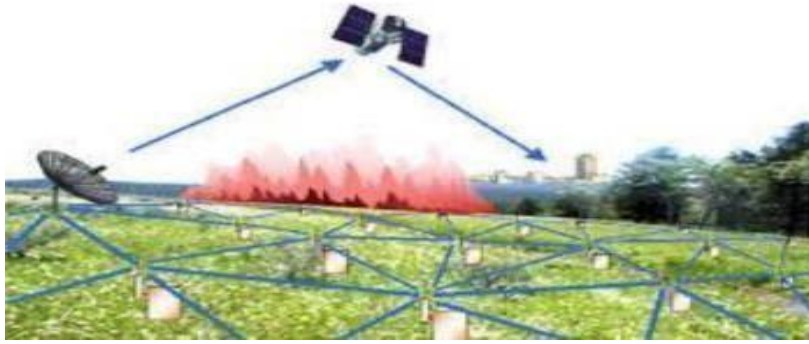


Figure I.2 : RCSF terrestre

3.2 RCSF souterrain :

Se compose d'un certain nombre de nœuds capteurs déployés dans des grottes ou des mines ou sous terre pour surveiller les conditions souterraines. Pour transmettre les informations des nœuds capteurs souterrains à la station de base (Sink), des nœuds puits supplémentaires sont situés au-dessus du sol. Ce type de réseaux font face à différents défis tels que la communication sans fil et le rechargement ou le remplacement de la batterie des nœuds déployés sous terre. La surveillance de l'agriculture, la surveillance souterraine des sols, de l'eau ou des minéraux et la surveillance des frontières militaires sont les domaines d'application des RCSFs souterrains.

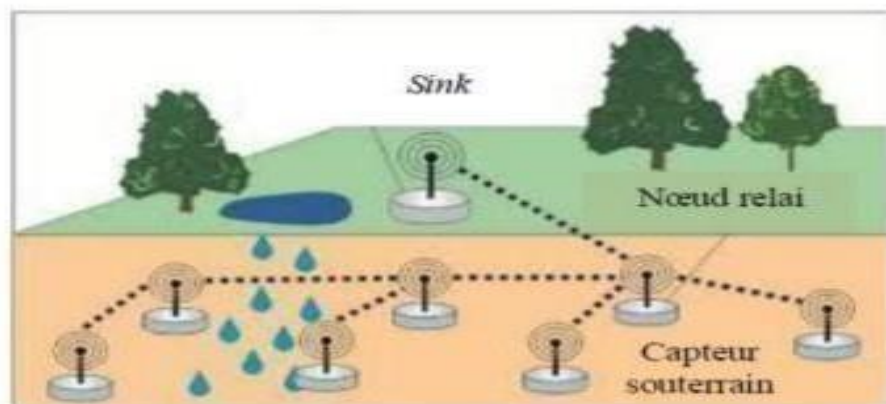


Figure I.3 : RCSF souterrain

3.3 RCSF sous-marins (aquatique) :

Un RCSF aquatique se compose de capteurs déployés sous l'eau, par exemple, dans un environnement océanique. Comme ces nœuds coûtent très cher, donc très peu de

Chapitre I

Nœuds capteurs seront déployés et des véhicules aquatiques autonomes seront utilisés pour explorer ou récupérer les données capturées. Les communications sans fil aquatiques utilisent des ondes acoustiques (voir figure I.4), qui présentent différentes contraintes telles qu'une bande passante limitée, un délai de propagation plus long, une haute latence et des problèmes d'affaiblissement du signal. Ces nœuds doivent être capables de s'auto configurer et de s'adapter aux conditions extrêmes de l'environnement océanique. Les applications des RCSF aquatiques incluent le contrôle de la pollution, la surveillance et l'exploration sous-marine, la prévention et le monitoring de désastres tels que les séismes.

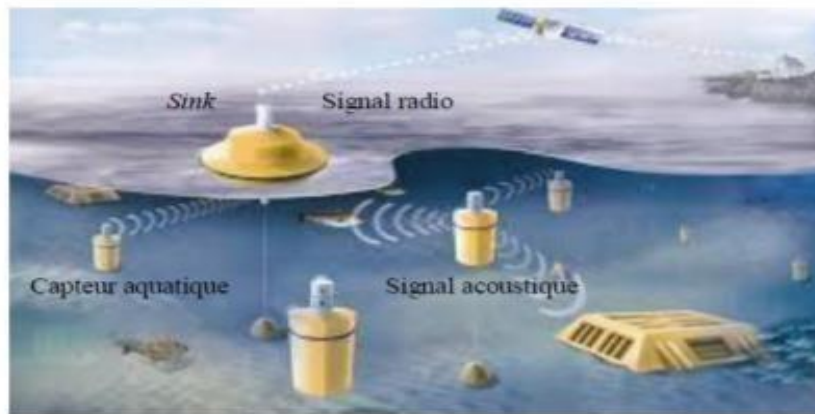


Figure I.4 : RCSF aquatique

3.4 RCSF multimédia :

Il s'agit d'un ensemble de nœuds capteurs à faible coût équipés de caméras ou de microphones, déployés de manière prédéterminée ou aléatoire pour garantir une couverture [2]. Les dispositifs de capteurs multimédias sont capables de stocker, traiter et de récupérer des données multimédias telles que la vidéo, l'audio et l'image. Ils doivent faire face à différents challenges tels qu'une forte demande de bande passante, une grande consommation d'énergie, une garantie de QoS (qualité de service) et des techniques de traitement et de compression des données. Il est nécessaire alors de développer des techniques de transmission qui supportent une bande passante assez élevée et une faible consommation d'énergie pour la délivrance fiable de contenu multimédia tel qu'un streaming vidéo. Les RCMSF améliorent les applications de RCSF existantes comme le suivi et la surveillance. Une architecture de référence d'un RCMSF proposée par [I. F. Akyildiz et al]. [2] est présentée sur la figure I.5 où trois types de RCSF avec différentes caractéristiques sont illustrés. Les capteurs multimédias

peuvent être déployés dans un réseau à un seul niveau, comme indiqué sur les figures I.5(a) et I.5(b), ou d'une manière hiérarchique, comme le montre la figure I.5(c). Les propriétés des deux types de niveaux sont détaillées sur la figure I.5. Les hubs de traitement multimédia sont utilisés dans cette architecture car ils disposent de ressources importantes en calcul, et sont appropriés pour l'agrégation des flux multimédia à partir des nœuds capteurs. Ils permettent la réduction de la dimension et le volume des données transmises au Sink et les dispositifs de stockage. Enfin, une architecture plus complexe d'un RCMSF peut être implémentée en fonction des besoins de l'application.

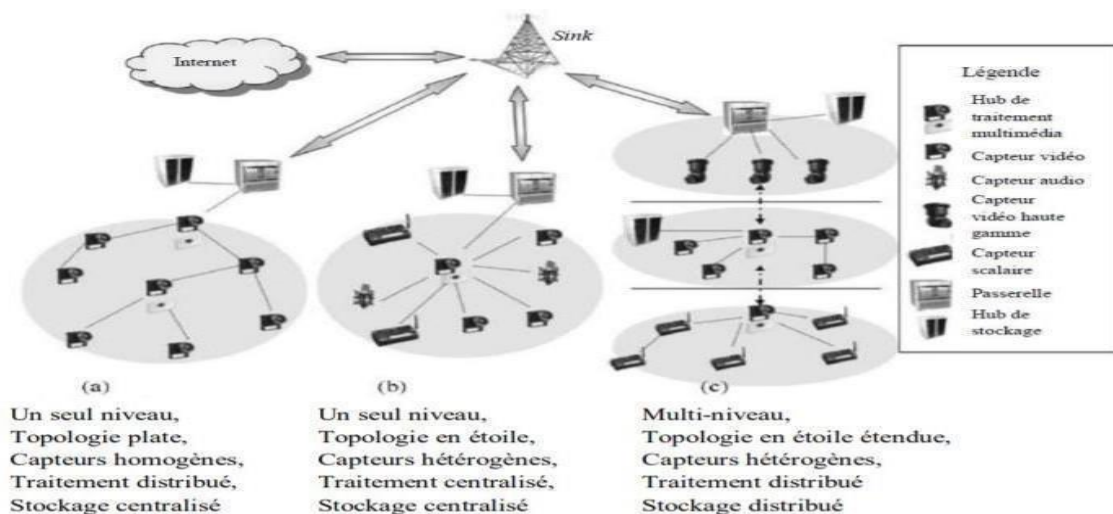


Figure I.5 : Architecture de référence d'un RCMSF

3.5 RCSF mobile

RCSFs avec nœuds mobiles Ils sont constitués de nœuds capteurs mobiles capables de se déplacer et d'interagir avec l'environnement. Les nœuds mobiles peuvent se repositionner et s'organiser au sein d'un réseau. Les RCSFs avec nœuds mobiles font face à divers défis tels que le déploiement, la gestion de la mobilité, la localisation avec mobilité et le contrôle des nœuds mobiles, le maintien de la couverture, la réduction de la consommation d'énergie et le maintien de la connectivité réseau. Les principaux exemples d'applications des RCSFs avec nœuds mobiles sont la surveillance (environnement, habitat, sous-marin), la surveillance militaire, le suivi des cibles. [3]

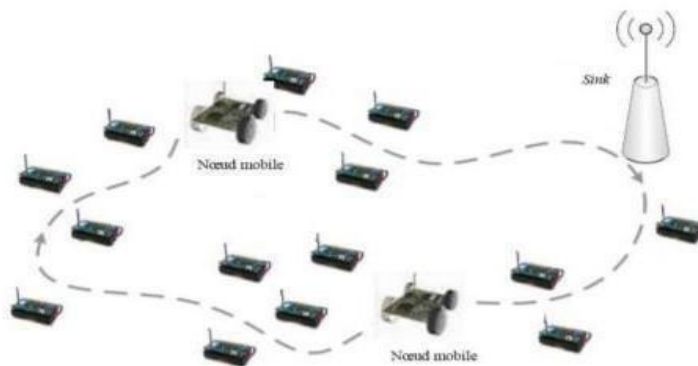


Figure I.6 :RCSF mobile

4. Applications des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSFs disposent d'un très large ensemble d'applications dans plusieurs domaines, parmi lesquels, on peut noter les applications suivantes :

4.1 Applications environnementales

La surveillance environnementale est un domaine des réseaux de capteurs sans fil largement utilisé. Une application classique est la détection de désastres tels que les incendies de forêt. Dans de telles applications, plusieurs capteurs sont déployés pour alerter les services d'urgence afin d'évaluer risques et prendre les mesures nécessaires. Les capteurs peuvent également être déployés dans à des fins agricoles ou pour surveiller des environnements difficiles tels que des volcans ou Zone toxique.[4]



Figure I.7: Applications environnementales

4.2 Le domaine militaire

Les RCSF permettent de détecter les mouvements ennemis ou de suivre leurs mouvements. Surveillance des champs de bataille, des zones hostiles (contaminées) et détection des agents chimiques et bactériens dans l'air. [4]



Figure I.8 : Réseau de capteur militaire

4.3 Le domaine médical

Les RCSFs existent déjà dans le monde médical, ils permettent par exemple la surveillance de l'état de santé des patients (des personnes âgées ou handicapées...etc.) qu'ils soient au sein de l'établissement ou même ailleurs. [4]

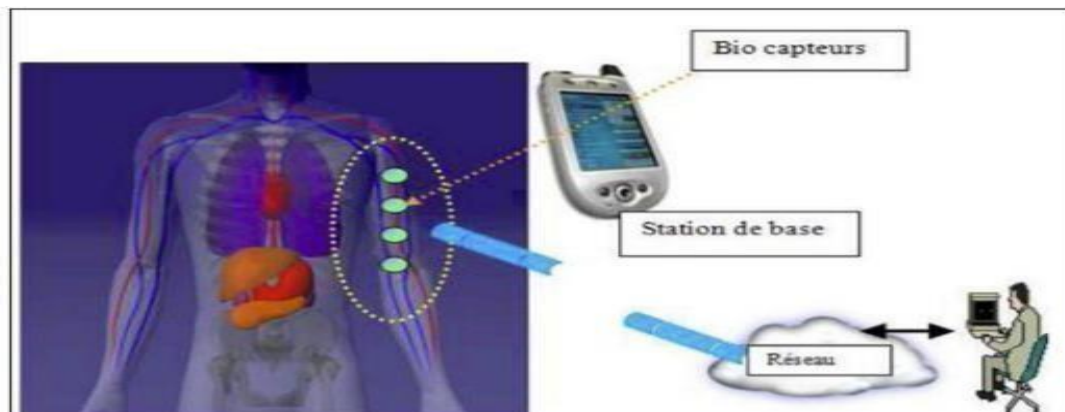


Figure I.9 : Réseau de capteur médical

4.4 Le domaine domestique

La domotique à mesure que la génération avance, des nœuds de capteurs et des actionneurs intelligents peuvent être enfouis dans l'équipement domestique, y compris les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs et les magnétoscopes. Ces nœuds de capteurs dans les appareils domestiques peuvent interagir avec tous les autres et avec la communauté externe par Internet ou par satellite. Ils permettent aux utilisateurs de contrôler les appareils domestiques localement et à distance très facilement. [4]



Figure I.10 : Ensemble de capteur dans une maison intelligente

4.5 Le domaine agricole

En agriculture, les capteurs sont utilisés pour répondre de manière appropriée aux changements Conditions climatiques, telles que les processus d'irrigation lors de l'examen des zones sèches du champ agricole.[4]



Figure I.11 : Domaine agricole

4.6 Applications commerciales

Les nœuds de capteurs peuvent être intégrés dans les processus de stockage et livrer des marchandises. Le réseau résultant peut être utilisé pour comprendre l'emplacement, le statut et la direction d'un colis ou d'un envoi. Le client en attente peut alors recevoir le colis, recevoir des notifications de livraison en temps réel et interroger l'emplacement actuel du colis. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs pourront suivre la production des matières premières jusqu'à la livraison du produit final.[21]

4.7 Applications des RCSF sous-marins

Aujourd'hui, la communication sous-marine est devenue très importante et est utilisée dans des nombreuses applications pratiques comme la surveillance de la pollution, la surveillance sismique, la télécommande en mer industrie pétrolière, surveillance de la vie marine, collecte de données scientifiques à partir de différents niveaux de la mer, détection naturelle catastrophes et avertir à l'avance, découvrir les ressources naturelles, surveiller les pipelines sous-marins, la surveillance de la sécurité nationale, et ainsi de suite. [19]

4.8 Surveillance de l'environnement

Les applications de surveillance sous-marine sont une bénédiction pour les forces militaires et navales. Cette application facilite la surveillance du territoire aquatique, la détection des sous-marins ennemis et le mien. Il y a divers réseaux de capteurs sous-marins qui sont déployés en temps réel dans des pays comme les États-Unis et l'Europe. [5]



Figure I.12 : Station de surveillance climatique

4.9 Application scientifique

Les applications scientifiques peuvent examiner l'environnement (température, salinité, niveaux d'oxygène, niveaux de bactéries et autres contaminants, matière dissoute) depuis les processus géologiques du fond marin jusqu'à la surface. Compter ou imager la vie animale (microbes, poissons ou mammifères). [3]

4.9.1 Explorations sous-marines

Les réseaux de capteurs sous-marins peuvent aider à détecter les réservoirs de pétrole sous-marins, à acheminer des câbles sous-marins et à explorer des minéraux précieux (Figure I.13). De plus, ils peuvent être utilisés pour l'archéologie sous-marine et la recherche sur les épaves. [6]

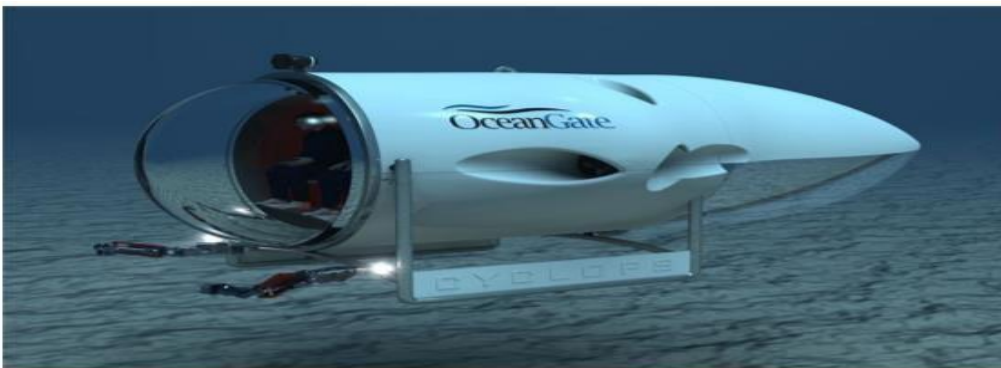


Figure I.13 : Exploration des fonds marins avec l'AUV Cyclops

4.9.2 La prévention des catastrophes

Les réseaux de capteurs sous-marins ont la capacité de mesurer l'activité sismique à distance et cela permet de fournir des alertes au tsunami pour les zones côtières, et aussi d'étudier les effets des tremblements de mer (seaquakes) (figure I.14).[6]

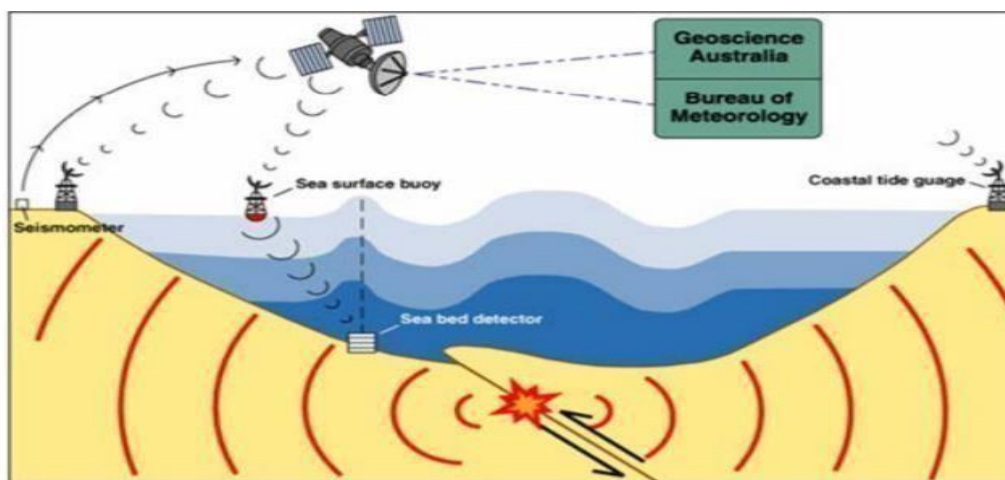


Figure I.14 : Système australien d'alerte au tsunami

4.9.3 La surveillance tactique Distribuée

Les véhicules autonomes sous-marins (AUV) et les capteurs sous-marins statiques peuvent collaborer pour contrôler des zones de surveillance, de reconnaissance, de position et de détection d'intrusion. Les réseaux de capteurs sous-marins peuvent atteindre plus de précision, que les systèmes traditionnels radar ou sonar, et permettent aussi la détection et la classification des cibles à faible signature par une combinaison de mesures des différents types de capteurs.[6]

4.9.4 La navigation assistée

Les capteurs sous-marins peuvent également être utilisés pour identifier les dangers sur le fond marin, localiser les roches dangereuses dans les eaux peu profondes, les emplacements d'amarrage et localiser les épaves immergées.[23]

4.10 Militaire

Les réseaux de capteurs sous-marins sont utilisés pour aider les applications militaires. Ces systèmes sont utilisés pour aider à trouver des mines sous-marines, protéger les ports, surveiller et suivre à l'aide de différents capteurs déployés pour détecter différents aspects des applications militaires, tels que des caméras, des sonars d'imagerie et des détecteurs de métaux intégrés aux AUV.[3]

5. Définition d'un réseau de capteurs sous-marin

Le réseau de capteurs sous-marins ou UWSN (Under water Wireless Sensor Network) se compose d'un nombre de nœuds capteurs et des véhicules déployés sous l'eau. Chaque nœud a la capacité Échanger des messages entre les nœuds du réseau et relayer les messages vers d'autres nœuds pour atteindre une station de base, il peut avoir un ou plusieurs capteurs qui enregistrent des données environnementales qui devraient être transmises aux nœuds spéciaux, généralement des plates-formes ou des bouées à la surface comme le montre la Figure I.15.

Les capteurs sous-marins peuvent mesurer différentes grandeurs telles que la qualité d'eau et étudier ses caractéristiques, la température, la densité, la salinité, l'acidité, les produits chimiques, la conductivité, le pH, l'oxygène, l'hydrogène... [6][7]

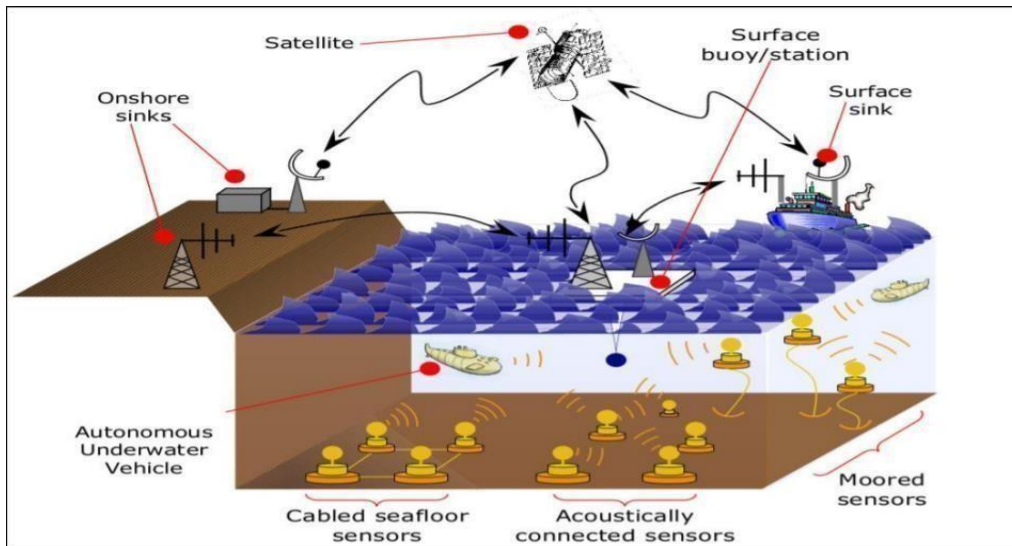


Figure I.15 : Les réseaux de capteur sous-marins

6. Architecture du capteur sous-marin

Un nœud capteur est composé principalement d'un processeur, d'une mémoire, d'une unité de capture, d'une pile d'énergie, et d'un modem acoustique. L'architecture interne typique d'un capteur sous-marin est montrée dans la figure I.16. [8]

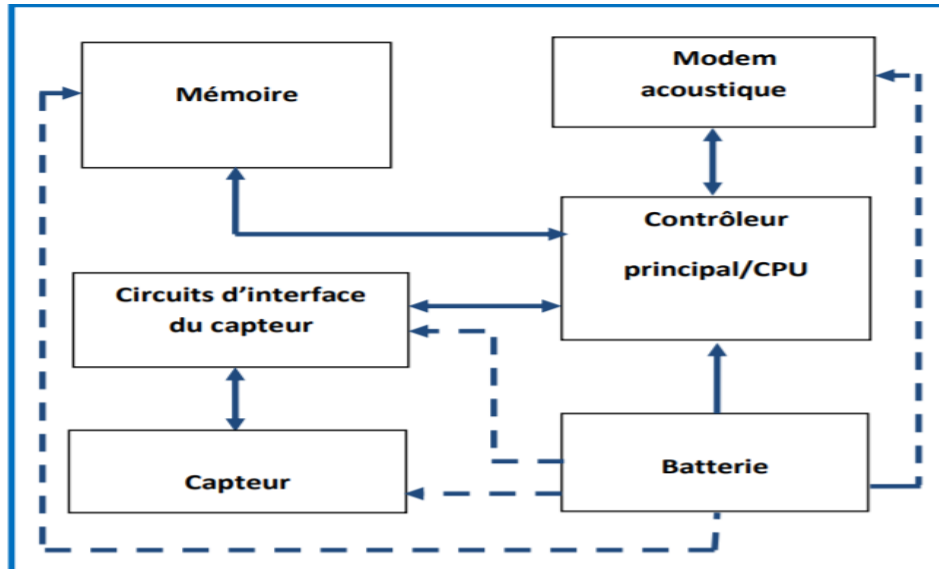


Figure I.16 : Architecture du capteur sous-marin.

Le contrôleur reçoit les données du capteur et il stocke dans la mémoire embarquée, processus, les traiter et l'envoyer à d'autres dispositifs de réseau en contrôlant le modem acoustique. Les circuits électroniques sont généralement montés sur un châssis protégé par un boîtier en PVC.

Il existe plusieurs capteurs pour des mesures sous l'eau, tels que des capteurs de sulfure hydrothermique, des capteurs silicates, des capteurs volta métriques spectrophotométrie. [9]



Figure I.17 : les différents capteurs sous-marins.

7. Les différentes architectures de communication dans les RCSF-SM

Les architectures de réseaux de capteurs sous-marins peuvent être classées en deux grandes catégories : bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D). Basé sur le modèle de communication des architectures, les chercheurs ont étudié différentes topologies et déploiements UWSN défis [20]. À cet égard, deux paramètres sont utilisés pour mesurer la couverture d'un UWSN – couverture de détection et couverture de communication. La couverture de détection signifie couverture de la cible par les capteurs déployés, et la couverture de communication indique la connectivité de chaque nœud de capteur à la station de base via un chemin multi-sauts.

7.1 Les réseaux de capteur sous-marins à deux dimensions (2D) :

Les réseaux de capteurs sous-marins bidimensionnels (2D) ont une architecture montrée dans la Figure I.18 Qui se renvoie à un réseau dans lequel un groupe des nœuds capteurs sont déployées sous l'eau. Chaque groupe a une tête de cluster « cluster Head » également appelé nœud ancre. Les clusters sont fixés comme ancres au fond sous-marin. Chaque membre du cluster rassemble les données sous-marines et la communique au cluster Head. Le cluster Head rassemble les informations / données de tous ses nœuds membres et les transmet à la station de la surface. En réseaux de capteurs aquatiques bidimensionnels la communication est effectuée en deux dimensions ; où chaque membre du cluster communique avec son cluster Head avec un lien de communication horizontale tandis que le cluster Head communique avec la station de la surface avec un lien de communication verticale. En réseaux de capteurs à deux dimensions, la communication (acoustique, optique, et RF) peut être utilisée en fonction du type d'application

et la nature de l'environnement sous-marin. En réseau bidimensionnel, la communication acoustique est préférable entre le cluster Head sous-marin et la station de la surface en raison généralement de la distance élevée entre eux. [17]

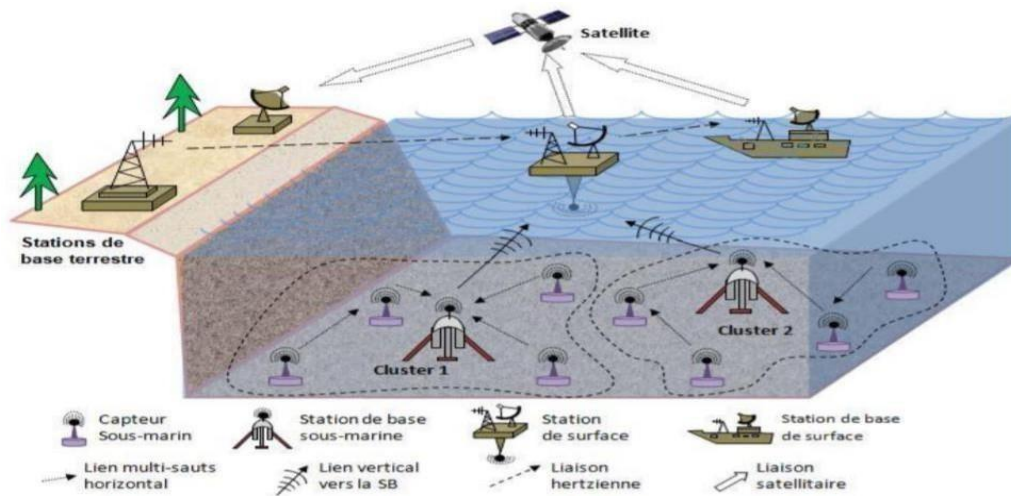


Figure I.18 : Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D

7.2 Les réseaux de capteur sous-marins En trois dimensions (3D)

Un réseau tridimensionnel est déployé pour percevoir les phénomènes plus précisément et débit. Dans le réseau tridimensionnel, capteurs-nœuds peuvent flotter à différentes hauteurs du niveau de la mer percevoir un phénomène particulier [19]. Les réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions, utilisent des capteurs flottants à différentes profondeurs afin d'observer un phénomène donné. Une solution possible serait de fixer chaque nœud à une bouée de surface, au moyen de fils dont la longueur peut être réglée de façon à ajuster la profondeur de chaque capteur [1]. Cependant, bien que cette solution permette un déploiement facile et rapide du réseau de capteurs, multiples bouées flottantes peuvent entraver les navires qui circulent sur la surface, ou ils peuvent être facilement détectés et désactivés par des ennemis dans les milieux militaires. En outre, des bouées flottantes sont vulnérables aux conditions météorologiques, et la falsification. Pour ces raisons, une approche différente est proposée, dans cette architecture, représentée sur la Figure I.19, chaque capteur est ancré au fond de l'océan et équipé d'une bouée flottante qui peut être gonflé par une pompe. La bouée pousse le capteur vers la surface de l'océan. La profondeur du capteur peut alors être réglée en ajustant la longueur du fil qui relie le capteur à l'ancrage, au moyen d'un moteur à commande électronique qui réside sur le capteur. Un défi à relever dans une telle architecture est l'effet des courants océanique

sur le mécanisme qui régule la profondeur des capteurs. De nombreux défis se posent avec une telle architecture, qui doivent être résolus afin de permettre le suivi 3D, y compris :

- **Portée de couverture**

Les capteurs doivent régler leurs profondeurs en collaboration afin de parvenir à une couverture 3D de l'océan, en fonction de leurs portées de détection. Par conséquent, il est possible d'obtenir un échantillonnage du phénomène souhaité à toutes les profondeurs. [3]

- **Couverture de communication**

Les capteurs doivent être en mesure de relayer l'information à la station de surface par l'intermédiaire des chemins multi-sauts. Ainsi, les dispositifs de réseau devraient connaître leurs profondeurs de telle sorte que la topologie de réseau est connectée en permanence, c'est à dire, au moins un trajet de chaque capteur à la station de surface existe toujours. [3]

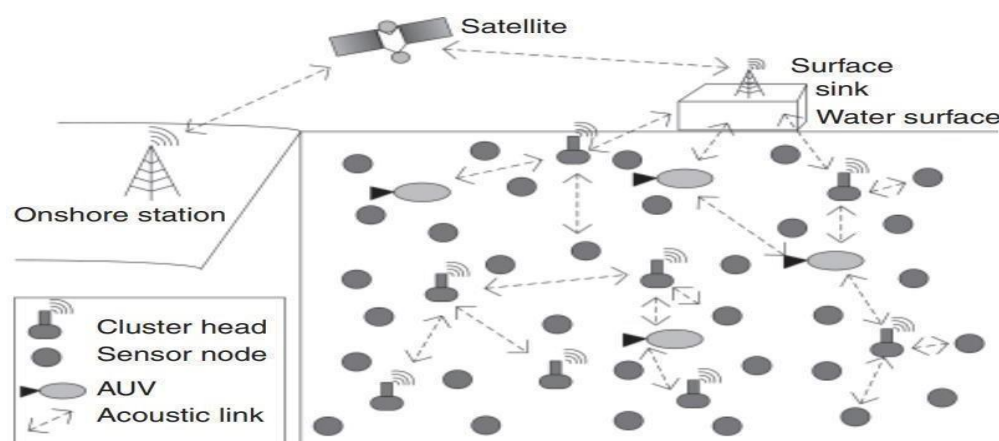


Figure I.19 : Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins à trois dimensions

8. Différentes techniques de communication sans fil aquatique

Dans la communication sans fil aquatique, il existe trois technologies de transmission par les ondes radio, par ondes optiques ou par ondes acoustiques.

8.1 Communication par onde radio

Ce type de communication, également connu sous le nom de communication radio, s'effectue à l'aide d'ondes électromagnétiques [10]. Ces ondes constituent la propagation de l'énergie se manifeste sous la forme de couplage des champs électriques et magnétiques. L'information est alors transmise par modulation constante des propriétés Onde, dans l'eau de mer, les ondes

Chapitre I

électromagnétiques sont fortement atténuées En raison des propriétés dissipatives associées à la conductivité élevée de l'eau de mer . En effet, des ondes supérieures à 1 MHz ne pénètrent l'eau de mer que sur quelques dizaines de centimètres. Par conséquent, les communications radios sont utilisées sur de courtes distances de l'ordre de quelques millimètres à quelques mètres pour un débit entre 10 Mbit/s et 100 bit/s. La communication à grande distance est possible mais à très basse fréquence, nécessitant des antennes de grande dimension et une puissance de transmission élevée. [11]

8.2 Communication par l'onde optique

La lumière visible, l'infrarouge et le laser sont des ondes optiques les plus utilisés par miles moyens de communication. En milieu marin L'utilisation de ce genre d'ondes, ne pose pas le problème d'atténuation du signal, mais le phénomène de dispersion constitue le principal handicap de la propagation de ces ondes dans l'eau ; ce qui exige une précision d'émission élevée ce qui est impossible à garantir, parce que les capteurs sont souvent mobiles dans le milieu optique et les positions relatives de l'un par rapport à l'autre ne sont pas figées. [12]

8.3 Communication par l'onde acoustique

Les systèmes de communication aquatique sans fil utilisent l'onde acoustique comme principal support physique de transmission de l'information dans l'eau, contrairement à la communication sans fil dans l'espace libre (l'air) qui est basée sur les ondes électromagnétiques. Cela est dû aux meilleures performances que présente l'onde acoustique dans le terrain marin, comparées aux autres types d'ondes (optiques et électromagnétiques) [13,14]. En effet, les océans sont absolument opaques de la luminosité et aux ondes radioélectriques et transparents aux ondes sonores comme conséquence les ondes acoustiques sont considérablement utilisées sur les communications sous-marines [15] pour la commande, la poursuite et la localisation des sous-marins, ainsi que la communication avec les côtes. La technologie employée consiste à délivrer les données numériques via un modem utilisant les ondes acoustiques.

9. Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique

La communication via Les ondes acoustiques ne sont pas le seul moyen pour la transmission sans fil des signaux sous l'eau. En effet, les ondes radio peuvent se propager sur différentes distances dans l'eau, mais à basses fréquences (30 à 300 Hz). Cependant de grandes

antennes et d'énormes Puissance d'émission sont exigé. [16] Dans le même cas, les ondes lumineuses sont susceptibles de transmettre des informations sous l'eau puisqu'elles ne subissent pas une grande atténuation à faible distance, mais elles sont affectées par le phénomène de dispersion donc La transmission de signaux optiques nécessite une grande précision pour pointer le faisceau laser .La communication optique sous-marine présente également une faible portée de transmission Bien que la technologie laser soit toujours parfaite pour les applications pratiques, Les ondes sonores restent la meilleure solution pour de nombreuses communications sous-marines dans de mauvaises conditions. La figure I.20 récapitule les caractéristiques de chacune de ces techniques de communication sans fil pour des applications aquatiques.

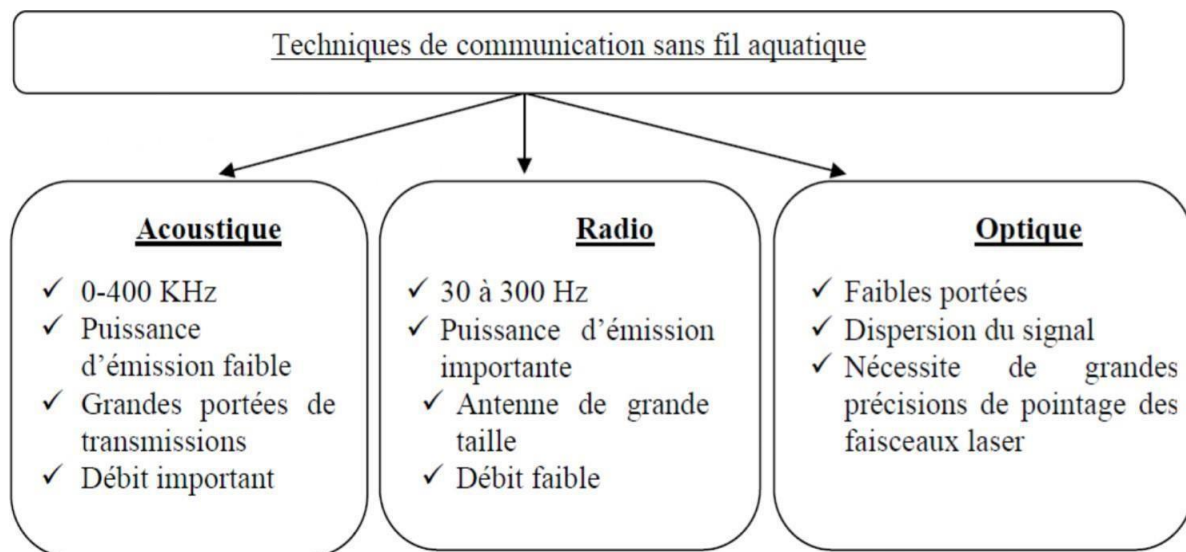


Figure I.20 : Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique

10. La différence entre réseaux de capteur terrestre et sous-marins

Réseaux de capteurs sous-marins sont très différents des réseaux de capteurs terrestres, Les différences entre eux sont les suivants :

- **Méthode de communication** : les réseaux de capteurs terrestres utilisent des ondes électromagnétiques mais dans les réseaux sous-marins, en raison des caractéristiques suivantes (grand délai, longue distance de communication) du réseau, la communication est invoquée dans les moyens physiques tels que les sons acoustiques

pour transmettre le signal. Les réseaux traditionnels qui utilisent RF pourraient ne pas fonctionner de manière efficace dans les réseaux sous-marins.

- **Protocoles** : En raison de la dynamique des réseaux distincts, les protocoles de communication dans les réseaux terrestres ne sont pas adaptés à l'environnement
- **Coût** : les équipements des réseaux de capteurs terrestres sont coûteux en raison de l'avancement de la technologie, mais les capteurs sous-marins sont encore des dispositifs coûteux. Cela est dû à la protection supplémentaire requise pour l'environnement sous-marin et l'utilisation des émetteurs-récepteurs plus complexes.
- **Déploiement** : réseaux terrestres sont densément déployés, alors que dans les réseaux sous-marins le déploiement est moins dense en raison des défis impliqués dans le déploiement lui-même et le coût aussi impliqué des équipements.
- **Puissance** : Dans les réseaux terrestres, en raison des longues distances de communication, le type de support utilisé pour la communication, les techniques de traitement du signal impliquées dans les émetteurs-récepteurs, la puissance nécessaire est de plus en plus complexe par rapport aux réseaux de capteurs terrestres.
- **Mobilité du Nœud** : la mobilité des nœuds de réseaux terrestre peut être prédite alors que dans les réseaux sous-marins la prédiction de la mobilité du nœud est difficile, en raison de la densité et la variation de débit de l'eau.
- **Mémoire** : les capteurs sous-marins ont besoin d'avoir une grande capacité de stockage par rapport aux capteurs terrestres comme le canal sous-marin est intermittent.

11. Les contraintes des UWSN

Les principaux défis rencontrés dans la conception des réseaux sous-marins sont les suivantes [25,27].

- La bande passante disponible est très limitée.
- Le canal sous-marin est altéré en raison du problème de multi-trajet.
- Le délai de propagation dans le canal aquatique est de cinq ordres de grandeur plus élevée que dans la Fréquence Radio (RF) chaînes hertziennes.
- Le taux d'erreur binaire élevé et les pertes temporaires de connectivité (zones d'ombre) sont expérimentés.

- Les capteurs sous-marins sont caractérisés par des coûts élevés en raison des gaines de protection supplémentaires nécessaires pour les capteurs et aussi le nombre relativement restreint de fournisseurs qui sont disponibles.
- La puissance de la batterie est limitée et généralement les batteries ne peuvent pas être rechargées par l'énergie solaire car elle ne peut pas être exploitée.
- Les capteurs sous-marins sont susceptibles à des défaillances à cause de l'encrassement et la corrosion.

12. Conclusion

Les réseaux de capteur sans fil en général, et les réseaux de capteur sous-marins en particulier sont des technologies intéressantes et très utilisées dans de divers domaines comme le domaine militaire, La prévention des catastrophes et la surveillance de l'environnement. Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture conceptuelle à la base du réseau de capteur sous-marin. Nous avons discuté des défis posés par le canal sous-marin, des caractéristiques du canal sous-marin. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les protocoles de routages déployés pour les réseaux de capteurs sous-marins.

***Chapitre II : Etat de l'art sur les protocoles
De routage conçus pour les UWSNs***

1. Introduction

Les réseaux de capteurs sous-marins (RCSF-SM) ressemblent à des réseaux de capteurs terrestres dans de nombreux aspects. Toutefois, le délai de propagations élevées et la bande passante limitée rendent les protocoles de réseau de capteurs terrestres inadapté au réseau de capteurs sous-marins. Par conséquent, beaucoup de recherches ont été axées pour la conception de protocoles efficaces qui tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de la communication sous-marine.

Actuellement, de nombreux protocoles de routage ont été proposés dans le but de trouver le chemin efficace et fiable entre la source et la destination.

Ce chapitre présente un état de l'art sur les protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sous l'eau et les principales approches et défis dans leur conception, ainsi identifier leurs lacunes.

Une classification des protocoles de routage est présentée, ces protocoles sont classés en trois critères : la structure du réseau et la transmission de données et le fonctionnement du protocole. L'utilisation d'un tableau comparatif pour comparer entre ces protocoles en fonction de leur rapport de livraison, efficacité de délai, efficacité énergétique, efficacité de la bande passante, fiabilité, saut par saut/ bout en bout, performance.[6]

2. Le routage dans les réseaux de capteurs sous-marins :

Le routage est la tâche d'acheminement des informations à partir du nœud source vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée, il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, un établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre n'importe quelle paire de nœud appartenant au réseau, ce qui assure l'échange des messages d'une manière continue.

Lors de la transmission d'un paquet d'une source vers une destination, il est nécessaire de faire appel à un protocole de routage, L'objectif principal des protocoles de routage est l'établissement et la maintenance des chemins, pour que les données soient correctement délivrées par le meilleur chemin dans le réseau la conception des protocoles de routage pour les RCSF-SM est loin d'être un problème simple. De nouvelles approches de routage sont nécessaires pour effectuer un routage de données sûr et efficace.

Les protocoles de routage sont conçus différemment pour répondre aux objectifs d'un réseau de capteurs sans fil sous-marins. Plusieurs applications de ce type de réseau exigent un routage efficace, sécurisé et économe en énergie assurant une bonne qualité de service et des temps de traitement et de transmission adéquats. Suivant la manière dont sont créées et maintenues les routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en plusieurs catégories.

En plus, le routage dans les capteurs sous-marins consiste en général, à acheminer les données collectées par les nœuds du réseau vers un seul ou plusieurs destinations qui sont les puits (Sink). Ces données sont caractérisées par une corrélation spatiale et temporaire très importante relative à la densité élevée du déploiement des nœuds. [28, 22, 23]

3. Les principaux défis dans le développement des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins :

Il existe de nombreux problèmes ouverts et défis de recherche dans la conception de protocoles de routage efficaces pour RCSF-SM, les points suivants énumèrent certains des problèmes/défis qui doivent être pris en compte pour une conception de protocole de routage fiable :

- Les RCSF-SM sont par nature des RCSF mobiles. Lorsqu'il y a des courants d'eau, les capteurs RCSF-SM peuvent se déplacer et souffrir de changements de topologie de réseau dynamique. Il est difficile de faire face aux changements dynamiques des réseaux sous-marins.
- Les capteurs doivent avoir des capacités plus importantes pour la mise en cache des données sous-marines.
- Les signaux radio ne fonctionnent pas de manière efficace sous l'eau et ce problème encourage l'utilisation de canal acoustique comme méthode de communication. Cependant, les principaux problèmes de canal acoustique sont les faibles bandes passantes et les délais de propagation élevés.
- Par rapport aux communications radio dans les RCSF-Terrestre, les communications acoustiques dans les RCSF-SM utilisent une bande passante étroite. En raison de la bande passante étroite, le débit de transmission dans les RCSF-SM est généralement très faible (environ 10 kbps). Ils souffrent du problème du taux d'erreur binaire élevé. Par conséquent, l'utilisation de la bande passante est une préoccupation importante pour les RCSF-SM.

- Comme dans les réseaux de capteurs terrestres sans fil, la majorité des nœuds de capteurs dans un environnement aquatique sont alimentés par batterie. En effet, il y a une forte dépendance entre la durée de vie d'un nœud capteur et la durée de vie de la batterie.
- Des techniques de transfert de données fiables sont nécessaires, tout en évitant la transmission traditionnelle des paquets d'accusé de réception, car cela entraînera une surcharge de routage.
- Le canal sous-marin présente plusieurs altérations, notamment en raison des trajets multiples.
- Les courants sous-marins peuvent modifier la position relative des capteurs et provoquer également.
- Les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller, les informations de positions des capteurs dispersés aléatoirement sur une zone à surveiller sont difficiles à connaître ou à prévoir. [1,28,29]

4. Facteurs décisifs de la conception :

Plusieurs facteurs sont décisifs pour toute conception d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sous-marins, nous allons les classer par ordre d'importance comme suit :

4.1 L'énergie consommée :

Le facteur le plus important à prendre en considération est l'énergie consommée par un capteur lors de la détection et de la transmission des données captées sur le réseau. La transmission est la fonction qui consomme le plus d'énergie, elle est proportionnelle au carré de la distance de transmission, et à la taille du paquet à envoyer. Pour préserver de l'énergie et augmenter la durée de vie d'un réseau, les chercheurs ont opté pour des techniques qui favorisent le traitement local des données afin de réduire la taille du paquet. Ces techniques évitent la redondance des informations à transmettre et qui mettent le capteur en mode sommeil plus longtemps possible.

4.2 Le lien de la communication :

Les réseaux de capteurs sous-marins utilisent le canal acoustique sans fil comme un medium de transmission qui est caractérisé par un rayon de transmission réduit et une qualité de communication variable, souvent, dégradée par les interférences des ondes.

4.3 Puissances de l'unité de traitement :

Un capteur est très limité, en termes de traitements locaux à cause de sa taille minimale. Cela signifie que le protocole de routage doit être simple et occuper un espace réduit, pour garantir des performances meilleures.

4.4 La mise à l'échelle (Scalabilité) :

Dans un RCSF-SM, les protocoles de routage doivent fonctionner efficacement même si la taille du réseau grandit. Cela n'est pas facile à réaliser, car établir un chemin entre deux nœuds mobiles devient coûteux en termes de temps requis, nombre d'opérations, et bande passante dissipée, quand le nombre des nœuds augmente.

4.5 Les panne des capteurs :

Les capteurs sont des dispositifs fragiles et très vulnérables à cause de l'environnement qui les entoure. Les pannes sont multiples : physiques relatives aux techniques de déploiement ou bien logiques relatives aux blocages des applications informatiques embarquées. La redondance physique est souvent la solution la plus adaptée, les capteurs sont déployés en grand nombre et avec une densité élevée pour garantir une couverture globale et permanente. [7]

5. Critères de performances d'un protocole de routage

L'efficacité des protocoles de routage permet aux réseaux de capteurs d'effectuer leur mission jusqu'au bout et pour longtemps. Par conséquent, on dit que le protocole de routage est valide si les propriétés suivantes sont remplies :

- **Extensibilité**

Il prend en charge la mise à l'échelle sans goulots d'étranglement.

- **Mobilité des nœuds**

La position des capteurs sur la zone de collecte n'est pas toujours constante. Nœud de capteur Il peut devenir mobile et changer de position selon les besoins de l'utilisateur. Traiter Les informations spécifiques au maintien des liens et à la mise à jour du routage seront Planifiez lors de la conception des protocoles de routage.

- **Consommation énergétique**

Le facteur le plus important à considérer est l'énergie consommée par le réseau de capteurs lors de la détection et de la transmission des données, sa conservation est essentielle pour garantir la longue durée de vie du réseau, car il est généralement Impossible de charger la batterie du capteur. Cette consommation est optimisée lorsque le nombre de messages retransmis et le nombre de messages redondants à la réception sont réduits.

- **Consommation de la bande passante**

Optimiser la consommation de bande passante en minimisant le nombre messages redondants.

- **Latence**

C'est le temps passé par les nœuds capteurs à effectuer des opérations de calcul sur les données collectées ou reçues. Ce délai doit être raisonnable afin de ne pas retarder la transmission des informations pour les applications critiques et temps réel.

- **Sécurité des échanges**

Le routage est l'un des mécanismes les plus importants dans les réseaux de capteurs sous-marins. Les mécanismes de routage non sécurisés nuisent non seulement aux performances des capteurs sous-marins, mais les rendent également vulnérables à de nombreuses attaques de sécurité, telles que la modification, l'interception et la falsification des informations. Les mécanismes de sécurité doivent être adaptés aux réseaux de capteurs sous-marins pour protéger le fonctionnement du réseau. [22]

6. Classification des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins

Les protocoles de routage sont conçus différemment pour répondre aux objectifs des réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Certaines applications de ces réseaux nécessitent un routage efficace, sécurisé et économe en énergie pour assurer une bonne qualité de service et un temps de traitement et de transmission suffisant. Dépend de la façon dont les routes sont créées et maintenues lors du routage des données. Les protocoles de routage peuvent être séparés en plusieurs catégories.

Les techniques de transmission de données sur un réseau de capteurs sans fil sous-marins différent selon trois critères :

- La structure du réseau : routage plat, hiérarchique ou basé sur la localisation.
- La transmission de données : routage basé sur le multi-chemin, sur un seul

chemin.

- le fonctionnement du protocole: initiée par la source, table Driven, agrégation des données . La figure II.1 présente une classification détaillée des protocoles de routage dans les RCSF-SMs. [22]

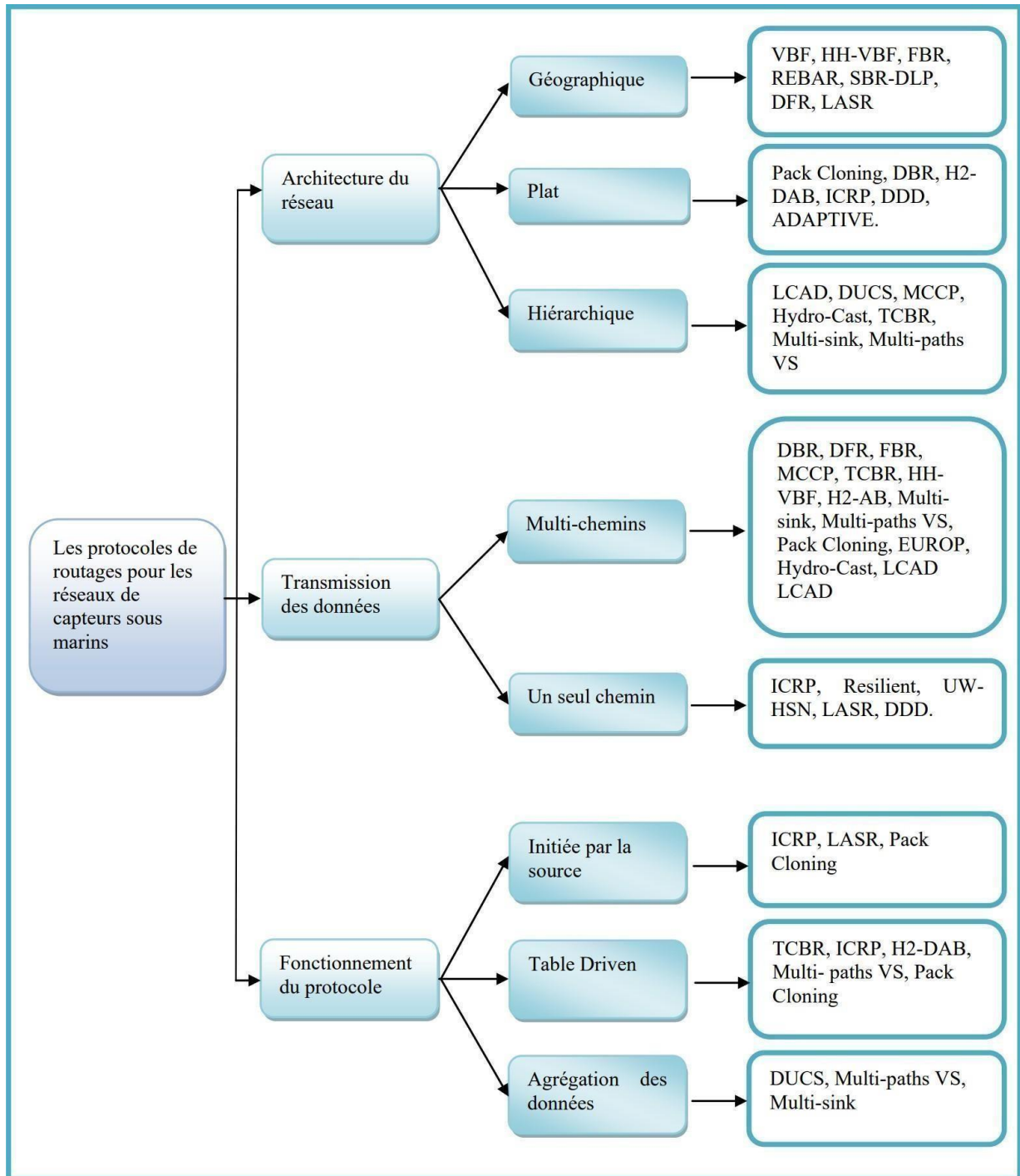


Figure II.1 : Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins .

6.1 Routage à plat

Appelé également routage centré données (data centric) où tous les nœuds ont la même tâche à effectuer. Il s'agit de la première méthode utilisée lors du routage des données dans RCSF. Il est basé sur la coopération de tous les nœuds du réseau. Les attributs de données sont spécifiés par le système de nommage des attributs (attributs, valeurs), car étant donné le grand nombre des nœuds, il est difficile d'attribuer un identifiant global à chaque nœud. Parmi leurs avantages, la simplicité permet ainsi d'établir une communication sans surcoût, où chaque nœud n'a besoin que des informations de ses voisins immédiats. L'inconvénient est que les ressources énergétiques des nœuds proches de la station de base peuvent être épuisées, puisque tout le trafic vers cette dernière doit passer par eux. [22]

6.1.1 Le protocole de routage Basé sur la Profondeur « DBR »

DBR (Depth-Based Routing) ne nécessite pas d'informations dimensionnelles complètes sur l'emplacement. Il gère un dynamique réseau avec une bonne efficacité énergétique et utilise une architecture de réseau à plusieurs stations de base sans introduire des frais supplémentaires. Basé sur les informations de profondeur de chaque capteur, DBR transmet les paquets de données vers la surface d'eau. En outre, un paquet de données à un champ qui enregistre les informations de profondeur de ses derniers expéditeurs et est mis à jour à chaque saut.

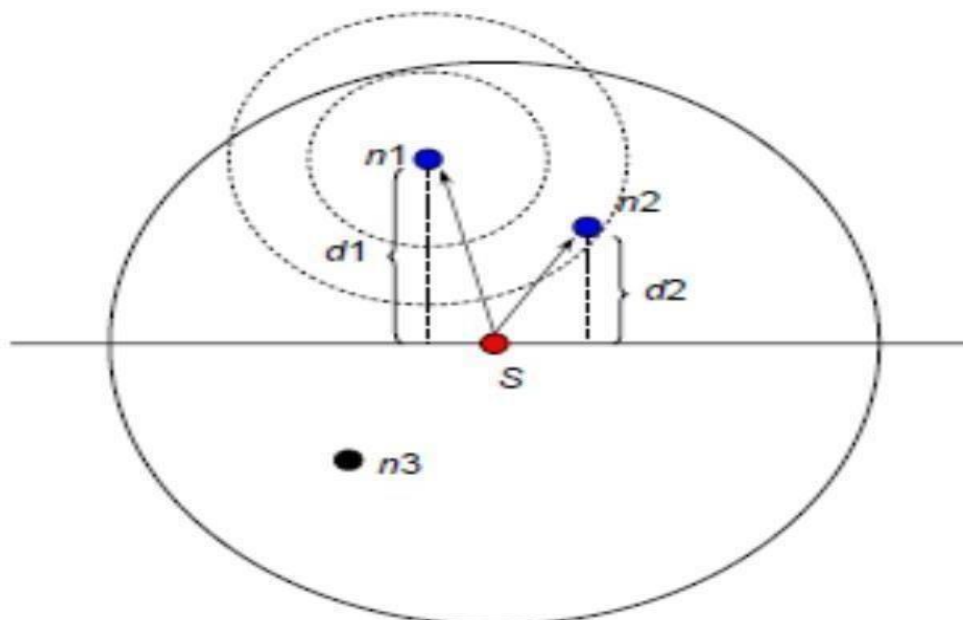


Figure II.2 : Sélection de nœud de Transfert dans le protocole DBR .

Chapitre II

Une architecture de réseau de capteurs sous-marins à station de base multiples peut être un avantage pour DBR, comme le montre la figure II.2, en supposant que chaque nœud connaît ses informations de profondeur, à savoir la distance verticale qui le sépare avec la surface de l'eau. En fait, les informations de profondeur peuvent être facilement obtenues avec un capteur de profondeur.

Cependant, obtenir l'information complète sur l'emplacement dimensionnel est assez difficile. Comme, les nœuds de capteurs transmettent des signaux acoustiques (cercle en pointillé rouge) aux stations de base situés à la surface. A leur tour, ils transmettent des signaux radio (cercle continu bleu) soit à des stations terrestres ou des satellites. Les efforts de DBR sont concentrés sur la livraison d'un paquet d'un nœud source aux stations de base. Plus un paquet se rapproche de sa destination, plus la profondeur des nœuds de transmission est faible. Un nœud de capteur prend sa décision sur le paquet à transmettre de manière distribuée, en fonction de sa propre profondeur et de la profondeur de l'expéditeur précédent. Lors de la réception d'un paquet, un nœud récupère d'abord la profondeur d_p du saut précédent du paquet, qui est incorporé dans le paquet. Le nœud récepteur compare ensuite sa propre profondeur avec d_p . En fonction de la distance à la surface de l'eau, ($d_c < d_p$), il se considère comme qualifié candidat pour transmettre le paquet. Dans tous les autres cas, il laisse tomber le paquet, considérant qu'il provient d'un nœud plus proche de la surface. Au cas où plusieurs nœuds qualifiés essaient de diffuser il en résultera un paquet, une collision et une consommation d'énergie élevées. Par conséquent, pour réduire la collision ainsi que la consommation d'énergie, le nombre de nœuds de transmission doit être contrôlé en utilisant une file d'attente prioritaire. De plus, un nœud peut recevoir le même paquet plusieurs fois. En conséquence, il peut envoyer le paquet plusieurs fois. En envoyant le même paquet seulement une fois, cela améliore l'efficacité énergétique.

Le fonctionnement du protocole peut se résumer comme suit. Lors de la réception d'un paquet, un nœud vérifie lui-même comme un nœud intermédiaire qualifié en utilisant la différence de profondeur avec l'émetteur du paquet. Si un nœud est un émetteur qualifié il calcule le temps de maintien et insère le paquet dans la file d'attente prioritaires Q1, sinon il le rejette. En cas où le nœud est un nœud intermédiaire qualifié, le paquet est transmis à l'expiration de la durée de maintien et les informations sur le paquet transmis sont enregistrées dans le tampon de paquet historique Q2. Afin de supprimer la transmission des paquets dupliqués, un nœud vérifie toujours le tampon de paquet historique Q2 avant la transmission d'un paquet. [22,26]

Afin d'évaluer la performance de DBR on a utilisé les mesures suivantes :

- Rapport de livraison de paquet
- Délai moyen de bout en bout
- La consommation totale d'énergie

6.2 Routage hiérarchique

Cette approche est basée sur la formation de clusters (espaces communs). Le principe est d'envoyer les données collectées par chaque nœud du cluster à son responsable de zone (Cluster Head), et après que le responsable de zone (CH) traite leurs parties communes, puis les transmet à la destination suivante (si CH ne peut pas directement Arriver à la base, l'information sera transmise au responsable zone suivant). L'avantage est de réduire les coûts de communication et d'énergie en minimisant le nombre de messages circulant sur le réseau, puisque CHs applique une fonction d'agrégation sur les données du cluster, permettant de les combiner. L'inconvénient est la taille du réseau. L'inconvénient est la taille du réseau. De plus, le processus d'élection du chef de cluster devient critique et consommé plus de ressources lorsque la taille du réseau augmente. [22]

6.2.1 Le protocole de routage de regroupement des coûts minimum « MCCP »

MCCP (Minimum Cost Clustering Protocol) est un protocole qui se base sur le principe du « clustering », où les clusters sont formés à base d'une métrique de coût. Le coût d'un cluster est basé sur trois paramètres : la quantité d'énergie requise par les membres du cluster pour atteindre le cluster-head, la position du cluster-head et la station de base, et l'énergie résiduelle du cluster-head et des membres du cluster.

Au premier lieu dans cette approche, un algorithme MCCA (Minimum Cost Clustering Algorithm) a été proposé, où le cluster est sélectionné par une approche centralisée. Une unité de commande centralisée (une station de base ayant connaissance complète sur le réseau) effectue la formation des clusters. En MCCA, les ensembles potentiels de nœuds (clusters) sont choisis en fonction des paramètres mentionnés précédemment. L'algorithme MCCA est étendu à une approche distribuée où MCCP est proposé.

Avec le protocole MCCP, la formation des clusters est effectuée d'une manière distribuée. Initialement, tous les nœuds peuvent être un cluster-head ou des nœuds membres. Un nœud cluster-head construit l'ensemble de ses voisins pour former un cluster. Ensuite, le coût du cluster sélectionné est calculé en fonction des paramètres cités précédemment. Le coût du cluster calculé est alors diffusé en direction de ses voisins de deux sauts.

Chapitre II

A la réception du coût calculé, les autres cluster-heads comparent leurs propres coûts avec le coût du cluster reçu. Dans le cas où le nœud émetteur a un meilleur coût, ces nœuds vont extraire l'ID du cluster-head à partir du paquet reçu et envoient un message « JOIN ».

Si un nœud cluster-head a un coût minimum par rapport aux autres nœuds, ce nœud diffuse un message d'invitation à ses voisins. De cette façon, tous les nœuds sont sélectionnés soit en tant que cluster-head ou membres du cluster. Ensuite, chaque nœud cluster-head génère un ordonnancement TDMA (Time-Division Multiple Access) et le transmet à ses membres.

Afin d'éviter le problème des hot-spots à proximité de la station de base (les nœuds près d'une station de base, ont une forte probabilité de transmettre une grande quantité de paquets et meurent hâtivement). Dans le protocole proposé les clusters près de la station de base contiennent moins de membres par rapport aux clusters éloignés. En outre, afin d'équilibrer la charge de trafic entre les cluster-head et les nœuds membres, un regroupement périodique est effectué. Ainsi, le calcul du coût d'un cluster prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds donc le rôle de cluster-head et des nœuds des membres change lors de la formation des nouveaux clusters.

MCCP présente de nombreux avantages, car il évite la formation de hot-spots autour de la station de base en générant plusieurs cluster-head, ce qui contribue à équilibrer la charge de trafic. Ainsi, le nombre de membres du cluster dépend de l'emplacement du cluster-Head et de la station de base, ce qui signifie que les clusters les plus proches de la station de base auront moins de membres de cluster. En outre, il a la capacité d'équilibrer la charge de trafic par le re-clustering périodique des nœuds. Cependant, la période de re-clustering du réseau utilisé en MCCP est définie dans un intervalle des jours voir des mois. Pour l'environnement aquatique, les nœuds sont en mouvements continus. Ces longues périodes peuvent affecter en fin de compte l'efficacité du cluster. La Figure II.3 illustre l'idée de base de protocole MCCP. [22,23,28]

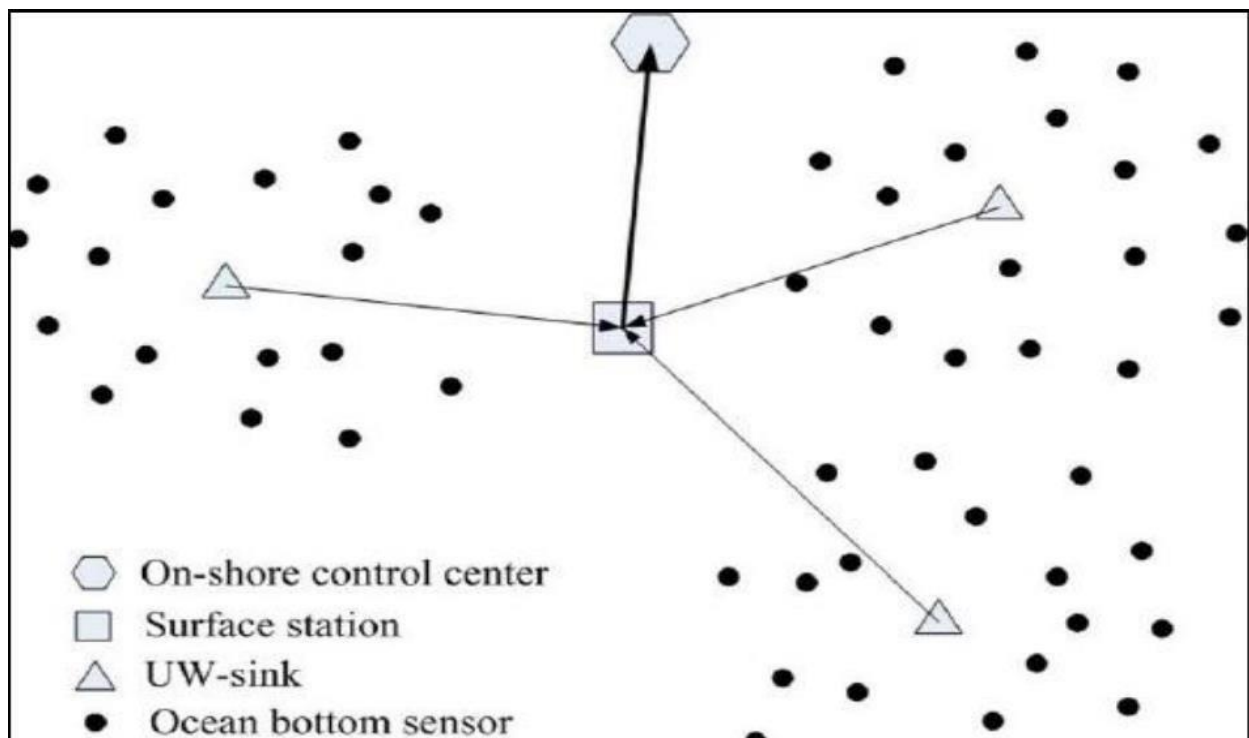


Figure II.3 : Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP.

6.3 Routage basé sur la localisation

Lorsque les décisions de routage sont basées sur l'emplacement des nœuds, le routage est appelé routage géographique. [22]

6.3.1 Le protocole de routage basé sur l'acheminement par vecteur « VBF »

Dans les réseaux de capteurs sous-marins, en plus de la contrainte d'énergie, les algorithmes de routage doivent être capables de gérer la mobilité des nœuds d'une manière efficace. Le protocole VBF répond à ces exigences avec succès.

VBF suppose que chaque nœud connaît ses informations de positions, qui peuvent être obtenues par des algorithmes de localisation. S'il n'y a pas de service de localisation disponibles, les capteurs peuvent toujours estimer leurs positions par rapport au transmetteur en mesurant l'angle d'arrivée (AOA) et la force du signal à travers le dispositif matériel. Cette hypothèse est justifiée par le fait que les antennes acoustiques directionnelles sont de taille plus petite que les antennes directionnel RF en raison de la très faible longueur d'onde du son. Par ailleurs, les capteurs sous-marins sont généralement plus grands que les capteurs terrestres.

Chapitre II

Dans VBF, chaque paquet comporte les informations de position de l'émetteur, la cible et le nœud intermédiaire (le nœud qui retransmet ce paquet). Le chemin de transmission est défini par un vecteur de routage à partir de la source vers la cible. Lors de la réception d'un paquet, un nœud calcule sa position par rapport au nœud intermédiaire. Récursivement, tous les nœuds recevant le paquet calculent leurs positions. Si un nœud détermine qu'il est assez-proche au vecteur de routage (inférieure à un seuil de distance prédéfinie), il met sa propre position calculée dans le paquet et continue la transmission, sinon, le paquet est rejeté. De cette façon, tous les nœuds intermédiaires dans le réseau forment une "pipe" de routage : les capteurs dans cette pipe sont éligibles pour la transmission des paquets, et ceux qui ne sont pas proches au vecteur du routage ne transfèrent pas le paquet. La Figure II.4 illustre l'idée principale de VBF, le nœud S1 est la source, et le nœud S0 est le sink. Le vecteur de routage est spécifié par $\vec{S1S0}$. Les paquets des données sont transmis de S1 à S0. Les nœuds intermédiaires qui se trouvent le long du vecteur de routage forment la pipe de routage d'un rayon pré-contrôlé (i.e., le seuil de distance, notée W).

➤ Facteur de désirabilité :

Avec la Figure II.4 donnée ci-dessous, en supposant que le vecteur de routage est donné par S1S0, où la source est S1 et la cible est S0, le nœud A calculera d'abord le facteur de désirabilité pour mesurer la commodité de transmettre le paquet, qu'il est défini et calculé par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{p}{w} + \frac{R - d * \cos \theta}{R}$$

Où P est la projection du nœud A au vecteur de routage S1S0, W est le rayon du pipeline virtuel, R est la plage de transmission, d est la distance entre le nœud A et le vecteur de routage S1S0, θ est l'angle entre le vecteur FS0 et FS1. En mesurant la valeur du facteur de désirabilité du nœud, il peut déterminer s'il est dans la meilleure position pour avancer ou non, si le facteur de désirabilité est grand, cela signifie que même la projection de ce nœud au vecteur de routage est grande, le nœud n'est pas dans une position optimale et il n'est pas souhaitable qu'il avance. Après qu'un nœud a reçu un paquet de données, il doit déterminer s'il est proche du vecteur de routage, si c'est le cas, il doit estimer sa capacité à avancer, puis le nœud maintient et retarde le paquet un certain intervalle de temps en fonction de sa valeur de facteur de désirabilité, cet intervalle de temps est défini comme :

$$T_{\text{adaptation}} = \sqrt{\alpha} * T_{\text{delay}} + \frac{R - d}{v_0}$$

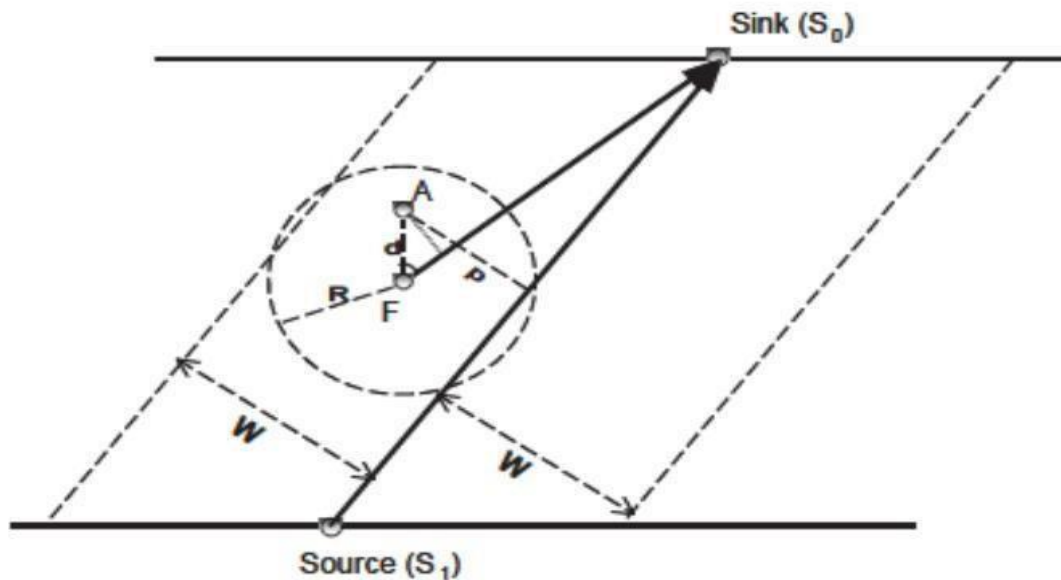


Figure II.4 : VBF Facteur de désirabilité.

Lorsque α est le facteur de désirabilité, T_{delay} est le délai maximal prédéfini, d est la distance entre le nœud A et le transmetteur F, v_0 est la vitesse de propagation du signal acoustique dans l'eau (1500 m/s). Lorsque la valeur du facteur de désirabilité est faible, le temps d'attente est moindre et vice versa.

Cependant, VBF a quelques problèmes. Premièrement, l'utilisation de canaux de routage virtuels de la source à la destination affecte l'efficacité du routage des réseaux avec différentes densités de nœuds. Dans certaines régions, si le déploiement de nœuds est très clairsemé ou devient plus clairsemé en raison de certains mouvements, il peut y avoir peu ou pas de nœuds dans le canal virtuel responsable du transfert de données ; certains chemins peuvent même exister en dehors du pipeline. En fin de compte, cela conduira à une faible délivrance de données dans des régions clairsemées. Deuxièmement, VBF est très sensible au seuil de rayon du tuyau de routage, ce qui peut affecter considérablement les performances de routage ; une telle fonctionnalité peut ne pas être idéale dans le développement de protocoles réels. De plus, certains nœuds le long de la pipe de routage sont utilisés plusieurs fois afin de transférer des paquets de sources spécifique vers la destination, ce qui peut épuiser rapidement leur énergie. [22,23,32,33]

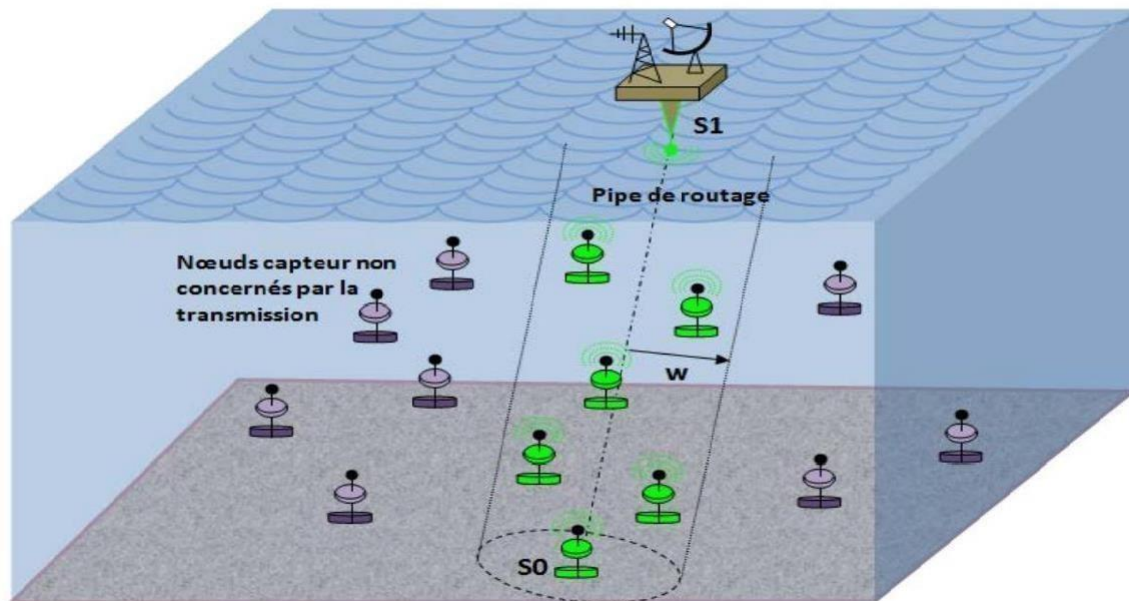


Figure II.5 : Topologie du protocole VBF pour les RCSF-SMs.

Comme tous les protocoles qui utilisent le routage à la source, VBF n'a pas besoin de savoir des informations à chaque nœud. Par conséquent, il est extensible à la taille du réseau. [32,33,34]

6.3.2 Le protocole de routage « HH-VBF »

Afin de surmonter les problèmes du protocole VBF dans un réseau clairsemé, tels qu'un faible taux de transfert de données et un rayon de conduite de routage sensible, le protocole HH-VBF (hop-by-hop VBF) est proposé. HH-VBF forme un pipeline de routage de manière saut par saut, ce qui améliore considérablement le taux de livraison des paquets de données. Bien qu'il soit basé sur le même concept que le routage vectoriel utilisé dans VBF, au lieu d'utiliser un seul canal virtuel de la source à la station de base, un canal virtuel différent autour du vecteur est défini pour chaque saut. De l'expéditeur à la station de base, comme illustré à la Figure II.5. De cette manière, chaque nœud peut prendre de manière adaptative des décisions de transfert de paquets en fonction de son emplacement actuel. Cette conception peut apporter directement les avantages suivants :

- Étant donné que chaque nœud possède son propre tuyau de routage, le rayon maximal du tuyau correspond à la plage de transmission. En d'autres termes, il n'est pas nécessaire d'augmenter le rayon de la conduite au-delà de la plage de transmission pour améliorer les performances de routage. Figure II.5 Principe du protocole HH-VBF de RCSF-SM.

- Dans un réseau clairsemé, bien que le nombre de nœuds éligibles pour la transmission puisse être petit, tant qu'il y en a un dans le réseau, HH-VBF peut trouver un chemin de transmission de données.

Bien que les résultats de la simulation montrent que HH-VBF produit des résultats nettement meilleurs en termes de débit de livraison de paquets que VBF, en particulier dans les régions clairsemées, le problème inhérent du seuil de rayon du tuyau de routage existe toujours ; Cela peut affecter ses performances. De plus, en raison de sa nature saut par saut, la surcharge encourue par HH-VBF augmente considérablement par rapport à la signalisation VBF. [22,33]

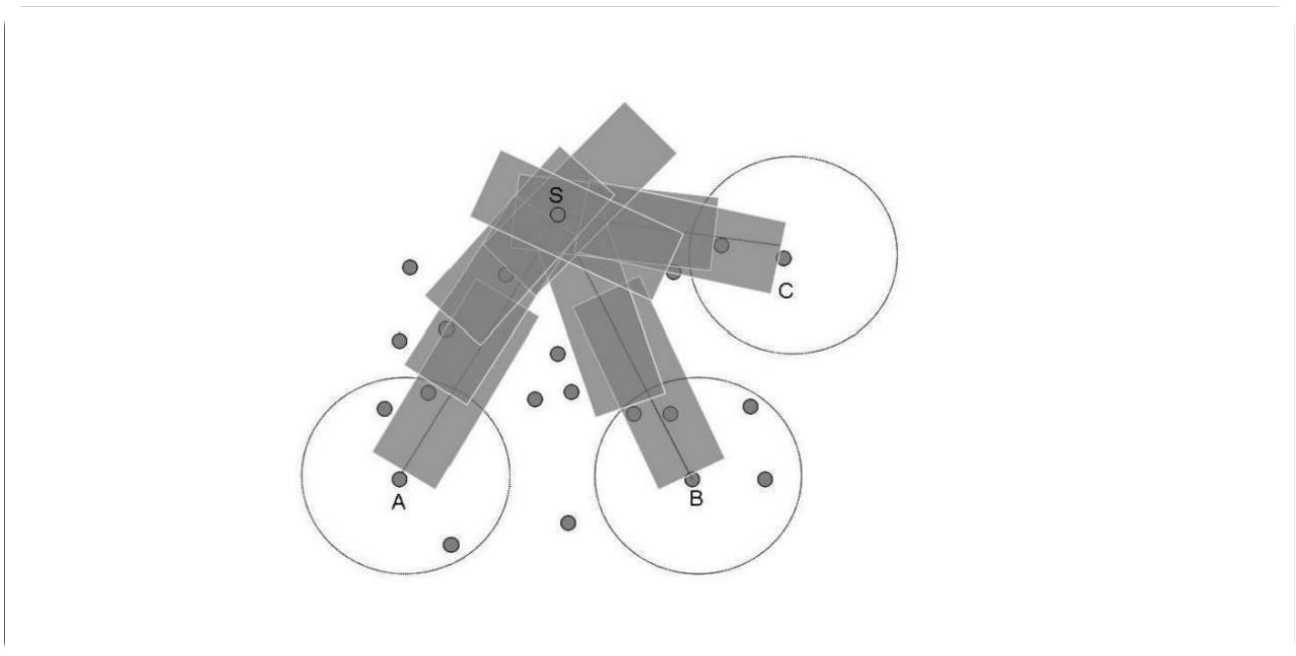


Figure II.6 : Principe du protocole HH-VBF pour les RCSF-SMs.

6.4 Routage multi-chemins

Ce type de routage utilise plusieurs chemins afin d'améliorer les performances du réseau en conservant des chemins alternatifs.[22]

6.4.1 Le protocole de routage axé par faisceau « FBR »

Pour éviter une inondation inutile des données, [Jornet et al]. Ont proposé un schéma de routage noble appelé FBR. FBR convient à la fois aux nœuds statiques et aux nœuds mobiles du réseau. De plus, le réseau avec FBR n'a pas besoin d'être synchronisé avec l'horloge globale. En connaissant simplement l'emplacement de la source et de la destination, une transmission réussie est possible indépendamment des informations d'emplacement des autres nœuds. Le FBR effectue une inondation pour acheminer les paquets de données et cette inondation est limitée par la puissance de transmission. Pour minimiser la consommation d'énergie du réseau,

Chapitre II

Ce protocole engage différents niveaux de puissance pour la transmission. La Figure II.6 explique comment un paquet de données est transmis dans FBR. Le nœud A est la source et le nœud B est la destination où le nœud A envoie une requête multidiffusion à ses nœuds voisins. C'est ce qu'on appelle un paquet RTS qui contient les données de positionnement des nœuds A et B. Le niveau de puissance le plus bas à la portée minimale et la zone de portée augmente lorsque nous le passons à un niveau de puissance plus élevé. Mais la commutation du niveau de puissance ne se produit que lorsqu'il ne peut trouver aucun nœud dans la plage désignée pour le saut suivant. Mais les nœuds récepteurs ne décident pas du niveau de puissance à utiliser, mais le contrôle de puissance en boucle ouverte et le niveau de puissance sont décidés par le nœud émetteur. On considère également qu'il existe des niveaux de puissance définis allant de P1 à PN qui peuvent être augmentés d'un niveau au niveau supérieur en cas de besoin. Les nœuds doivent se trouver dans le périmètre du niveau de puissance défini pour recevoir tout signal détectable. Les nœuds existants dans le rayon de transmission accessible avec le niveau de puissance P1 répondent avec un paquet CTS (Clear To Send). Dans le cas où, le nœud source reçoit plusieurs paquets de réponse CTS, il sélectionne un nœud intermédiaire approprié (le nœud le plus proche de la destination) et transmet le paquet à ce nœud intermédiaire.

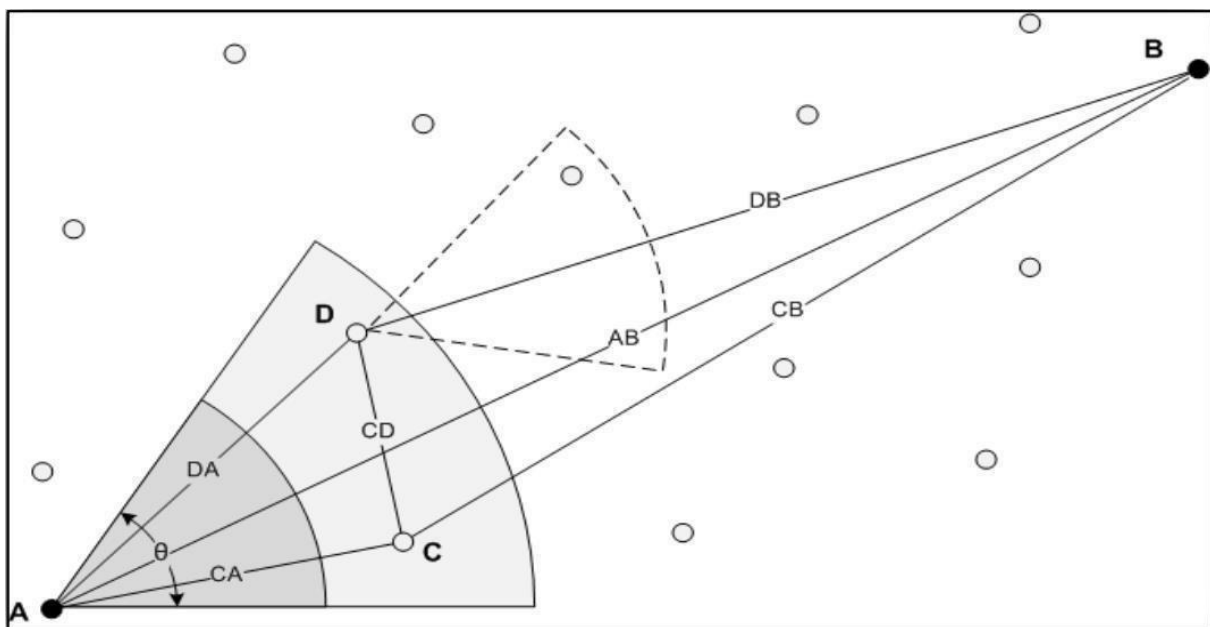


Figure II.7 : Illustration du protocole FBR.

Dans notre exemple, aucun nœud du cône de transmission ne peut être atteint au niveau de puissance P1. Ainsi, après un temps aller-retour attendu ($2 d_1/c$ pour la puissance P1, où $c=1500$ m/s est la vitesse nominale du son sous l'eau), le nœud A ne reçoit aucune réponse. Il

augmente maintenant la puissance d'émission vers P2, et envoie un nouveau RTS. En général, un nœud émetteur continuera d'augmenter la puissance jusqu'à ce qu'il atteigne quelqu'un, ou jusqu'à ce que tous les niveaux de puissance aient été épuisés. S'il ne peut atteindre personne au niveau maximal PN, l'émetteur décalera son cône et commencera à chercher des relais potentiels à gauche et à droite du cône principal. Cette stratégie privilégie les chemins avec un minimum de zigzags, tout en garantissant que tous les chemins possibles seront éventuellement recherchés. Alternativement, un nœud peut d'abord chercher dans le voisinage d1 en décalant son cône puis décider d'augmenter la puissance pour avancer en distance.

Pour évaluer la performance de FBR, les mesures utilisées sont : la consommation d'énergie par bits, délai de bout en bout, et le nombre de collisions.

La consommation d'énergie moyenne par bits prend en compte l'énergie investie dans la transmission, l'écoute et la réception active des paquets de commande et de données, ainsi que leurs retransmissions possibles. [1,31,23,37]

6.5 Routage à un seul chemin

Le routage à chemin unique comprend la découverte d'itinéraires par la suite un seul meilleur chemin est choisi pour chaque destination.[22]

6.5.1 Le protocole de routage Délai d'une approche tolérante mobile « DDD »

Le canal acoustique impose une consommation d'énergie plus élevée que le signal radio. En raison de la consommation électrique importante des modems acoustiques, l'économie d'énergie pour les réseaux de capteurs sous-marins deviennent encore plus critique que dans les réseaux de capteurs traditionnels. Afin d'augmenter l'efficacité énergétique dans les contraintes de ressources d'environnement sous-marin ; « Magistretti » et « al » (2007) ont proposé le protocole Delay tolerant Data Dolphin (DDD) pour les applications basées sur le délai. Le protocole DDD exploite la mobilité des nœuds capteurs appelés dauphins pour récolter les informations détectées par les nœuds capteurs fixes. Le système proposé permet d'éviter une énergie coûteuse pour une communication multi-saut, et chaque nœud capteur est uniquement nécessaire pour transmettre ses données recueillies directement au dauphin le plus proche quand il atteint son porté de communication.

Dans leur architecture, les nœuds capteurs fixes sont déployés au fond de la mer dans toute la zone d'intérêt. Ces nœuds collectent l'information de l'environnement et les données détectées sont stockés localement après le traitement. Ces capteurs se réveillent périodiquement pour la détection et la génération d'événements. Le modem acoustique est basé sur deux composants.

Chapitre II

Le premier composant est utilisé pour la communication acoustique avec le dauphin proche, et l'autre est l'émetteur-récepteur à faible puissance utilisée pour déterminer la présence de nœuds dauphins (par un signal spécial transmis depuis le dauphin) et pour déclencher le premier composant. Outre, un certain nombre de nœuds dauphins sont utilisés pour collecter les paquets de données quand ils se déplacent dans le porté à un saut de nœuds capteurs dispersés. Les dauphins peuvent se déplacer soit avec mobilité aléatoire ou contrôlée selon l'état du réseau. Un nœud dauphin diffuse des balises pour annoncer leur présence. Les balises sont transmises à de telles fréquences acoustiques, celles qui sont compatibles avec le modem de capteur de faible puissance. La période de publicité t est ajustée en fonction du déploiement et la portée de communication r des nœuds capteurs, et à la vitesse de dauphin v . Enfin, les dauphins transmettent les paquets de données collectés dès qu'ils atteignent une station de base à la surface.

La quantité de nœuds de dauphins est le paramètre le plus important pour l'évaluation de la performance de protocole DDD. Si le nombre de nœuds dauphins ne suffit pas, ils ne seront pas en mesure de recueillir tous les paquets de données à partir des nœuds capteurs. Puisque les dauphins se déplacent aléatoirement, il est possible qu'elles ne puissent visiter des capteurs directement, ce qui se traduit par la perte de paquets de données existant dans la mémoire limitée du nœud de détection lorsqu'il n'y a pas d'espace mémoire disponible. [1,37]

6.6 Routage initié par la source

Un protocole de routage initié par la source définit les chemins de transmission à la demande du nœud source, et à partir du nœud source. Lorsque des données sont disponibles, la source annonce et lance le transfert de données.[22]

6.6.1 Le Protocole de routage basé sur le support d'informations « ICRP »

ICRP (Information Bearer-based Routing Protocol) est un protocole réactif et non géographique. Ce protocole proposé prend en compte à la fois la mobilité de source et de destination. Un mécanisme réactif est utilisé afin qu'aucun paquet explicite RREQ (Route Request) ne soit transmis. Au lieu de cela, le chemin est établi en diffusant des paquets (qui agissent également comme des paquets RREQ). Initialement, les nœuds sources diffusent les paquets et les nœuds intermédiaires retransmettent les paquets reçus. Après avoir reçu le paquet, la destination envoie la réponse le long du chemin enregistré lors de l'envoi du paquet. Par conséquent, une route de la source à la destination est créée sans utiliser de paquet RREQ explicite.

Chapitre II

Pour maintenir un chemin créé dans ICRP, un nœud contient une table de routage dans le chemin. De plus, les chemins créés ont un seuil de temps, TIMEOUT. Lorsque le TIMEOUT d'une route expire, le nœud supprime l'entrée de route correspondante de sa table. Ensuite, le processus de découverte de route est exécuté à nouveau en diffusant des paquets. Dans ce protocole, l'application de la collecte de données est considérée. Les capteurs envoient des paquets sur une base d'intervalle. Pour économiser de l'énergie, les capteurs éteignent leurs émetteurs-récepteurs jusqu'au prochain intervalle.

Bien que le protocole ICRP soit évalué par des simulations et des déploiements dans le monde réel, cette expérience physique se compose de seulement trois capteurs et ne peut pas refléter le trafic dans la plupart des scénarios du monde réel dans RCSF-SM. Il existe des problèmes de performances avec le mécanisme de routage. Tout d'abord, lorsqu'un nœud ne dispose pas d'informations de routage pour une destination spécifiée, il diffuse des paquets. Les diffusions multiples entraînent un gaspillage d'énergie des nœuds, ce qui réduit la durée de vie de l'ensemble du réseau. Deuxièmement, chaque itinéraire a une date d'expiration, qui est très sensible aux taux de livraison. D'une part, s'il est long, alors les nœuds peuvent bouger, et la route créée de la complexité, tandis que s'il est trop court, il ajoute de plus en plus de diffusions. [22,36,37]

6.7 Routage piloté par table

Cette méthode maintient des tables de routage à chaque nœud, ces tables sont mises à jour régulièrement et le processus de routage des informations est basé sur ces données. [22]

6.8 Routage basé sur l'agrégation de données

Le routage basé sur l'agrégation de données consiste à remplacer les lectures individuelles de chaque capteur par une vue collaborative globale sur une zone donnée. [22]

6.8.1 Le Protocole de routage Schéma de clustering sous-marin distribué « DUCS »

DUCS (Distributed Under water Clustering Scheme) est un protocole d'auto-organisation adaptatif dans lequel un algorithme distribué est utilisé pour diviser l'ensemble du réseau en groupes (clusters). Les nœuds capteurs sont organisés en clusters locaux, et dans chaque cluster, un nœud est élu comme chef de cluster « Cluster Head ». Tous les nœuds restants (membres du cluster) transmettent leurs paquets à leurs CH respectifs. Une fois que le CH a reçu les paquets de données de tous les membres du cluster, il exécute des fonctions de traitement du signal telles que l'agrégation des données reçues et les transmet à la station de base via le routage multi-sauts des autres CHs. La figure II.7 résume le principe du protocole DUCS.

Chapitre II

Le protocole fonctionne en deux phases : la première phase est appelée (phase setup) et comprend la formation du cluster et la sélection du chef de cluster et des nœuds membres du cluster. La deuxième phase (phase steady) représente le transfert de données.

Dans la première étape, chaque nœud a la probabilité de devenir une tête de cluster, un nœud calcule son énergie restante et, sur la base de ce calcul, la probabilité qu'un nœud devienne une tête de cluster est déterminée.

La probabilité d'un nœud à devenir un cluster-head réside au sein d'un certain seuil pour que ce nœud s'annonce comme cluster-head. Par conséquent, un nœud non-cluster-head envoie un message « join-request » au chef de cluster le plus proche.

Lors de la réception du message de demande d'adhésion « join-request », le cluster-head enregistre ces voisins et calcule le calendrier de transmission. Cet ordonnancement est basé sur le délai de propagation entre le cluster-head et les membres du cluster.

Dans le protocole proposé, pour gérer la mobilité des nœuds, une phase de maintenance est utilisée. A ce stade, chaque nœud calcule le délai de propagation vers son cluster head en utilisant la technique ToA (Time of Arrival). Si le délai de propagation d'un nœud diffère du délai initial de plus de (50 %), le nœud réestime sa distance à chaque tête de cluster. Tous les chefs de cluster sont pris en compte, de sorte que le chef de cluster le plus proche est à nouveau sélectionné.

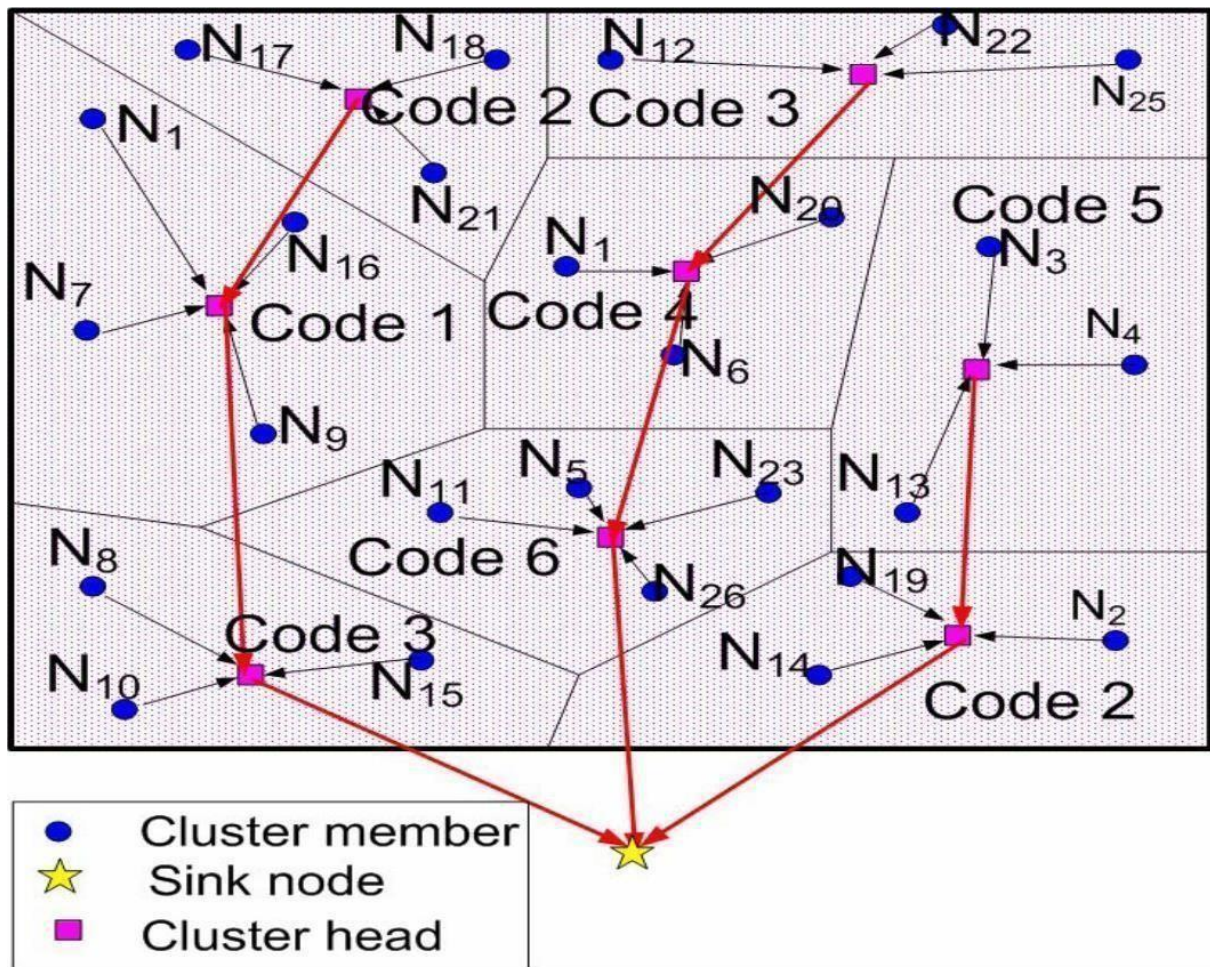


Figure II.8 : Exemple de réseau avec DUCS

Le DUCS, bien que simple et économe en énergie, présente des problèmes de performances. Premièrement, les mouvements de nœud en raison de courants d'eau affectent la structure du cluster, réduisant ainsi la durée de vie du réseau. [22,28]

7. Comparaison entre les protocoles étudiés

Chaque protocole est conçu avec certains objectifs en tête, à savoir réduire la consommation d'énergie, améliorer la latence de communication, assurer la robustesse et l'évolutivité, etc..

Architecture Protocole	taux de livraison	efficacité de Délai	efficacité énergétique	efficacité de la bande passante	fiabilité	Saut par saut/ de bout en bout	Performance
DBR	<i>Haute</i>	<i>Haute</i>	Faible	Moyen	<i>Haute</i>	Saut par saut	<i>Haute</i>
VBF	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Bout en bout	Faible
ICRP	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Bout en bout	Faible
HH-VBF	Moyen	Moyen	Faible	Moyen	<i>Haute</i>	Saut par saut	Moyen
FBR	Moyen	<i>Haute</i>	<i>Haute</i>	Moyen	Moyen	Saut par saut	<i>Haute</i>
DUCS	Moyen	Faible	Moyen	Moyen	Faible	Saut par saut	Moyen
MCCP	Faible	Faible	<i>Haute</i>	Moyen	Moyen	Saut par saut	Moyen
DDD	Faible	Faible	<i>Haute</i>	Moyen	Moyen	Saut unique	Faible

Tableau II.1 : La comparaison des protocoles de routage en fonction de leurs caractéristiques et performances.

8. Conclusion

Ce chapitre présente une vue d'ensemble sur l'état de l'art actuel dans les réseaux de capteurs sous-marins en analysant l'état de la recherche pour le routage dans les milieux aquatiques.

Le routage des capteurs sous-marins est un sujet important qui a attiré l'attention des chercheurs. La conception de tout protocole de routage dépend des objectifs et des besoins de l'application, ainsi que de son adéquation, qui dépend de la disponibilité des ressources du réseau.

La description détaillée du protocole sélectionné est utile pour comprendre l'orientation actuelle de la recherche de la couche de routage des réseaux de capteurs sous-marins. Après avoir présenté les principaux protocoles de routage et les comparaisons disponibles entre eux, il a été conclu que des comparaisons sont nécessaires pour souligner que les protocoles de routage sont souhaitables en fonction de l'utilisation envisagée. Il est impossible de dire qu'une technique de routage particulière est la meilleure pour tous les scénarios, car chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients clairs et convient à des situations spécifiques.

La simulation et l'évaluation des résultats des principaux protocoles est l'objectif du prochain chapitre, afin d'étudier les performances de protocole HH-VBF et les comparer avec VBF

***Chapitre III :Evaluation des performances
duroutages dans les UWSNs***

1 Introduction

Le réseau de capteurs sous-marins sans fil est constitué d'un nombre indéterminé de nœuds déployés pour contrôler et surveiller l'environnement. La consommation d'énergie est un enjeu important dans le processus de conception et d'évaluation Performance globale du système UWSN. Un facteur majeur affectant cette performance est que les capteurs utilisent généralement des piles comme seule source d'alimentation. C'est ici Les principales raisons pour lesquelles les chercheurs dans ce domaine se concentrent sur la conception d'un protocole de routage plus évolutif et économe en énergie.

Notre étude concerne l'évaluation des performances du protocole VBF et les comparer avec HH-VBF selon plusieurs métriques.

Dans ce chapitre, on va décrire les outils de simulation qu'on va utiliser dans notre étude qui sont l'Aqua-Sim et le NS2 et nous présenterons les résultats obtenus suivi par des discussions.

2 Outil de simulation

Nous appelons simulateur un programme qui met en œuvre un modèle de simulation qui assure que la chronologie des événements soit respectée. Ainsi, pour chaque occurrence d'événement, les actions qui sont associées à celui-ci sont exécutées.

2.1 NS-2 (Network Simulator 2)

NS-2, un simulateur de réseau à événements discrets à code source ouvert, spécialement conçu pour effectuer toutes sortes de recherches sur les réseaux, a été développé par l'Université de Californie et l'Université Cornell. NS-2 se compose de deux langages de programmation : C++ et oTCL (Object-Oriented Tool Command Langage). Principales propriétés : NS-2 est parfaitement adapté à la recherche sur les réseaux de type WSN et UWSN. De nouveaux protocoles peuvent être conçus, mis en œuvre et testés en profondeur dans le simulateur. Le site est équipé de l'outil de simulation visuelle NAM (Network Animator) qui permet de visualiser toutes les propriétés de la simulation, comme le lien entre les canaux, le placement et le mouvement des nœuds et le flux de paquets. Tous les résultats peuvent être analysés à l'aide de l'utilitaire XGraph.

application	Web, ftp, Telnet, générateur de trafic (CBR...)
Couche transport	TCP, UDP, RTP, SRM
Couche réseau	routage unicast : Statique, dynamique (vecteur distance) routage multicast: DVMRP, PIM
Couche liaison	CSMA/CD, CSMA/CA, lien point à point, MAC 802.11, LLC
Couche physique	Médium filaire, sans fil et satellite (trafic, topologie de réseau, mobilité, modèle de propagation)
Gestion de files d'attente	RED, DropTail, Token bucket
Discipline de service	CBQ, SFQ, DRR, Fair queueing

Tableau III.1 : principaux protocoles et modèles disponibles sous NS2

2.2 AQUA-Sim

AQUA-Sim est entièrement basé sur NS-2 et est considéré comme le simulateur le plus utilisé par les chercheurs pour simuler divers problèmes d'UWSN. Il est conçu en utilisant une approche orientée objet, et toutes les entités du réseau sont implémentées en tant que classes.

AQUA-Sim est un simulateur très efficace pour simuler efficacement les scénarios d'atténuation des signaux acoustiques et de collision des paquets dans les réseaux UWSN. Et supporte l'architecture 3D-UWSN.

Actuellement, AQUA-Sim supporte des tonnes de protocoles de routage et MAC, pour UWSN, Les protocoles MAC sont ALOHA, broadcast MAC, GOAL, slotted FAMA, UWAN-MAC, COPE-MAC, et R-MAC. Et les protocoles de routage sont VBF, HH-VBF, routage dynamique, routage statique et routage fictif.

Le paquetage AQUA-Sim est composé de quatre dossiers : UW-COMMON-scripts des nœuds et du trafic UWSN ; UW-ROUTING-protocoles de routage, UW-MAC-MAC protocoles et canaux acoustiques ; et UW-TCL-oTCL scripts pour la validation d'AQUASim.

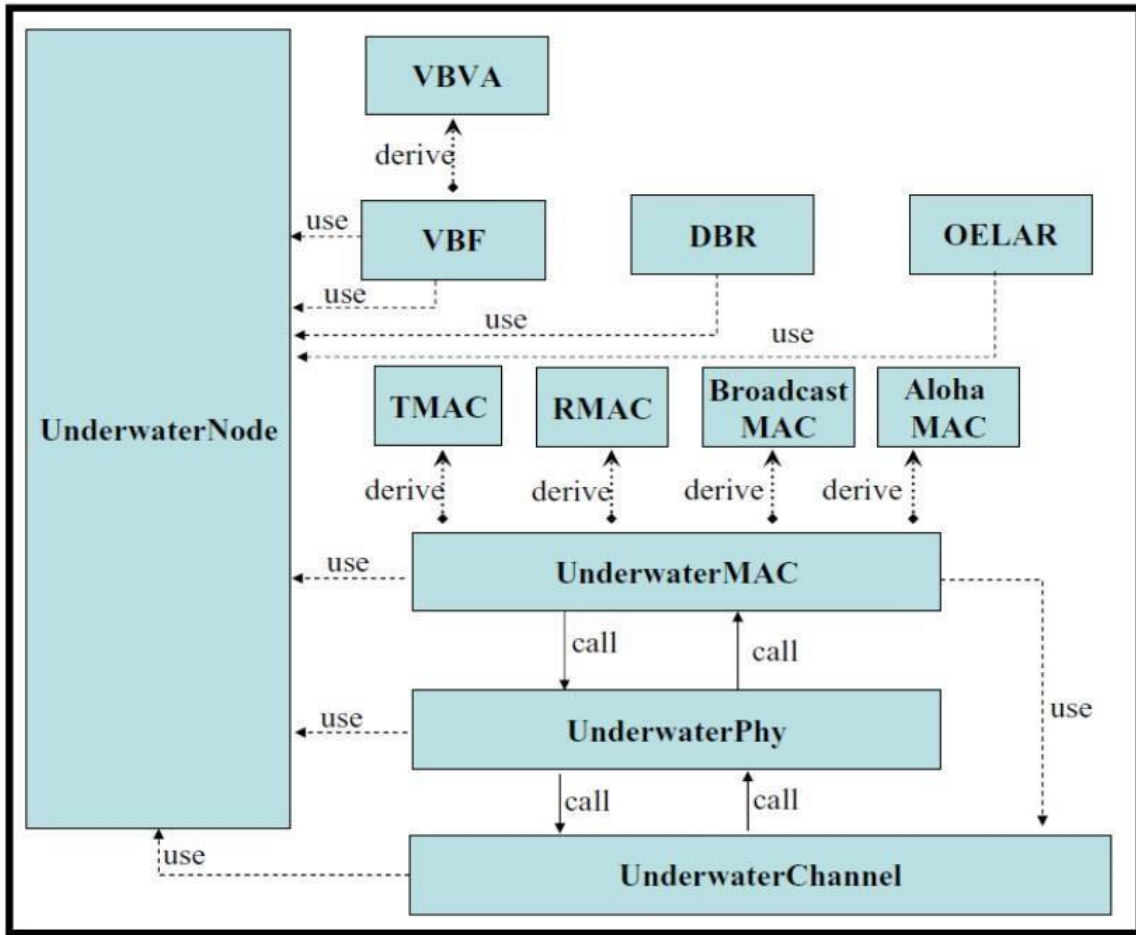


Figure III.1 : diagramme de classe d'Aqua-Sim

La figure III.1 représente diagramme de classe d'Aqua-Sim. Sur cette figure, l'objet " Under water Node" est une abstraction d'un nœud de capteur sous-marin. Ça résume beaucoup Informations utiles sur le nœud, telles que sa position et sa vitesse de déplacement. C'est un objet Global et accessible par n'importe quel objet dans Aqua-Sim. Objet " Under water Channel" signifie canal acoustique sous-marin. Il existe un objet " Under water Channel" dans le réseau où tous les paquets sont mis en file d'attente avant d'être envoyés. L'objet Canal sous-marin fournit également une interface commune pour les calques Les objets de niveau supérieur, tels que les objets de la couche de routage, peuvent Comprendre facilement les propriétés du canal.

3 Choix du simulateur NS2

NS2 est un simulateur gratuit disponible sur Internet qui fonctionne sous Unix et sous Windows. NS2 nous permet de simuler différents types de réseaux sans fil. Il permet de simuler la couche MAC 802.11 et plusieurs autres extensions. Contrairement aux autres. Dans le simulateur, NS2 implémente plusieurs protocoles de routage.

Pour notre application, nous avons choisi d'utiliser NS2 comme émulateur pour des raisons de disponibilité de l'émulateur. De plus, nous avons choisi NS2 car il contient des bibliothèques pour générer différentes fonctions (topologie, trafic, routage, MAC, LLC, etc.) et des outils graphiques (Network Animator NAM) pour une interprétation facile (Xgraph) et une visualisation des résultats.

4 Objectifs de la simulation

Le but ultime de ce mémoire est d'étudier certaines propriétés des protocoles de routage conçu pour les réseaux de capteurs sous-marins. Notre travail comprend deux parties :

- La première partie : est une comparaison entre les performances des protocoles de routage « VBF » et « HH-VBF », la simulation est faite en variant le rayon (pipeline) en fonction de nombre de nœuds (fixé sur 100 nœuds). Les métriques utilisées pour évaluer cette simulation sont :
 - Le délai moyen de bout en bout
 - La consommation d'énergie
 - Le taux de livraison de paquets
 - L'efficacité énergétique
- La deuxième partie : Nous avons utilisé les mêmes métriques précédentes et la simulation est faite en fonction de densité du nœud et de rayon (fixée sur 100 mètres) avec les mêmes paramètres de simulation.

5 Métriques d'évaluation

- **Le délai moyen de bout en bout (AE2ED)** : représente le temps moyen nécessaire pour quels paquets de données atteignent la destination (sink) :

$$AE2ED = \frac{\sum Rtime(i) - \sum Ttime(i)}{\sum ReceivedPackets}$$

Chapitre III

- **La consommation d'énergie (EC)** : illustre la différence totale entre l'énergie initiale E_0 et l'énergie résiduelle E_r des nœuds de capteurs :

$$EC = \sum(E_0 - E_r)$$

- **Le taux de livraison de paquets (PDR)** : est une métrique qui donne le rapport entre le nombre de paquets de données livrés au nœud récepteur et le nombre de paquets de données envoyés par la source :

$$PDR = \frac{\sum \text{ReceivedPackets}}{\sum \text{SendingPackets}} \times 100$$

- **L'efficacité énergétique (EE)** : qui est la livraison réussie des données au nœud puits avec la quantité d'énergie consommée dans le réseau [Ketshabetswe et al., 2019]:

$$EE = \frac{\text{successrate} \times \text{total packetsenttothesink}}{\text{totalenergyconsumed}}$$

6 Méthodologie expérimentale

Simulation	
Machine	Asus I5
Système d'exploitation	Ubuntu (64 -bits)
simulateur	Aqua-sim

Tableau III.2 : environnement de la simulation

7 Création du modèle de simulation

Paramètres du contexte de la simulation	
Nombre des nœuds	100,200,300,400,500
Temps de simulation	200s
Energie Initiale	10000j
Topologie du réseau	1000 x1000x1000

Les coordonnées de la source	1000x50x0
Les coordonnées du sink	200x1000x500
La portée de transmission	100m
Rayon de la pipe	100,150,200,250

Tableau III.3: Paramètres du contexte de simulation

8 L'influence de pipeline :

Le résultat suivant représente les graphes de simulation, nous avons simulé avec un nombre fixé des nœuds (égale 100 nœuds), et nous avons varié la taille du pipeline à 100,150,200,250m afin de clarifier l'impact de la taille du pipeline. Les résultats sont discutés selon les trois métriques respectives : taux de livraison des paquets, l'énergie consommée, le délai moyen de bout en bout et l'efficacité d'énergie. Les résultats des tableaux sont obtenus par une moyenne de cinq essais par chaque rayon du pipeline.

8.1 Etude de taux de livraison des paquets

Le tableau suivant représente le taux de livraison des paquets en fonction du rayon du pipeline et des nœuds dans le réseau (fixée sur 100 nœuds) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison de taux de livraison des paquets				
Rayon	100	150	200	250
VBF	84,0201005	92,8643216	93,7688442	95,1758794
HH-VBF	79,2964824	84,7236181	86,1306533	93,7688442

Tableau III.4 : le taux de livraison de paquets de VBF et HH-VBF en fonction du rayon du pipeline

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente le taux de livraison des paquets en fonction du rayon du pipeline :

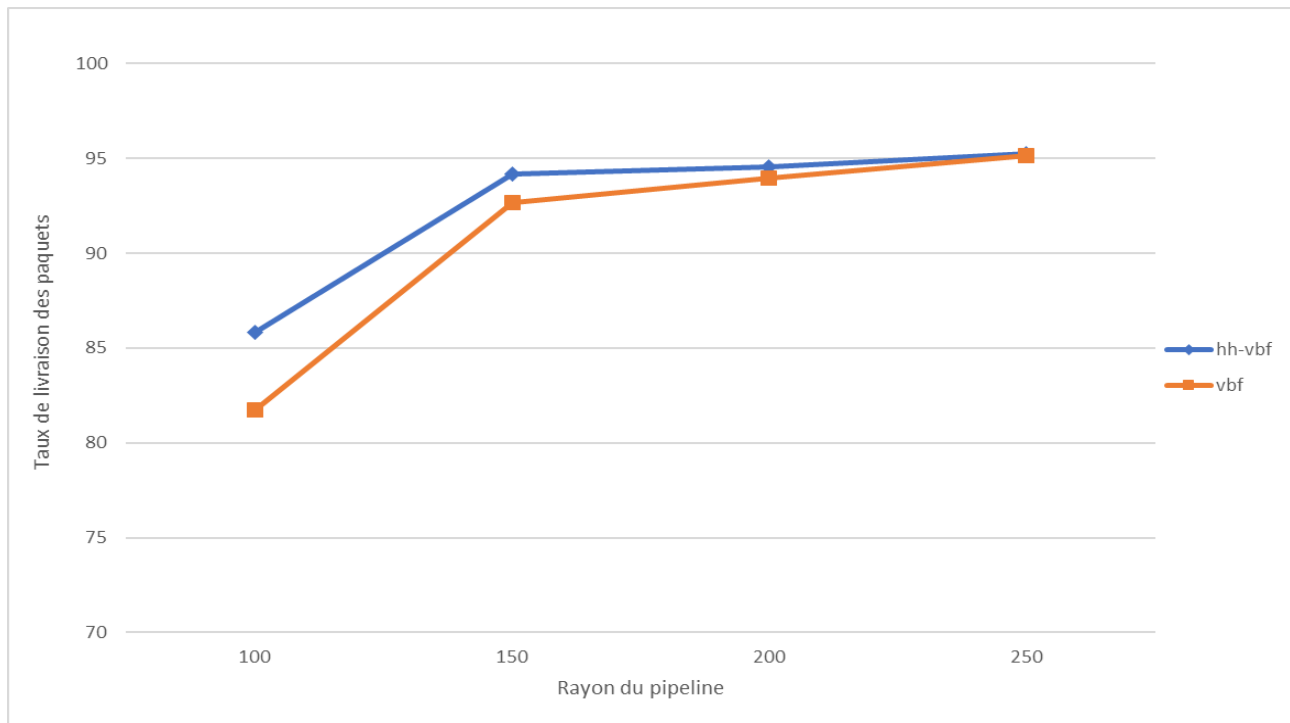


Figure III.2 : Taux de livraison des paquets vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100

➤ Interprétation :

La figure III.2 montre les résultats de l'étude comparative entre VBF et HH-VBF en termes de taux de livraison de paquets. Et comme nous pouvons l'observer sur la figure III.2, plus le rayon du pipeline est grand, plus le PDR augmente, et cela est dû au fait que plus le rayon est grand, plus il y a de nœuds dans le pipeline qui transmettront les paquets de données. Le PDR de VBF est inférieur à HH-VBF, cela est dû au fait que plus le rayon est grand, HH-VBF découvre plus de nœuds intermédiaires en comparaison avec le protocole VBF. C'est grâce à la méthode spécifique de la méthode du Protocole HH-VBF qui crée à chaque nœud intermédiaire un nouveau pipeline, contrairement à VBF qui crée un seul pipeline à partir du début de transmission jusqu'à la fin.

8.2 Etude de l'énergie consommée

Le tableau suivant représente l'énergie consommée en fonction du rayon du pipeline et des nœuds dans le réseau (fixée sur 100 nœuds) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison de l'énergie consommée				
Rayon	100	150	200	250
VBF	1821,43892	2589,90985	3084,10584	3856,67888
HH-VBF	1326,82096	1848,54882	2263,52265	2337,07312

Tableau III.5: l'énergie consommée de VBF et HH-VBF en fonction du rayon du pipeline.

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente l'énergie consommée en fonction du rayon du pipeline :

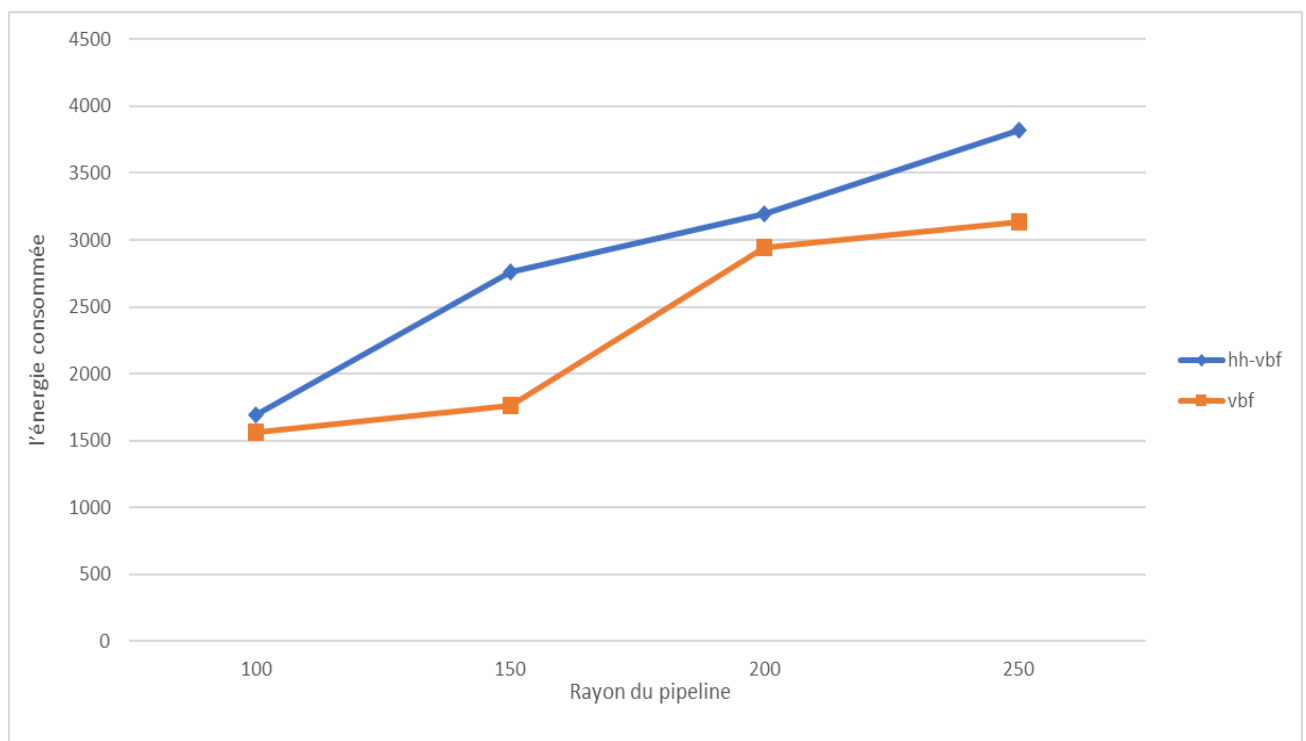


Figure III.3 : L'énergie Consommée vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100

➤ Interprétation :

Le figure III.3 présentent les résultats de l'étude comparative entre VBF et HH-VBF en termes de consommation d'énergie. Comme nous pouvons le voir dans la figure III.3, l'énergie consommée pour le HH-VBF à des rayons variée et plus élevée par rapport au protocole VBF et augmente rapidement et ceci est dû que le protocole HH-VBF crée à chaque nœud transitaires un nouveau pipeline qui découvre plus des nœuds et donc consomme plus d'Energie. L'énergie consommée pour le HH-VBF est légèrement augmenté au scénario 100,200, ceci est dû aux additifs qui envoient des paquets à la phase de redécouverte pour trouver et sélectionner un autre nœud disponible qui peut être élu comme expéditeur dans le cas où le nœud concerné par l'interruption est le seul à la portée de l'expéditeur.

8.3 Etude du délai moyen de bout en bout (AE2ED) :

Le tableau suivant représente délai moyen bout en bout en fonction du rayon du pipeline et des nœuds dans le réseau (fixée sur 100 nœuds) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison du délai moyen bout en bout				
Rayon	100	150	200	250
VBF	2,62180474	2,63135958	2,59046537	2,6966135
HH-VBF	2,79552998	2,80473634	2,65346097	2,51194681

Tableau III.6 : le délai moyen bout en bout de VBF et HH-VBF en fonction de rayon du pipeline

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente délai moyen bout en bout en fonction du rayon du pipeline :

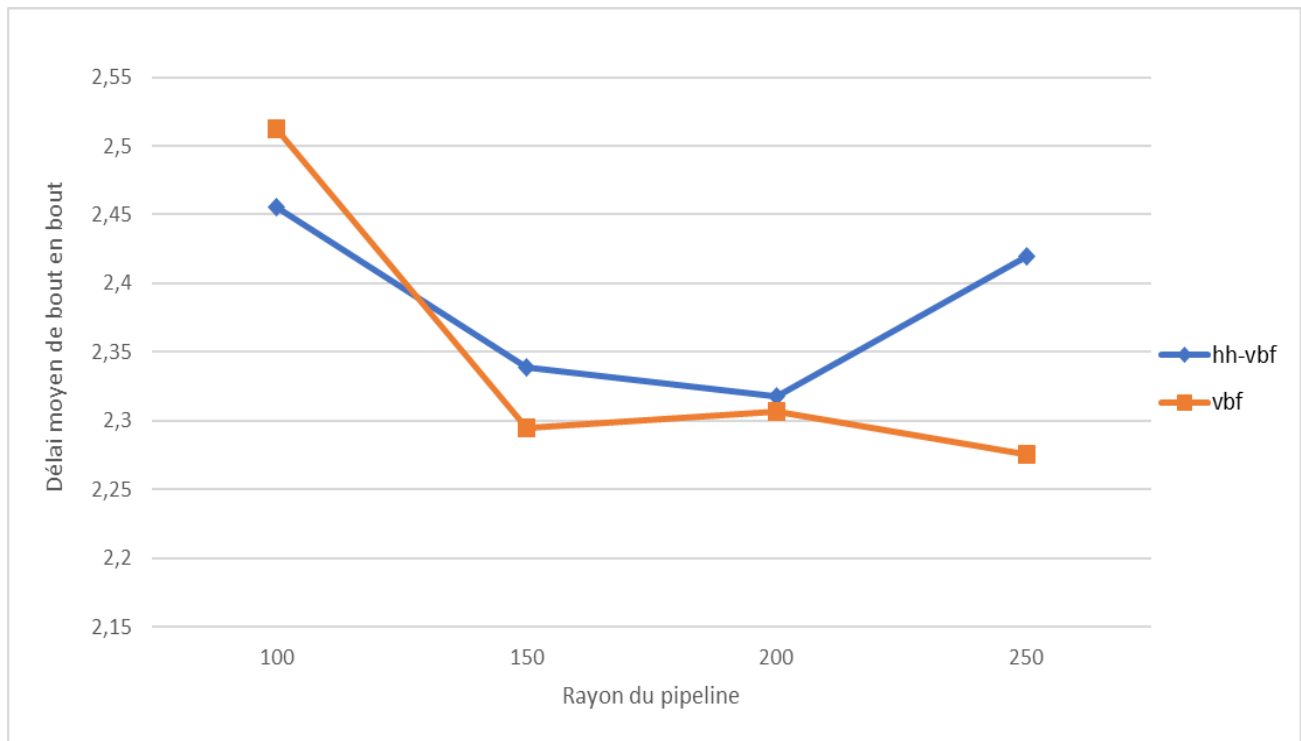


Figure III.4 : Délai moyen de bout en bout vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100

➤ Interprétation :

La figure III.4 indique les résultats de l'étude comparative entre VBF et HH-VBF en termes de délai moyen de bout en bout. D'après la figure III.4, le scénario pour les deux schémas VBF et HH-VBF à un rayon du pipeline varié, montre une réduction du délai de bout en bout lorsque le rayon s'agrandit, ce qui s'explique par le fait que le VBF donne la priorité au nœud le plus souhaitable avec une valeur de facteur de désirabilité moindre (proche du vecteur) pour transmettre le paquet de données, et un temps d'attente moindre, ce qui peut réduire l'AE2ED. Lorsque le rayon du pipeline est augmenté, il peut y avoir plus de nœuds à l'intérieur du pipeline, ce qui signifie qu'il y a plus d'un chemin possible, d'où la diminution du temps de retard. De plus, d'après les résultats représentés dans la figure, la quantité d'AE2ED augmente à un certain scénario, car lorsque le rayon devient plus grand, la distance entre les nœuds et le vecteur peut être importante, ce qui peut générer un facteur de désirabilité plus élevé, qui donne un long temps d'attente. Nous pouvons conclure qu'un rayon moyen avec le protocole VBF donne un bon résultat pour AE2ED.

8.4 Etude de l'efficacité énergétique

Le tableau suivant représente l'efficacité d'énergie en fonction du rayon du pipeline et des nœuds dans le réseau (fixée sur 100 nœuds) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison du l'efficacité d'énergie				
Rayon	100	150	200	250
VBF	10,34286477	10,59289814	6,418041238	6,126497854
HH-VBF	10,18816413	6,788706281	5,968438568	5,091975771

Tableau III.7 : l'efficacité d'énergie de VBF et HH-VBF en fonction de rayon du pipeline

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente l'efficacité d'énergie en fonction du rayon du pipeline :

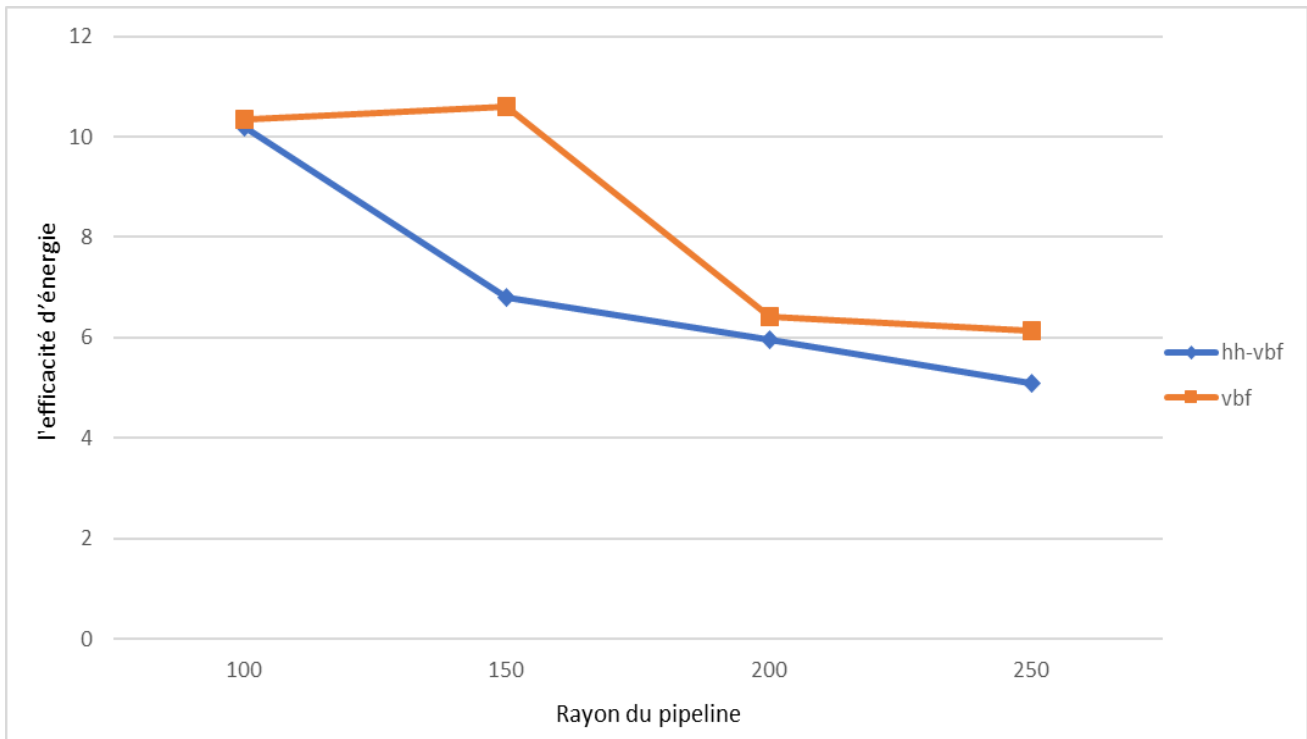


Figure III.5 : l'efficacité d'énergie vs le rayon du pipeline en VBF et HH-VBF NN= 100

➤ Interprétation :

La métrique de l'efficacité d'énergie est affectée par les données livrées avec succès et l'énergie consommée, où la métrique apporte de bons résultats lorsque le taux de réussite est supérieur à l'énergie consommée, où le PDR est grand comme l'EC la métrique est affectée, de plus un faible taux de réussite avec une grande énergie consommée apporte une faible efficacité d'énergie. Comme le montre le figure III.5, l'efficacité énergétique est présentée en fonction du rayon du pipeline varié. Le VBF et le HH-VBF sont approximativement dans la plupart des scénarios, le HH-VBF a consommé un peu plus d'énergie parce que le protocole

adopte un mécanisme pour créer à chaque nœud transitaire un nouveau pipeline qui découvre plus des nœuds et plus des chemins. Dans scénarios 150m, malgré le pipeline est moyen, mais il peut contenir des régions vides, car les nœuds de capteurs se déplacent fréquemment à l'extérieur et à l'intérieur du pipeline à cause de la mobilité des nœuds, ce qui peut entraîner un faible taux de réussite avec une consommation d'énergie moyenne, ce qui affecte l'efficacité énergétique. D'autre part, un gros paquet de données livré peut ne pas impliquer beaucoup de capteurs, puisque les nœuds présents dans le pipeline qui transmettent les paquets sont peu nombreux, ce qui peut générer un bon débit de données avec une faible consommation d'énergie, améliorant ainsi l'efficacité d'énergie.

9 L'influence de la densité des nœuds

Le résultat suivant représente les graphes de simulation, nous avons simulé avec un rayon du pipeline fixé (égale 100 mètre), et nous avons varié le nombre de nœuds à 100,200,300,400,500 nœuds afin de clarifier l'impact de la densité sur le réseau. Les résultats sont discutés selon les trois métriques respectives : taux de livraison des paquets, l'énergie consommée, le délai moyen de bout en bout et l'efficacité d'énergie. Les résultats du tableau sont obtenus par une moyenne de cinq essais par chaque nombre de nœuds.

9.1 Etude de taux de livraison des paquets

Le tableau suivant représente taux de livraison des paquets en fonction du nombre des nœuds et de rayon du pipeline (fixée sur 100 mètre) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison Taux de livraison des paquets					
Nœuds	100	200	300	400	500
VBF	84,020100	84,824120	90,653266	90,351758	90,5527638
HH-VBF	79,296482	88,743718	91,256281	92,763819	94,0703518

Tableau III.8 : Taux de livraison des paquets de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente le taux de livraison des paquets en fonction du nombre des nœuds :

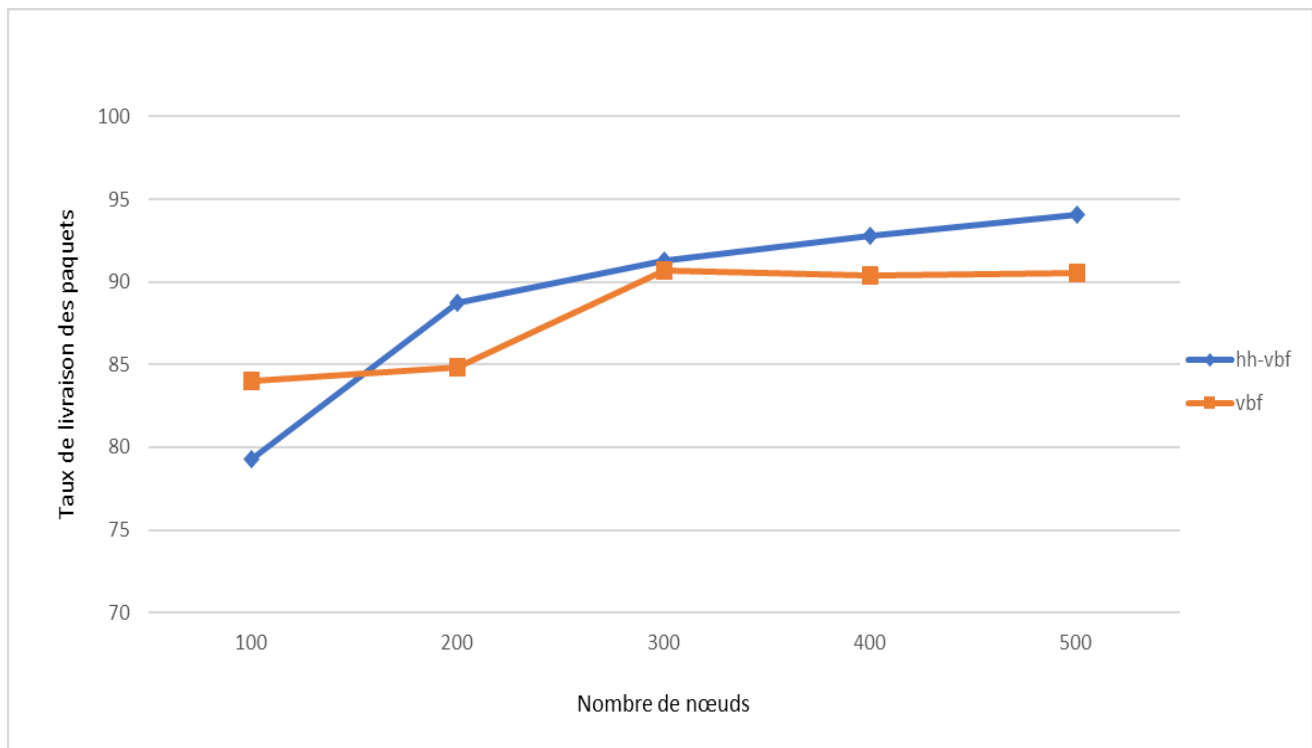


Figure III.6 : Le taux de livraison des paquets vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF $W=100$

➤ Interprétation :

la figure III.6 montre les résultats de l'étude de comparaison entre VBF et HH-VBF en termes de taux de livraison des paquets, et comme nous pouvons l'observer à partir de cet figure, Le scénario de 100 nœuds du schéma HH-VBF dans un rayon $W = 100$ m montre un taux de livraison des paquets inférieur par rapport à VBF qui s'explique par le pipeline crée contient des trous noir ou ne contient pas assez des nœuds ou la distance entre expéditeur et récepteur est grande donc se produit une perte des paquets . Et pour les autres scénarios, plus la densité du réseau est grande, plus le PDR augmente, et cela est dû au fait que plus la densité est élevée, plus il y a des nœuds dans le pipeline qui transmettront des paquets de données, le schéma HH-VBF est supérieure à VBF Cela est dû au fait que le premier crée des nouveaux pipelines à chaque nœud transitaire et donc découvre plus des nœuds, et c'est la présence d'un nombre suffisant de nœuds pour la transmission.

9.2 Etude de l'énergie consommée :

Le tableau suivant représente l'énergie consommée en fonction du nombre des nœuds et de rayon du pipeline (fixée sur 100 mètre) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison L'énergie consommée					
Nœuds	100	200	300	400	500
VBF	1821,4389	4295,1823	7865,4585	11089,343	16599,610
HH-VBF	1326,8209	3047,5746	4887,1027	7678,8107	11304,565

Tableau III.9 : L'énergie consommée de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente l'énergie consommée en fonction du nombre des nœuds :

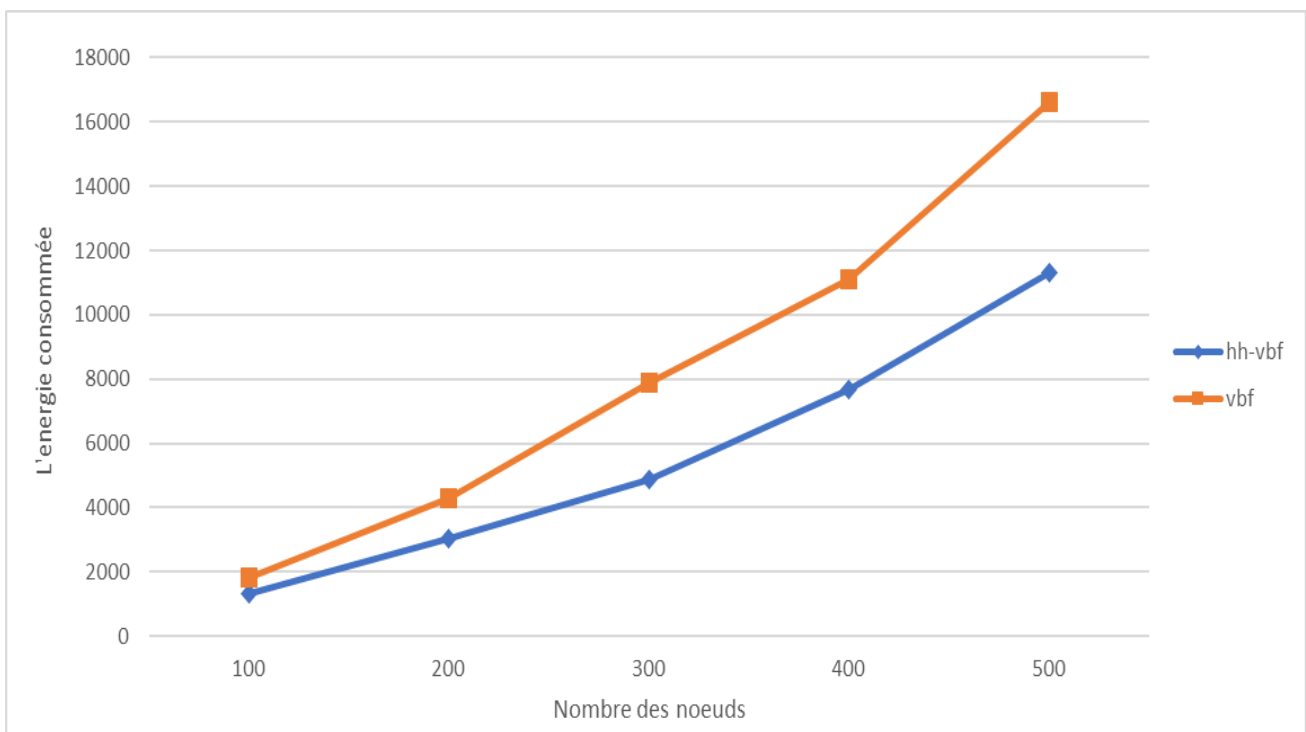


Figure III.7 : l'énergie consommée vs le nombre de nœuds en VBF et HH-VBF $W=100$

➤ **Interprétation :**

La figure III.7 représente la consommation d'énergie totale en nombre de capteurs nœuds varié. La consommation d'énergie augmente avec l'augmentation de nombre de nœuds puisque plus de nœuds sont impliqués dans le transfert de paquets. Sur d'autre part, ce schéma montre que la consommation d'énergie HH-VBF est inférieure à celui des protocoles de routage VBF à cause de le pipeline de VBF contient beaucoup de nœuds et donc produit duplication de paquets et des collision qui augmente la consommation d'énergie, et pour HH-VBF, les pipeline qui crée à chaque nœud transitaire ne contient pas un grand nombre des nœuds et donc moins de duplication des paquet et moins de collision, indiquant que le HH-VBF peut économiser plus d'énergie avec une densité de nœud élevée .

9.3 Etude du délai moyen de bout en bout :

Le tableau suivant représente Le délai moyen de bout en bout en fonction du nombre des nœuds et de rayon du pipeline (fixée sur 100 mètre) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison Délai moyen de bout en bout					
Nœuds	100	200	300	400	500
VBF	2,6218047	2,7492094	2,6725549	2,6636168	2,6640765
HH-VBF	2,7955299	2,6349506	2,5594837	2,5975138	2,4890654

Tableau III.10: Le Délai moyen de bout en bout de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente délai moyen de bout en bout en fonction du nombre des nœuds :

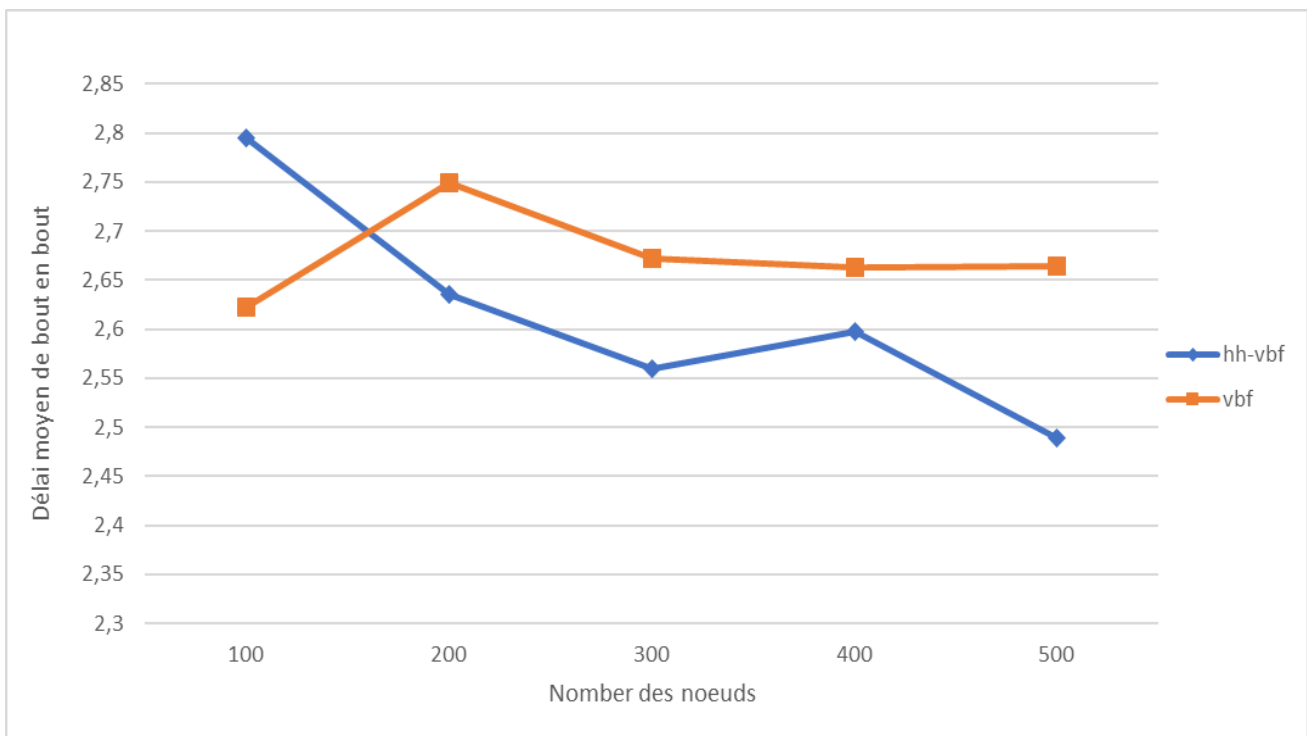


Figure III.8: Le Délai moyen bout en bout vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100

➤ Interprétation :

La figure III.8 indique les résultats de l'étude comparative entre VBF et HH-VBF en termes de délai moyen de bout en bout. D'après la figure III.8, le scénario de 100 nœuds du schéma VBF dans un rayon $W = 100$ m montre un délai moyen de bout en bout inférieur par rapport à HH-

VBF qui s'explique par un taux de livraison accru, en raison du grand nombre des nœuds dans le pipeline et crée des chemins efficaces, ce qui explique l'augmentation de la consommation d'énergie par VBF et les autres scénarios. Le schéma de HH-VBF montre un délai moyen de bout en bout inférieur par rapport VBF qui s'explique par un taux de livraison accru, en raison de la densité des nœuds dans le réseau et le mécanisme de HH-VBF qui découvre plus des nœuds et Parfois évite les trous noirs.

9.4 Etude l'Efficacité énergétique

Le tableau suivant représente L'efficacité d'Energie en fonction du nombre des nœuds et de rayon du pipeline (fixée sur 100 mètre) dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe comparative entre les deux protocoles :

Comparaison d'efficacité d'Energie					
Nœuds	100	200	300	400	500
VBF	9,28021602	3,95247523	2,32396507	1,63067118	1,10332535
HH-VBF	12,01368497	5,80826446	3,74747689	2,48894265	1,68189154

Tableau III.11 : L' efficacité d'Energie de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds

D'après les résultats du tableau, nous avons tracé la courbe suivante qui représente l'efficacité d'Energie en fonction du nombre des nœuds :

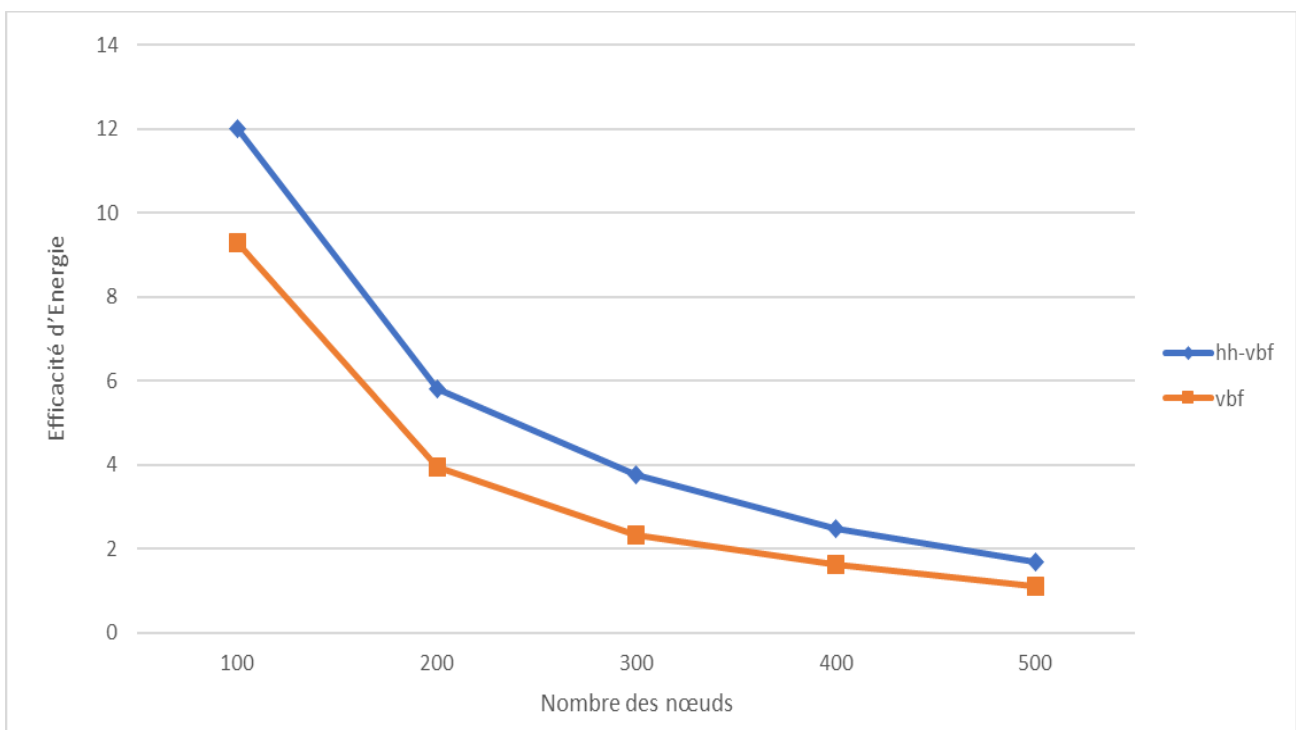


Figure III.9:L' e fficacité d'énergie vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF W=100

➤ Interprétation :

La métrique de l'efficacité énergétique est affectée par les données livrées avec succès et l'énergie consommée, où la métrique apporte de bons résultats lorsque le taux de réussite est supérieur à l'énergie consommée, où le PDR est grand comme l'EC, la métrique est affectée, de plus un faible taux de réussite avec une grande énergie consommée apporte une faible efficacité d'énergie. Comme le montrent les figures III.9, l'efficacité d'énergie est présentée en fonction du nombre de nœuds. Le HH-VBF a une efficacité énergétique plus élevée en comparaison avec VBF parce que HH-VBF crée à chaque nœud transitaire un nouveau pipeline donc utilise des chemins plus courts ou des nœuds proches à la destination. Dans certains scénarios, malgré la densité du réseau, le pipeline peut contenir des zones vides, car les nœuds de capteurs se déplacent fréquemment à l'extérieur et à l'intérieur du pipeline, ce qui peut entraîner un faible taux de réussite avec une consommation d'énergie moyenne, d'où un impact sur l'efficacité énergétique. D'autre part, un gros paquet de données livré peut ne pas impliquer beaucoup de capteurs, puisque les nœuds présents dans le pipeline qui transmettent les paquets sont peu nombreux, ce qui peut générer un bon débit de données avec une faible consommation d'énergie, améliorant ainsi l'efficacité d'énergie.

10 Conclusion

Dans ce chapitre, une comparaison est faite entre deux protocoles de routage dédiés au milieu marin qui sont VBF et HH-VBF. Nous avons travaillé avec l'environnement de simulation Aqua-Sim qui est basé sur le simulateur NS2. Dans notre étude, nous avons focalisé sur quatre métriques, taux de livraison des paquets, l'énergie consommée, délai moyen de bout en bout et l'efficacité d'énergie.

Les simulations réalisées au moyen du simulateur NS2, nous ont permis d'apprendre à utiliser ce simulateur et de voir sa complexité et son efficacité mais aussi elles ont mené à étudier le protocole de routage utilisé dans les réseaux de capteurs sous-marin.

Dans la première partie de la simulation, nous observons clairement l'optimalité et l'efficacité du protocole VBF en termes d'énergie consommée, délai moyen de bout en bout et l'efficacité d'énergie.

Dans la deuxième partie de la simulation, nous avons constaté clairement l'optimalité et l'efficacité du protocole HH-VBF en termes de quatre métriques précédentes.

La terre est recouverte d'eau dans la majeure partie de la région. Plus de 70 % de la superficie est recouverte d'eau. Le réseau de capteurs sous-marins (UWSN) a joué un rôle important en raison de son utilisation dans de larges applications. Ces applications sont très importantes pour la vie sous-marine ainsi que pour la vie humaine.

L'étude UWSN donne des explications sur la vie des créatures sous-marines, les catastrophes sous-marines, l'écosystème sous-marin et les alertes aux tsunamis. La plupart des applications d'UWSN nécessitent une communication en temps réel .

Les nœuds de capteurs sous-marins ont une énergie et une puissance très limitées. De plus, recharger les nœuds dans l'environnement sous-marin est presque impossible en raison de coût de recharge que de les remplacer. Pour ces raisons, le choix d'un tel protocole de routage par rapport à un autre doit prendre en considération ces exigences.

Nous avons proposé dans ce mémoire une étude sur les protocoles de routage dans l'environnement UWSN , Nous avons commencé par présenter les capteurs sous-marins , ses principes de fonctionnement est ses caractéristiques, puis nous avons décrit les différents protocoles de routage dans ce type des réseaux en focalisant sur les deux grands protocoles VBF et HH-VBF.

Notre partie de simulation a discuté les performances de ces protocoles selon plusieurs métriques et nous avons constaté que le protocole VBF a montré une optimalité et efficacité en termes d'énergie consommée, délai de transmission et l'efficacité énergétique tandis que le protocole HH-VBF en terme des quatre métriques étudiées.

Comme perspectives nous envisageons :

- Etudier la partie sécurité dans le protocole VBF.
- Concevoir un protocole plus efficace à base de VBF afin d'améliorer le paramètre de consommation d'énergie qui est très important dans ce type des réseaux.
- Etudier l'influence de la vitesse sur la performance de différent protocole.
- Etudier l'influence de changement de position de source et de sink.
- Prendre en compte d'autres métriques comme l'étude de transfert fiable des données, le taux de perte...

- [1] E.M. Sozer, M. Stojanovic, J.G. Proakis, Underwater acoustic networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1) (2000) 72–83.
- [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “A survey on sensor networks”. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102–114, 2002.
- [3] I. Akyildiz, T. Melodia, K. Chowdhury, “A survey on wireless multimedia sensor networks”, *Computer Networks*, Vol. 51, No.4, pp. 921–960, 2007.
- [4] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, “wireless sensor network survey”, *Computer Networks*, Vol.52, No.12, pp.2292-2330, 2008. Applications environnementales / Le domaine militaire/ Le domaine médical/ Le domaine agricole
- [5] Mekki Nabil, Mohamedi Kada, «technique de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil», projet de fin d'étude, master : informatique, université de Saida ,juin 2018. Uwsn militaire
- [6] Zerouali Nassima, «Le routage Dans Les Réseaux De Capteurs Sans Fil Sous-Marins», projet de fin d'étude, Master : télécommunications, université de Tlemcen, 26/05/2016.
- [7] Benabdallah Souad, Hammad kelthoum, «Routage Dans Les Réseaux De Capteur Sous Marin», Projet de Fin d'Etudes, Master : Télécommunications, université de Tlemcen , 2012-2013.
- [8] Jaydip M. Kavar, Dr.K.H Wandra, «Survey Paper on Underwater Wireless Sensor Network», *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, (An ISO 3297: 2007 Certified Organization), Vol. 3, Issue 2, February 2014.
- [9] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia, «Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges »; *Broadband And Wireless Networking Laboratory, School Of Electrical And Computer Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, GA 30332, USA*, pp. 257–279, 21 January 2005.
- [10] G. Garratt, I. of Electrical Engineers et S. M. G. Britain). *The Early History of Radio : From Faraday to Marconi. History and Management of Technology. Institution of Engineering et Technology*, 1994.

- [11] K. P. Hunt, J. J. Niemeier et A. Kruger. « RF communications in underwater wireless sensor networks ». In : 2010 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. 2010, p. 1-6.
- [12] M.Tivey, P.Fucile, and E.Sichel, “A Low Power, Low Cost, Underwater Optical Communication System”, Ridge 2000 Events, 2004.
- [13]A. Bouzoualegh, T. Val, E. Campo et F. Peyrard. “ Etude Des Caractéristiques Requises Pour Les réseaux Aquatiques Sans Fil ”, CNRIUT'03-Colloque National de la Recherche IUT 2003-, Tarbes,France, pp. 319- 326, Mai 2003.
- [14] E. Sozer, M. Stojanovic et J.G. Proakis. “Design and Simulation of an Underwater Acoustic Local Area Network”, Communication and Digital Signal Processing Center, Northeastern University. , Washington, DC, August 1999
- [15]M. Stojanovic. “Recent advances in high rate underwater acoustic communication”, IEEE J.Ocean Eng, pp125-136,April 1996.
- [16]L. Brekhovskikh, Y. Lysanov. “Fundamentals of Oceans Acoustics”, Springer, New York, 2001.
- [17] J.-H. Cui, J. Kong, M. Gerla, And S. Zhou, «The Challenges Of Building Mobile Underwater Wireless Networks For Aquatic Applications», IEEE Network, Vol. 20, No. 3, Pp. 12–18, 2006.
- [18] <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2015/896832> visité le 5 avril 2022
- [19] HADJILA Mourad ; « Protocoles De Routage Economes En Energie Pour Les Réseaux De Capteurs
- [20] <https://www.cambridge.org/core/books/abs/principles-of-wireless-sensor-networks/underwater-sensor-networks/923B444516883BC0945A0B7A6C5D58C3> visité le 12/03/2022

- [21] Mrunal Khedkar, Dr. G.M. Asutkar, "Energy Optimisation in Wireless Sensor Network for Video Data Transmission", 2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)
- [22] SOUIKI Sihem, « PROTOCOLES DE ROUTAGE PERFORMANTS DEDIES AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL SOUS L'EAU », THESE Présentée A L'UNIVERSITE DE TLEMCEN FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT Spécialité Systèmes et Réseaux de Télécommunications, 2015.
- [23] Mr. SELATNA Abbes, « Implémentation D'une Application Orientée Surveillance Pour Les Réseaux De Capteurs », Mémoire De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme De Master En Informatique, 2011-2012.
- [24] Waheeduddin Hyder, Javier Poncela, Miguel-Angel Luque and Pablo Otero ; Article Self-Organized Fast Routing Protocol for Radial Underwater Networks ; Department of Ingeniería de Comunicaciones, University of Malaga, 29010 Malaga, Spain; Published: 28 November 2018 ; sensors 2018.
- [25] Khandaker Foysal Haque ,K. Habibul Kabir and Ahmed Abdelgawad ; Article Advancement of Routing Protocols and Applications of Underwater Wireless Sensor Network (UWSN)—A Survey ; College of Science and Engineering, Central Michigan University, Mount Pleasant, MI 48859, USA; Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic University of Technology, Gazipur 1704; Published: 5 April 2020; Journal of Sensor and Actuator Networks 2020.
- [26] Hai Yan, Zhijie Jerry Shi, and Jun-Hong Cui ; DBR : depth-based Routing for Underwater Sensor Networks ; Department of Computer Science and Engineering University of Connecticut, Storrs, CT 06269-2155; NETWORKING 2008.
- [27] Kamel Beydoun ; « Conception D'un Protocole De Routage Hiérarchique Pour Les Réseaux De Capteurs » ; Thèse ; Présentée A L'u.F. R Des Sciences Et Techniques De L'université De Franche-Comté ; 2009.
- [28] BOUBOSSELA MAJDA - CHAIB FATIHA, « ETUDE ET SIMULATION DE DIFFERENTES TECHNIQUES DE CLUSTERING DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL SOUS-MARINS », Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER en SCIENCE ET TECHNOLOGIE TELECOMMUNICATION Réseau et
Télécommunication, 2019/2020.

[29] [Le routage dans les réseaux de capteurs sous-marins – Projet de fin d'études \(rapport-gratuit.com\)](#) 20 février 2022 ; 15 :42 :52.

[30] Elis Kulla; Performance evaluation of Focused Beam Routing for IoT applications in underwater environment; Graduate School of Engineering, Okayama University of Science, 1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

[31] Josep Miquel Jornet, Milica Stojanovic, Michele Zorzi ; Focused Beam Routing Protocol for Underwater Acoustic Networks ; Massachusetts Institute of Technology, University of Padova, Italy, WUWNet'08, September 15, 2008, San Francisco, CA.

[32] Peng Xie, Jun-Hong Cui, and Li Lao ; VBF : Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks ; Computer Science & Engineering Dept., University of Connecticut, CT 06029 2Computer Science Dept., University of California, Los Angeles, CA 90095.

[33] Peng Xie,¹ Zhong Zhou,² Nicolas Nicolaou,² Andrew See,² Jun-Hong Cui,² and Zhijie Shi ; Research Article Efficient Vector-Based Forwarding for Underwater Sensor Networks ; 1 Intelligent Automation, Inc., Rockville, MD 20855, USA ; 2Computer Science & Engineering Department, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA ; Hindawi Publishing Corporation, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2010, Article ID 195910, 13 pages doi:10.1155/2010/195910

[34] **Ms. Manel Baba Ahmed** ; A Cross Layer Protocol for a Non-Synchronous Localization Scheme in Large-scale UWSNs (Underwater Wireless Sensor Network); Thesis Submitted For The Award Of The Degree Of Doctor Of Philosophy In Computer Science Option : Technology of Wireless Network ; Djillali Liabes University of Sidi Bel Abbes Exact Science Faculty Computer Science Department EEDIS Laboratory ; 2021 – 2022.

[35] Elis Kulla ; Research article Performance evaluation of Focused Beam Routing for IoT applications in underwater environment; Graduate School of Engineering, Okayama University of Science, 1-1 Ridaicho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

[36] W. Liang, H. Yu, L. Liu and B. Li. “Information-carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network”, In: Mechatronics and Automation, ICMA 2007, 2007.

[37] Muhammad Ayaz, Imran Baig, Azween Abdullah, Ibrahima Faye ; Review A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks ; CIS Department, EE Department, FAS Department, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia ; Article history: Received 14 March 2011 Received in revised form 23 May 2011 Accepted 19 June 2011 .

ملخص

شبكة الاستشعار اللاسلكية تحت الماء (UWSN) هي فرع ناشئ ومتطور حديثاً لتكنولوجيا الاستشعار اللاسلكي. في هذه الشبكة، يتم نشر عقد استشعار ذات بطارية وذاكرة محدودة في بيئة تحت الماء. بسبب الاختلافات المتعددة مع شبكات الاستشعار اللاسلكية الأرضية (WSN)، لا يمكن استخدام موجات الراديو للاتصال تحت الماء. تستخدم القنوات الصوتية للاتصال في مياه البحر. تحتوي القنوات الصوتية على العديد من قيود الاتصال، مثل عرض النطاق الترددي المنخفض، والتأخير العالي من طرف إلى طرف، وفقدان كبير لوجهة الوصول ونتيجة لذلك، أصبح الاتصال الموفر للطاقة في الشبكات تحت الماء ضرورة مطلقة لتكنولوجيا أجهزة الاستشعار اللاسلكية. قارنت هذه المذكرة بروتوكولي التوجيه، مثل Vector Based Forwarding (VBF) و Hop by Hop- Vector Based Forwarding (HH-VBF) وتمت مقارنتها باستخدام أداة المحاكاة NS2. وذلك على أساس معدل تسليم البيانات و معدل تسليم البيانات من البداية إلى النهاية وإجمالي الطاقة المستهلكة وكفاءة الطاقة.

كلمات البحث : شبكة الاستشعار تحت الماء ,الموجات الصوتية ,التوجيه , HH-VBF , VBF .

Abstract

Underwater Wireless Sensor Network (UWSN) is a newly emerged and developed branch of wireless sensor technology. In this network, small sensor nodes with limited battery and memory are deployed in an underwater environment. Due to multiple differences with land-based wireless sensor networks (WSNs), radio waves cannot be used for underwater communication. Acoustic channels are used for communication in seawater. Acoustic channels have many communication constraints, such as low bandwidth, high end-to-end delay, and high path loss. Therefore, energy-efficient communication in underwater networks has become an absolute necessity for wireless sensor technology. The topic of this project is to compare the two main location-based routing protocols in UWSNs. Such as Vector Based Forwarding (VBF) and Hop by Hop- Vector Based Forwarding (HH-VBF) were compared using NS2 simulation tool. These protocols were compared on the basis of data delivery rate, end-to-end delay, total energy consumed and energy efficiency.

Keywords: underwater sensor network, Acoustic Wave, Routing, VBF, HH-VBF.

Résumé

Le réseau de capteurs sans fil sous-marin (UWSN) est une branche nouvellement apparue et développée de la technologie des capteurs sans fil. Dans ce réseau, de petits nœuds de capteurs dotés d'une batterie et d'une mémoire limitées sont déployés dans un environnement sous-marin. En raison de multiples différences avec les réseaux de capteurs sans fil (WSN) terrestres, les ondes radio ne peuvent pas être utilisées pour la communication sous-marine. Les canaux acoustiques sont utilisés pour la communication dans l'eau de mer. Les canaux acoustiques présentent de nombreuses contraintes en matière de communication, comme une faible bande passante, un délai de bout en bout élevé et une perte de trajet importante. Par conséquent, la communication économe en énergie dans les réseaux sous-marins est devenue une nécessité absolue pour la technologie des capteurs sans fil. Cet article a comparé les deux principaux protocoles de routage basés sur la localisation dans les UWSN. Tels que Vector Based Forwarding (VBF) et Hop by Hop- Vector Based Forwarding (HH-VBF) ont été comparés en utilisant l'outil de simulation NS2. Ces protocoles ont été comparés sur la base du taux de livraison des données du délai de bout en bout , de l'énergie totale consommée et l'efficacité énergétique .

Mots clés : Réseau de capteur sous-marins, Onde Acoustique, Routage, VBF, HH-VBF.