

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins	
I Introduction	3
II Définition d'un réseau de capteurs sans fil terrestre	3
III Domaines d'applications des réseaux de capteurs terrestre	4
IV Définition d'un réseau de capteurs sous-marin	5
V Anatomie du capteur sous-marin.....	6
VI Différentes techniques de communication sans fil aquatique	8
VI.1 Communication par ondes radio	8
VI.2 Communication par ondes optiques	8
VI.3 Communication par ondes acoustiques	8
VII Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique et aérienne	9
VIII La différence entre WSN et UWSN	11
IX Les caractéristiques des UWSN	12
X Les contraintes des UWSN.....	13
XI Les applications des UWSN.....	14
XII Les différentes architectures dans les UWSN	16
XII.1 Les réseaux de capteur sous-marins à deux dimensions (2D) :.....	16
XII.2 Les réseaux de capteur sous-marins En trois dimensions (3D).....	17
XII.3 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins.....	19
XIII Conclusion.....	20
Chapitre II: le routage dans les réseaux de capteurs sous-marins	
I.Introduction	21
II. Le paradigme de la conception des protocoles du routage.....	21
III. Facteurs décisifs de la conception	22
III.1 L'énergie consommée	22
III.2 Le lien de la communication	22
III.3 puissance de l'unité de traitement	22
III.4 La mise à l'échelle (Scalabilité)	22
III.5 Les panne des capteurs:	23
IV. Les problèmes de conception de protocole de routage pour les UWSN	23
V. Classification des protocoles de routage pour UWSN	24

V1	Protocoles basés sur Inondations	24
V.2	Protocoles basés sur trajets multiples	28
V.3	Protocoles basés sur des clusters	30
V.4	Divers.....	34
VI.	Comparaison entre les protocoles étudiés	36
VII.	Discussion sur les performances des protocoles	37
VIII.	Conclusion	38

Chapitre III: Etude du protocole de routage VBF

I	Introduction	39
II	Choix du protocole	39
III	Présentation du protocole de routage VBF Vector-based forwarding.....	39
IV	Décision de routage	41
V	La manipulation de la Mobilité de la Source.....	42
VI	L'algorithme d'auto-adaptation utilisé par VBF	42
VII	Conclusion.....	46

Chapitre IV: Evaluation des performances du protocole VBF

I.	Introduction	47
II.	Outils de simulation.....	47
III.	Le choix de simulateur NS2	48
IV.	Simulateur NS-2	48
V.	Aqua-Sim.....	49
VI.	Objectifs de la simulation	51
VII.	Métriques d'évaluation	51
VIII.	Méthodologie expérimentale	52
VIII.1	Création du modèle de simulation.....	52
VIII.2	Etude de l'énergie cumulée	53
VIII.3	Etude du délai de transmission	54
VIII.4	Etude du taux de Perte	55
IX.	Conclusion.....	56
	Conclusion générale et perspective	57
	Bibliographies.....	59
	Annexe A.....	63
	Annexe B	64

Liste des figures

Figure I.1 Exemple de réseau de capteurs	4
Figure I.2 Les réseaux de capteur sous-marins	6
Figure I.3 Anatomie du capteur sous-marin	6
Figure I.4 Exemples des capteurs sous-marins.....	7
Figure I.5 Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique	10
Figure I.6 Surveillance de l'environnement.....	14
Figure I.7 Explorations sous-marines.....	15
Figure I.8 Le tsunami	15
Figure I.9 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D.	17
Figure I.10 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 3D.	18
Figure I.11 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins	20
Figure II.1 Classification des protocoles de routage pour UWSN	24
Figure II.2 Le mécanisme d'inondation	24
Figure II.3 l'architecture du protocole FBR	26
Figure II.4 Renvoi sélection de nœud.....	27
Figure II.5 Topologie du réseau en multi-trajets	29
Figure II.6 Architecture du réseau utilisé dans le protocole de routage MPT.....	30
Figure II.7 La décomposition du réseau en clusters	31
Figure II.8 Exemple réseau avec DUCS.....	32
Figure II.9 Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP	33
Figure II.10 Protocole de routage adaptatif	35
Figure III.1 Topologie du protocole VBF pour les UWSN.....	40
Figure III.2 Facteur Désirable α	43
Figure III.3 VBF avec l'algorithme d'auto-adaptation.....	45
Figure IV.1 Relation entre Aqua-Sim et NS-2	50
Figure IV.2 Architecture du simulateur Aqua-Sim	51
Figure IV.3 l'énergie cumulée en fonction de la charge du réseau	53
Figure IV.4 Délai de transfert de paquet en fonction de la taille du réseau	54
Figure IV.5 le taux de perte en fonction du nombre des nœuds.....	55

Liste des tableaux

Tableau I.1 Comparaison entre les systèmes de communication sans fil dans l'air et dans le milieu marin.....	11
Tableau II.1 comparaison entre les protocoles de routage étudiés	39
Tableau IV.1 Paramètres du contexte de la simulation	53
Tableau IV.2 L'énergie cumulée (en joule) par les nœuds	53
Tableau IV.3 Délai de transfert des paquets de données.....	54
Tableau IV. 4 Taux de Perte de transfert de paquets de données.....	55

Introduction générale

Le besoin d'être informé, à tout temps, des évolutions de l'environnement qui nous entoure, a mène l'être humain à perfectionner, chaque fois que c'est nécessaire les moyens de communication et d'information. L'avènement des réseaux sans fils a élargi considérablement les horizons d'utilisation des équipements de collecte et de transmission des données sans le souci des éléments d'interconnexion classique comme les câbles.

Des réseaux pour téléphones mobiles aux réseaux locaux sans fil en passant par les réseaux ad-hoc et les réseaux de capteurs sans fil, la recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteur sous-marins (Underwater Wireless Sensor Network - UWSN). Ceux-ci sont composés d'un grand nombre de nœuds communicants et distribués sur une zone donnée afin de surveiller un évènement ou explorer l'océan. Dans un tel réseau, chaque nœud est un dispositif électronique qui possède une capacité de calcul, de stockage, de communication et d'énergie.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les performances du protocole de routage dans les réseaux de capteur sous-marins VBF (Vector-Based Forwarding) tel que (la consommation d'énergie, le délai de transfert des paquets, taux de perte). Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre c'est une généralité sur les UWSN qui débutera par une présentation du réseau de capteurs sans fil et leurs domaines d'applications, puis nous avons défini le réseau de capteur sous-marin, l'anatomie du capteurs sous-marin, les différentes techniques de communication sans fil aquatique, nous décrivons, aussi, dans ce chapitre la différence entre les WSN et UWSN, et les caractéristiques des UWSN, ses contraintes et ses applications, et on termine ce chapitre par l'architecture des UWSN.

Le second chapitre sera consacré au routage dans les UWSN, et nous focalisons notre présentation sur les protocoles de routage et leurs problèmes de conception.

Dans le troisième chapitre nous étudions le protocole de routage VBF qui débutera par une présentation de ce protocole, décision de routage et la manipulation de la Mobilité du Source, nous montrons l'algorithme d'auto-adaptation pour VBF.

Dans le quatrième chapitre nous présentons le simulateur que nous avons choisi aqua-sim qui est basé sur NS2. En effet, nous avons évalué les performances du protocole VBF en utilisant trois métriques : l'énergie cumulée, délai de transmission et le taux de perte.

I Introduction

Des avancées technologiques majeures dans des domaines connexes ont ouvert l'horizon pour de nombreux et nouveaux systèmes de réseaux. Les réseaux de capteurs ont révolutionné tous les domaines de la technologie soit la science, l'industrie et le gouvernement. La révolution est due à la miniaturisation et à l'avancement de la technologie en termes de couverture, traitement à faible puissance, unités de stockage et microsystèmes électriques et mécaniques (MEMS) pour la construction d'unités de détection à bord. La possibilité d'avoir de petits appareils distribués physiquement près des objets qui sont détectés apporte de nouvelles opportunités pour observer et agir sur le monde, par exemple surveillance avec des micro-habitats [1,2] surveillance structurelle [3], et application industrielle [4].

Le réseau sans fil sous-marin est la technologie habilitante pour les applications marines. Le réseau de capteurs Sous l'eau se compose d'un nombre variable de capteurs et des véhicules qui sont déployés pour effectuer des tâches de surveillance de collaboration sur une zone donnée.

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins (underwater wireless sensor networks) UWSN diffèrent principalement dans les moyens de communication utilisés pour la transmission de l'information. Le travail donné dans [5] représente les fondamentaux physiques et les implémentations techniques d'échange d'informations efficace via la communication sans fil utilisant les ondes physiques en tant que support de transmission dans un réseau de capteurs sous-marins. Les ondes physiques comprennent l'acoustique, la radio, et la lumière.

II Définition d'un réseau de capteurs sans fil terrestre

Un réseau de capteurs sans fil ou WSN (Wireless Sensor Network) est un réseau 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.

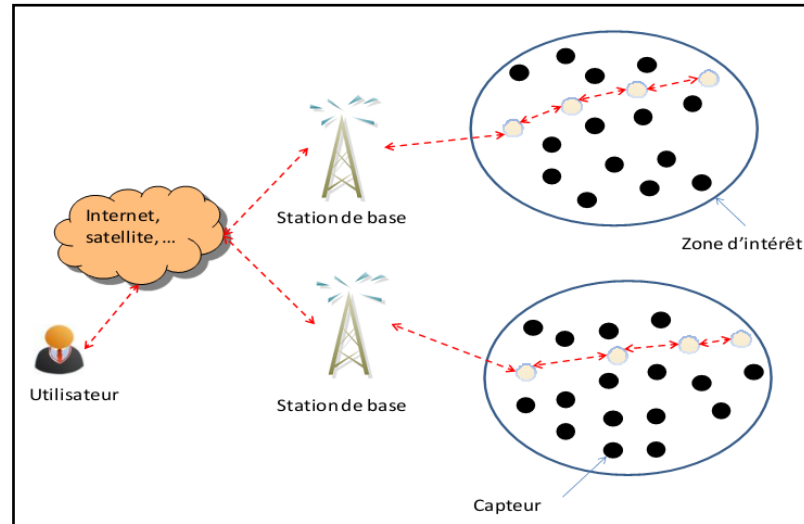


Figure I.1 Exemple de réseau de capteurs

III Domaines d'applications des réseaux de capteurs terrestre

Les RCSF peuvent avoir beaucoup d'applications. Parmi elles, nous citons :

- **Applications militaires**

Un réseau de capteurs déployés dans un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (alliés ou ennemis), ou d'analyser le champ de bataille avant d'y envoyer du renfort [6,7].

- **Applications à la surveillance**

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains.

Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

- **Applications médicales**

Il existe déjà dans le monde médical, des gélules multi-capteurs pouvant être avalées qui permettent, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur du corps humain [8,9].

- **Applications environnementales**

Des capteurs de température peuvent être dispersés à partir d'avions dans le but de détecter d'éventuels problèmes environnementaux dans le domaine couvert par les capteurs dans une optique d'intervenir à temps afin d'empêcher que d'éventuels incendie, inondation, volcan ou tsunami ne se produisent [10, 11, 12].

- **Applications commerciales**

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées [13].

- **La domotique**

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, ... [14]. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.

IV Définition d'un réseau de capteurs sous-marin

Le réseau de capteurs sous-marin est formé par la coopération entre plusieurs nœuds qui établissent et maintiennent un réseau par le biais de liens bidirectionnels acoustiques. Chaque nœud est capable d'échanger des messages entre les nœuds du réseau, mais aussi de transmettre des messages vers des destinations lointaines dans le cas de réseaux multi-sauts. Chaque nœud 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.

Clicours.COM

Ainsi, l'UWSN est utilisé dans un environnement interactif où les scientifiques peuvent extraire des données en temps réel provenant de plusieurs capteurs distants ou instruments sous-marins. Après avoir évalué les données obtenues, les messages de contrôle peuvent être envoyés aux nœuds de réseau individuel de sorte que le réseau global peut être adapté à des situations changeantes.

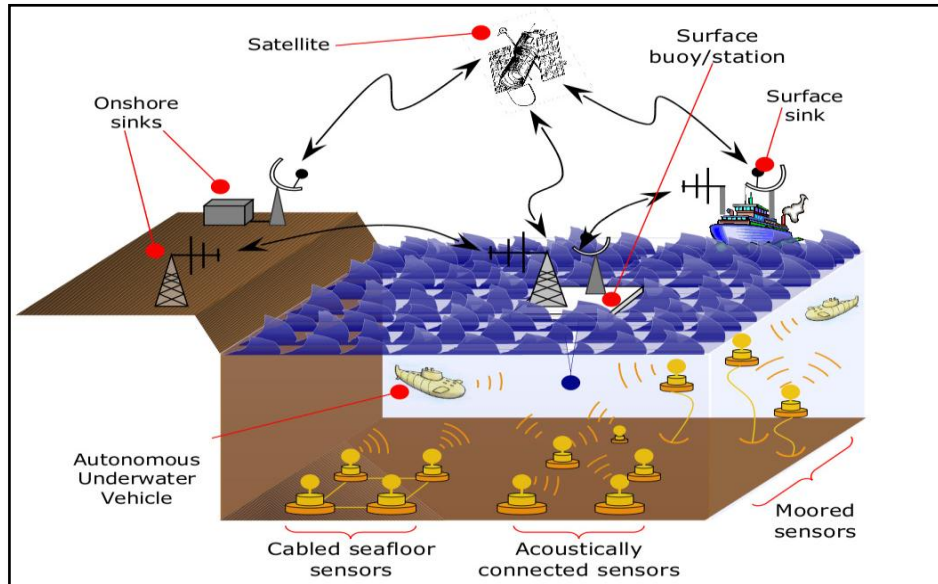


Figure I.2 Les réseaux de capteur sous-marins

V Anatomie du capteur sous-marin

Un nœud capteur est composé principalement d'un processeur, une mémoire, une Unité de capture, une pile d'énergie, et un modem acoustique

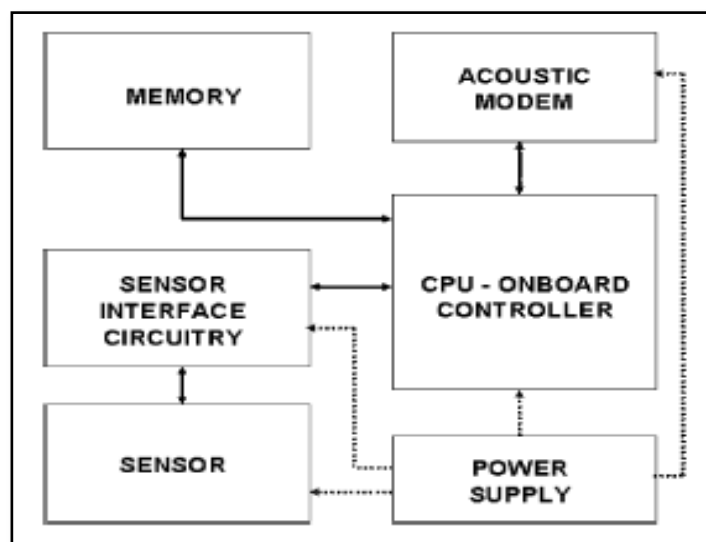


Figure I.3 Anatomie du capteur sous-marin

L'architecture interne typique d'un capteur sous-marin est montrée dans la Figure I.3. Il se compose d'un contrôleur principal/CPU qui est interfacé avec un instrument océanographique ou un capteur à travers un circuit d'interface de capteur. Le contrôleur reçoit les données du capteur et il peut la stocker dans la mémoire embarquée, la traiter et de l'envoyer à d'autres périphériques réseau en contrôlant le modem acoustique. Les circuits électroniques sont généralement montés sur un châssis qui est protégé par un boîtier en PVC. Parfois, tous les composants du capteur sont protégés de l'impact potentiel des engins de chalutage, en particulier dans les zones soumises à des activités de pêche.

Les capteurs sous-marins peuvent mesurer différentes grandeurs telles que la qualité d'eau et étudier ses caractéristiques, la température, la densité, la salinité (capteurs interférométriques et réfractométrique), l'acidité, les produits chimiques, la conductivité, le pH (capteurs magnéto élastiques), l'oxygène (électrode de type Clark), l'hydrogène, le méthane dissous (METS), et la turbidité.

Des Puces à ADN peuvent être utilisées pour contrôler à la fois l'abondance et les variations du niveau d'activité des populations microbiennes naturelles. D'autres capteurs existants sous l'eau comprennent le sulfure hydro thermique, de silicates, de capteurs voltamétriques spectrophotométrie, capteurs d'électrodes en or-amalgame pour les mesures des sédiments d'ions métalliques à sélectivité ionique (analyse) [30].



a) Nœud fixe (Aquaflecks) et mobile (Amour AUV)



b) Nœud mobile (Starbug AUV)

Figure I.4 Exemples des capteurs sous-marins

VI Différentes techniques de communication sans fil aquatique

Pour la communication sans fil aquatique on peut envisager des liaisons par ondes radio, par ondes optiques ou par ondes acoustiques.

VI.1 Communication par ondes radio

Les normes de communication sans fil des ondes radio atteignent le domaine des gigahertz dans l'air, citons l'exemple des normes : IEEE 802.11, Home RF, Bluetooth qui opèrent dans la bande des 2.4 GHz. Néanmoins, l'atténuation pour les hautes fréquences, dans l'eau, s'avère extrêmement grande et arrive pour une fréquence de 2.4 GHz à 1695 dB/mètre dans la mer et à 189 dB/mètre dans l'eau fraîche, tout en supposant une moyenne de conductivité de $4 \Omega^{-1}/\text{mètre}$ dans l'eau de mer et de $0.05 \Omega^{-1}/\text{mètre}$ dans l'eau fraîche [15]. Ainsi, les rayonnements électromagnétiques ne pénètrent pas le milieu marin au-delà de quelques dizaines de mètres dans le meilleur des cas : λ du bleu (la mer) est la longueur d'onde la moins rapidement absorbée dans l'eau du spectre lumineux (d'où la planète bleue).

Pour les très basses fréquences (30 à 300 Hz), l'atténuation diminue, mais la propagation de l'onde électromagnétique sur de longues distances nécessite alors de grandes antennes d'émission – réception, donc des puissances d'émission élevées [16].

VI.2 Communication par ondes optiques

Dans le cas des ondes optiques, le problème d'atténuation du signal n'est pas posé 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 [17]. L'inhomogénéité du milieu (variation de l'indice de réfraction dans l'espace causant la courbure du rayon lumineux) et la présence des obstacles influent aussi sur la propagation de l'onde optique et spécialement la lumière infrarouge [15].

VI.3 Communication par ondes acoustiques

Contrairement à la communication sans fil dans l'espace libre (l'air), les systèmes de communication aquatique sans fil utilisent l'onde acoustique comme support physique de transmission de l'information dans l'eau qui se comporte comme un guide d'onde, vu que l'onde acoustique présente les meilleures performances comparées aux autres types d'ondes

(optiques et électromagnétiques) [18,19]. En effet, les océans sont presque transparents aux ondes sonores et opaques à la lumière et aux ondes radioélectriques. Par exemple, pour une longueur d'onde d'un mètre, l'eau est près d'un million de fois plus transparente au son qu'aux ondes radioélectriques. En effet, les ondes acoustiques sont largement utilisées pour la communication sous-marine [20] : commande, poursuite et localisation des sous-marins, ainsi que la communication avec les côtes. On peut également envoyer des emails à partir d'un sous-marin sans avoir besoin de remonter à la surface (exemple : le sous-marin américain USS Dolphin, croisant au large de la Californie de profondeur « 120 mètres » a envoyé un e-mail à la base de San Diego, sans avoir besoin de faire surface ni de déployer une antenne). La technologie employée ici consiste à délivrer les données numériques via un modem utilisant les ondes acoustiques.

VII Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique et aérienne

Les ondes acoustiques ne sont pas les seuls moyens pour la transmission sans fil des signaux sous l'eau. Cependant, les ondes radio peuvent se propager dans l'eau pour différentes distances mais à basse fréquence (30 à 300 Hz) et exigent de grandes antennes et une énorme puissance d'émission [21]. Dans le même contexte, les ondes optiques sont susceptibles de transmettre l'information sous l'eau puisqu'elles ne subissent pas une grande atténuation à faible distance, mais elles sont affectées par le phénomène de dispersion ; et par conséquent la transmission des signaux optiques exige la haute précision pour pointer les faisceaux laser.

Aussi la communication optique sous-marine est caractérisée par une faible portée de transmission. Bien que la technologie laser soit encore parfaite pour les usages pratiques, les ondes acoustiques restent la meilleure solution pour communiquer sous l'eau dans des mauvaises conditions. Le schéma de la figure I.5 résume les caractéristiques de chacune de ces techniques de communication sans fil aquatique.

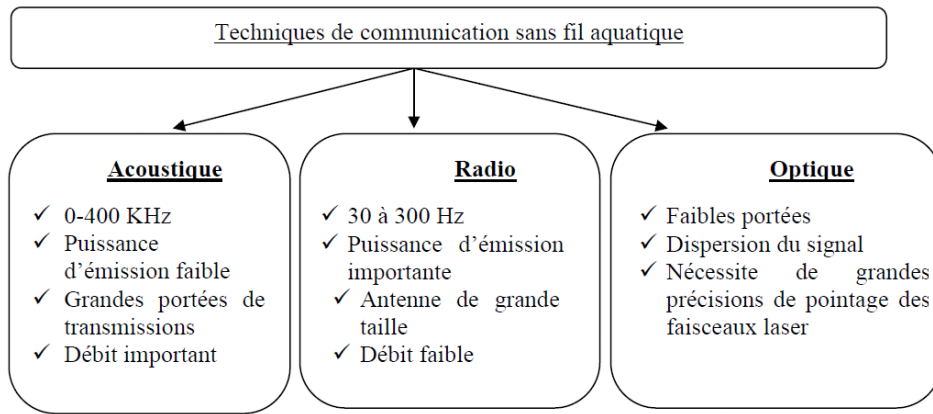


Figure I.5 Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique

La nécessité de réaliser un système de communication acoustique aquatique nous amène à considérer les problèmes d'autonomie, donc de durée de vie des batteries des nœuds communicants, sachant que l'exploitation des sources d'énergie en milieu marin est extrêmement difficile et qu'on ne peut pas profiter de l'énergie solaire pour recharger les batteries. Tout système de communication sans fil acoustique aquatique doit être obligatoirement caractérisé par une architecture à faible consommation d'énergie.

Comparée à un canal radio, la bande passante disponible du canal acoustique sous-marin est très limitée. La portée de transmission dépend de la fréquence et de la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau. Dans le canal aquatique, la vitesse de propagation est cinq fois plus petite qu'au milieu aérien ; de même, elle peut varier avec la pression, la composition de l'eau, et la température [22]. Aussi, une communication acoustique sous-marine est caractérisée par un délai de propagation élevé, une mobilité importante des nœuds flottants, et une capacité du lien acoustique limitée [23]. Les différences principales entre un système de communication sans fil sous-marin et aérien peuvent être résumées comme indiqué au Tableau I.1 [24].

La demande de disposer des systèmes de télécommunications sans fil pour des applications nécessitant une demande importante de débit, telles les applications de contrôle temps réels et les transmissions vidéo, ne pourront être soutenues que si des recherches de qualité produisent des idées nouvelles permettant d'améliorer la qualité de transmission sans fil.

Cette étude comparative montre que la communication sans fil sous-marine est une tâche très difficile. Les méthodes qui sont ordinairement utilisées pour une communication

numérique sans fil dans l'air ne sont pas applicables pour une communication sans fil dans l'eau. La transmission acoustique est la solution optimale afin de réaliser un système de communication sans fil fiable et qui s'adapte bien aux contraintes de support aquatique.

Paramètre	Acoustique	Electromagnétique	Optique
Vitesse de propagation	$\sim 1500 \text{ ms}^{-1}$	$\sim 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$	$3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$
perte de puissance	$>0.1 \text{ db/m/HZ}$	$\sim 28 \text{ db/1km/100MHZ}$	$\sim \text{turbidité}$
Bande de fréquence	$\sim 0\text{-}400 \text{ KHz}$	$\sim 20 \text{ KHz-}300 \text{ GHz}$	$\sim 193 \cdot 10^{12}\text{-}435 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$
bande passante	$\sim \text{KHz}$	$\sim \text{MHZ}$	$\sim 10 - 150 \text{ MHZ}$
taille de l'antenne	$\sim 0.1 \text{ m}$	$\sim 0.5 \text{ m}$	$\sim 0.1 \text{ m}$
portée effective	$\sim \text{km}$	$\sim 10 \text{ m}$	$\sim 10 - 100 \text{ m}$

Tableau I.1 Comparaison entre les systèmes de communication sans fil dans l'air et dans le milieu marin

VIII La différence entre réseaux de capteur terrestre et sous-marins

Réseaux de capteurs sous-marins sont très différents des réseaux de capteurs terrestres [25], 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 délais, 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

sous-marin. La faible bande passante et la latence importante entraînent des défis en termes de fiabilité de transfert de données et le contrôle de congestion du trafic.

- **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.
- **Corrélation spatiale:** les lectures prises par les réseaux des capteurs terrestres sont souvent corrélés, mais ce n'est pas le cas dans les réseaux sous-marins puisque la distance est plus grande entre les capteurs.

IX Les caractéristiques des UWSN

- **Moyens de communication:** le système de communication sous-marin implique la transmission d'informations par différents médias, soit des ondes acoustiques, ondes électromagnétiques ou des ondes optiques. Chacune des techniques ont leurs avantages et leurs limites. La Communication acoustique est la technique la plus polyvalente et largement utilisé dans les réseaux de capteurs sous-marins en raison d'une faible atténuation dans l'eau.
- **Perte de transmission:** elle se compose en deux facteurs : l'atténuation et la propagation géométrique. L'atténuation est principalement provoquée par

l'absorption due à la conversion de l'énergie acoustique en chaleur, et elle augmente avec la distance et de la fréquence. La propagation géométrique se réfère à la propagation de l'énergie acoustique à la suite de l'expansion des fronts d'onde, Elle augmente avec la distance de propagation.

- **Bruit:** Il peut être classé comme bruit artificiel et bruit ambiant. Le premier est principalement causée par le bruit des machines (pompes, réducteurs, centrales électriques), et l'activité d'expédition (encrassement des coques, la vie animale sur la coque, la cavitation), tandis que la seconde est liée à l'hydrodynamique (mouvement de l'eau, y compris les marées, le courant, les tempêtes, le vent et la pluie), et à des phénomènes sismiques et biologiques.
- **Trajet-multiple:** la propagation par trajets multiples peut être responsable de la dégradation sévère du signal de communication acoustique, car elle génère des interférences entre symboles (ISI). La géométrie trajet-multiple dépend de la configuration de la liaison. Les canaux verticaux sont caractérisés par une petite dispersion temporelle, tandis que les canaux horizontaux peuvent avoir de longs écarts multi-trajets. La mesure de l'étalement est une forte fonction de profondeur et la distance entre l'émetteur et le récepteur.
- **L'étalement Doppler:** L'écart de fréquence Doppler provoque une dégradation de la performance des communications numériques. L'étalement Doppler génère deux effets: une translation de fréquence simple et un étalement de fréquence continue, ce qui constitue un signal non décalé. Alors que le premier est facilement compensé au niveau du récepteur, l'effet de ce dernier est plus difficile à compenser. [26]

X 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.

XI Les applications des UWSN

• L'échantillonnage dans l'océan :

Les capteurs sous-marins et les AUVs ont la capacité synoptique d'effectuer, l'échantillonnage coopératif adaptatif à l'environnement marin côtier à trois dimensions afin de construire des bases de données géologiques et biologiques. [28]

• Surveillance de l'environnement :

Les réseaux de capteurs sous-marins permettent de suivre différents types de pollution (chimique, biologique et nucléaire), la surveillance des courants marins et les vents, les prévisions météo, la détection des changements climatiques, comprendre et prévoir l'effet des activités humaines sur les écosystèmes marins, et la surveillance biologique tels que le suivi de l'activité biologique marine ou l'industrie de l'aquaculture.



Figure I.6 Surveillance de l'environnement

• Explorations sous-marines :

Les réseaux de capteurs sous-marins peuvent aider à détecter les réservoirs de pétrole sous-marins, la détermination des routes pour la pose de câbles sous-marins, et l'exploration des minéraux précieux. En outre, il peut être utilisé pour l'archéologie sous-marine et la recherche des épaves.

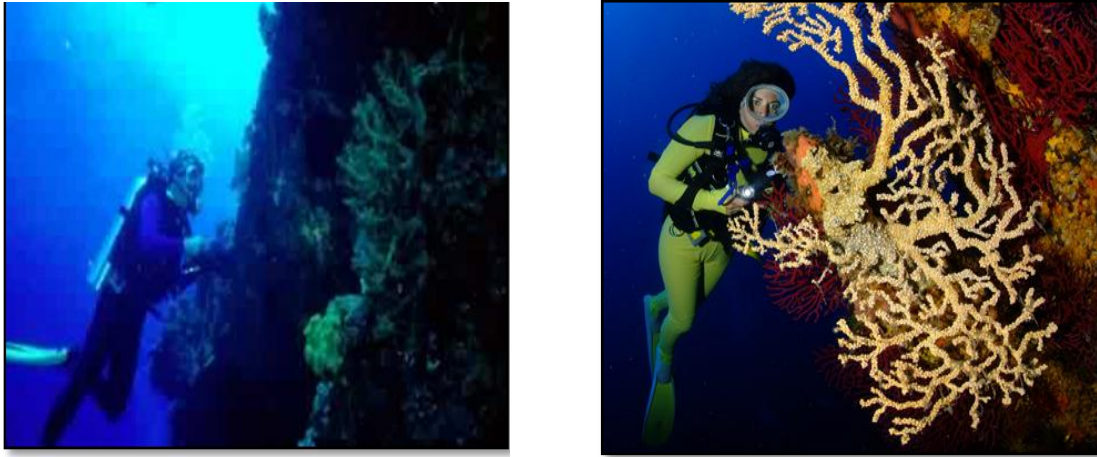


Figure I.7 Explorations sous-marines

- **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, [29] et aussi étudier les effets des tremblements de mer (seauquakes).



Figure I.8 Le tsunami

- **La navigation assistée:**

Les capteurs peuvent être utilisés pour identifier les dangers sur le fond marin, localiser les roches dangereuses dans les eaux peu profondes, les positions d'amarrage, la localisation des épaves immergées, et l'exécution de profilage bathymétrie.

- **La surveillance tactique Distribuée :**

Les véhicules autonomes sous-marins (AUV) et les capteurs sous-marins fixes peuvent collaborer pour contrôler les 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 permettre aussi la détection et la classification des cibles à faible signature par une combinaison de mesures des différents types de capteurs.

XII Les différentes architectures dans les UWSN

La topologie d'un réseau est toujours un sujet de recherche ouvert à la communauté scientifique. En particulier, nous présentons des architectures bidimensionnelles et tridimensionnelles, et aussi la topologie mobile qui utilise des véhicules sous-marins autonomes (AUV) qui peuvent améliorer la capacité des réseaux de capteurs sous-marins.

XII.1 Les réseaux de capteur sous-marins à deux dimensions (2D) :

Une architecture pour les réseaux de capteur sous-marins 2D est montrée dans la Figure I.9. Un groupe de capteurs sont ancrés au fond de l'océan, les nœuds sont reliés entre eux à une ou plusieurs puits sous-marins (uw-sinks) par l'intermédiaire des liaisons acoustiques sans fil. Les sinks sous-marins, sont des dispositifs qui permettent de relayer des données en provenance du fond de l'océan à une station de surface.

Pour atteindre cet objectif, les sinks sous-marins sont équipés par deux émetteurs-récepteurs acoustiques, à savoir un émetteur-récepteur verticale et horizontale. L'émetteur-récepteur horizontal est utilisé par le sink sous-marin pour communiquer avec les capteurs afin de:

- envoyer des commandes et des données de configuration aux capteurs.
- recueillir des données de surveillance.

Le lien vertical est utilisé par le sink sous-marin pour transmettre des données à une station de surface. La station de surface est équipée d'une émetteur-récepteur acoustique qui est capable de gérer plusieurs communications en parallèle selon les sinks sous-marins déployées.

Les capteurs peuvent être connectés à sinks sous-marins via des liens directs ou par l'intermédiaire des chemins multi-sauts.

Dans le premier cas, chaque capteur transmet directement les données recueillies vers sinks sous-marins sélectionnée, [31] le sink sous-marin peut-être très éloignée par rapport au capteur, Par conséquent, bien que la connexion avec un lien direct soit le moyen le plus

simple de réseau de capteurs, il ne peut pas être la solution la plus efficace en terme d'énergie. En outre, les liens directs sont très susceptibles de réduire le débit du réseau en raison des interférences acoustiques augmentées et la puissance de transmission élevée.

En cas des trajets multi-saut, comme dans les réseaux de capteurs terrestres [32], les données produites par la source sont transmis par les capteurs intermédiaires jusqu'à ce qu'il atteigne le sink sous-marins.

Le deuxième cas offre plusieurs avantages tels que l'efficacité énergétique et l'augmentation de la capacité du réseau, mais en parallèle la complexité de la fonctionnalité de routage peuvent être augmenté.

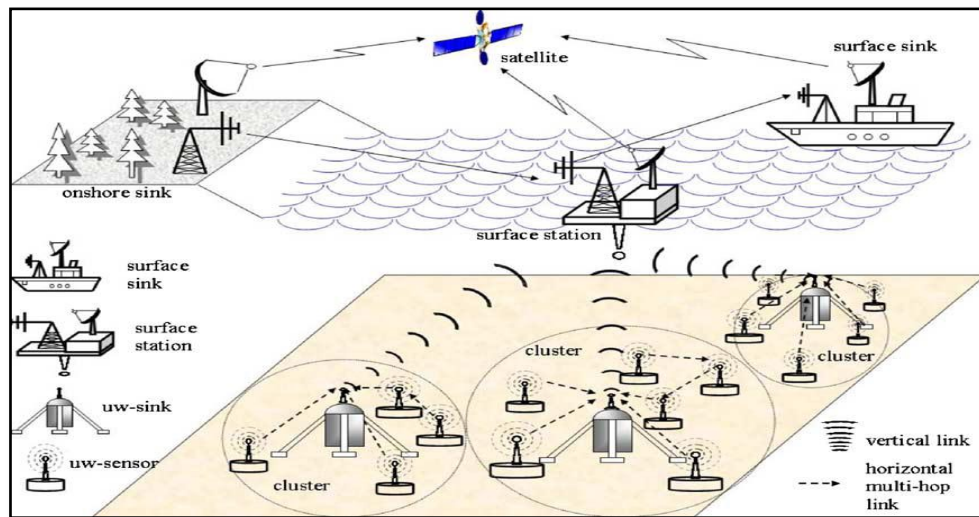


Figure I.9 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D.

XII.2 Les réseaux de capteur sous-marins En trois dimensions (3D)

Les réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions sont utilisés pour détecter et observer des phénomènes qui ne peuvent pas être correctement observées à l'aide des nœuds ancrés sur le fond océanique alors le prélèvement coopératif de l'environnement marin en 3D est nécessaire. 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 [33]. 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.10, 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 océaniques 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.

- **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 connecté en permanence, c'est à dire, au moins un trajet de chaque capteur à la station de surface existe toujours.

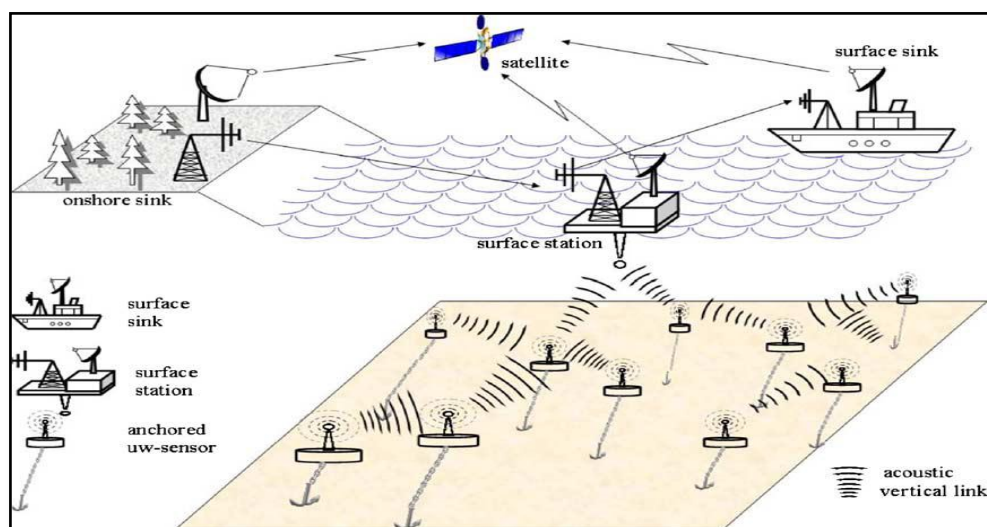


Figure I.10 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 3D.

XII.3 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins

Les AUVs peuvent fonctionner sans attaches, câbles, ou télécommande, et donc ils ont une multitude d'applications en océanographie, la surveillance environnementale et l'étude des ressources sous-marines.

Les travaux expérimentaux ont montré la faisabilité relativement peu coûteuse des AUV sous-marins équipés de plusieurs capteurs sous-marins qui peuvent atteindre n'importe quelle profondeur dans l'océan [34]. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour renforcer les capacités des réseaux de capteurs sous-marins.

L'intégration et l'amélioration des réseaux de capteurs statiques avec AUV est un domaine de recherche encore inexploré qui nécessite presque de nouveaux algorithmes de coordination de réseaux tels que:

- **Échantillonnage adaptatif :**

Cela inclut les stratégies de contrôle pour commander les véhicules mobiles à des endroits où leurs données seront les plus utiles. Cette approche est également connue sous le nom d'échantillonnage adaptatif et a été proposé à des missions de surveillance innovantes [35]. Par exemple, la densité des nœuds peut être augmentée de manière adaptative dans une zone donnée quand une fréquence d'échantillonnage élevée est nécessaire pour un phénomène donné surveillée.

- **Auto-configuration :**

Cela comprend les procédures de contrôle pour détecter automatiquement les trous de connectivité en raison de défaillances de nœuds ou l'atténuation du canal et demander l'intervention d'un AUV. En outre, un AUV peut être utilisé pour l'installation et l'entretien de l'infrastructure de réseau de capteurs ou le déploiement de nouveaux capteurs. Ils peuvent également être utilisés en tant que nœuds relais temporaire pour rétablir la connexion.

Les systèmes d'énergie solaire permettront d'augmenter la durée de vie des AUVs, c'est à dire, il n'est pas nécessaire de les récupérer et les recharger sur une base quotidienne. Par conséquent, les AUVs alimentés par l'énergie solaires peuvent obtenir des informations en continue pendant des périodes de temps de l'ordre de plusieurs mois [36].

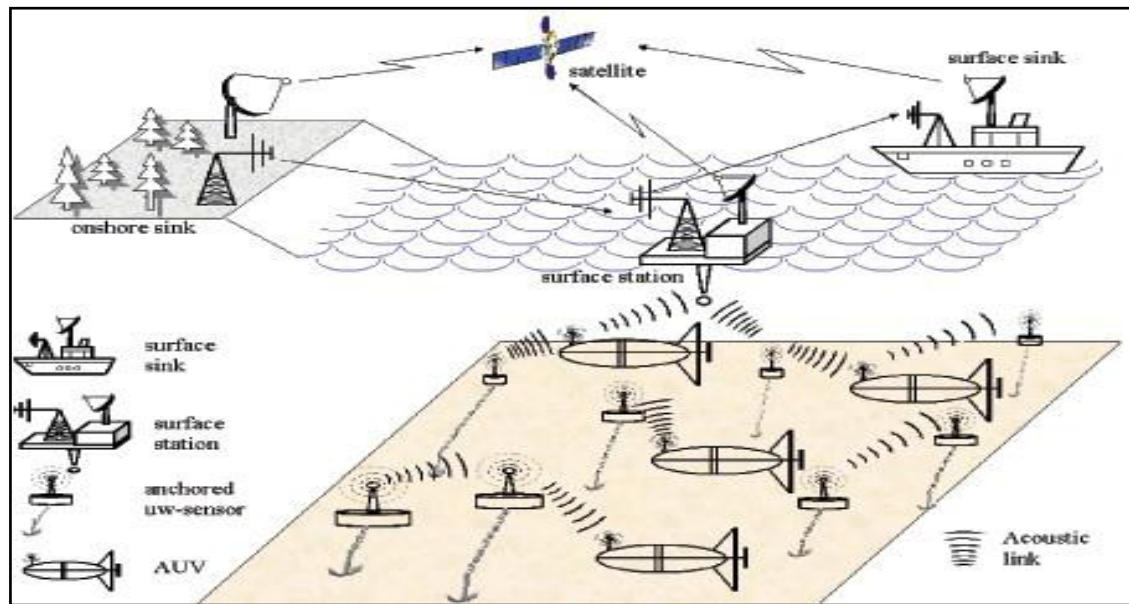


Figure I.11 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins

XIII 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.

I. Introduction

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 UWSN est loin d'être un problème simple. De nouvelles approches de routage sont nécessaires pour effectuer un routage de données sûr et efficace.

Plusieurs protocoles ont été proposés pour les réseaux de capteurs sous-marins, Afin de comprendre leur comportement dans une topologie mobile et à grande échelle, nous allons présenter un rappel de définition du problème de routage dans les réseaux de capteur sous-marins, puis la classification des protocoles résultant ainsi que la description de quelques protocoles basés sur l'inondation, trajet multiple, clustering et divers.

II. Le paradigme de la conception des protocoles du routage

Les réseaux de capteurs sous-marins sont confrontés par plusieurs contraintes tel que la consommation d'énergie, le débit et la qualité de transmission de données; relatifs a l'utilisation de la technologie acoustique et sans fil. Ce qui rend le routage des données très particulier par rapport aux autres réseaux filaires et les réseaux mobiles ad hoc.

En plus, le routage dans les UWSN 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.

Par conséquent, les protocoles classiques de routage dans les réseaux de capteurs terrestres sont inadaptés pour les UWSN et un nouveau paradigme de routage s'avère très nécessaire pour qu'il prenne en charge les contraintes physiques relatives à l'utilisation des

capteurs limités en taille de stockages et en puissance de calcul, et à l'utilisation du medium acoustique sans fil pour la communication, qui est peu fiable et limité en distance de couverture.

III. 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:

III.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 [37], et a 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 le plus longtemps possible [38].

III.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.

III.3 puissance 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.

III.4 La mise à l'échelle (Scalabilité)

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

III.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 du 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.

IV. Les problèmes de conception de protocole de routage pour les UWSN

Les principaux enjeux dans le développement des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins. [39]

- Le délai de propagation élevé : Les signaux radio ne fonctionnent pas efficacement sous l'eau et ce problème encourage l'utilisation de la communication acoustique à son place. Les principaux problèmes avec le canal acoustique, sont la faible bande passante et le délai de propagation élevé.
- la mobilité du nœud : à cause des courants maritimes, les nœuds peuvent fluctuer ou déplacer si elles ne sont pas ancrées au fond de la mer. Cette situation se traduit par une topologie de réseau dynamique. En outre, les véhicules autonomes sous-marins (AUV) et les robots utilisés pour l'exploration et le contrôle peuvent être utilisés pour acheminer les données.
- l'erreur du canal sous-marine acoustique : les canaux acoustiques ont une capacité très faible en bande passante, ils souffrent du problème du taux d'erreurs binaires élevés.
- Énergie limitée : similaire aux réseaux de capteurs sans fil terrestres, la majorité des nœuds de capteurs dans les UWSN sont alimentés par des batteries.
- Environnement de déploiement hostile : En plus de ces défis, tout en développant un protocole de routage sous l'eau, il est important d'éviter l'overhead dans les messages échangés ou l'utilisation des mécanismes de découverte de route basée sur l'inondation.

V. Classification des protocoles de routage pour UWSN

Les protocoles de routages proposés pour les réseaux de capteurs sous-marins utilisent différentes approches tel que : l'approche basée sur l'inondation, sur trajets multiples, sur des clusters et divers. La Figure II.1 montre la classification de ces protocoles.

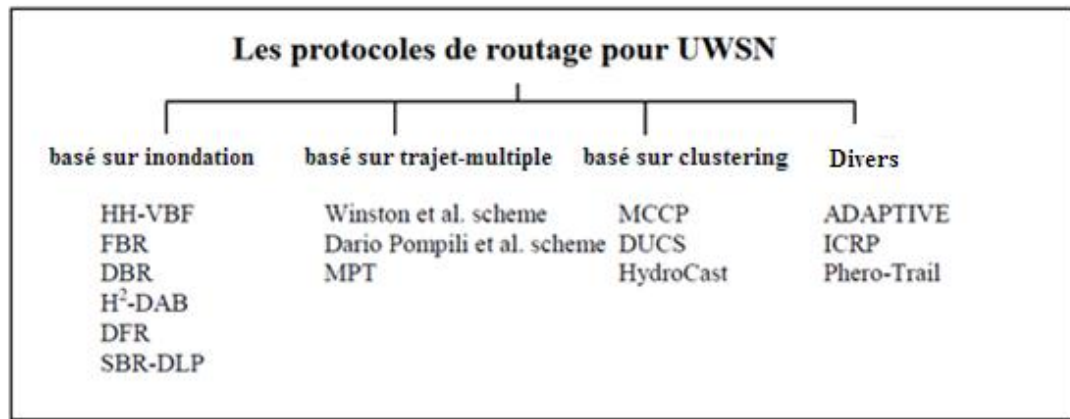


Figure II.1 Classification des protocoles de routage pour UWSN

V1 Protocoles basés sur Inondations

Le principe de l'inondation, consiste à répéter la diffusion d'un message dans tout le réseau. Un nœud qui initie l'inondation envoie le paquet à tous ses voisins directs, de même si un nœud quelconque de réseau reçoit le paquet pour la première fois, il le rediffuse à tous les voisins. [40] Ce comportement se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne tous les nœuds du réseau (Figure II.2).

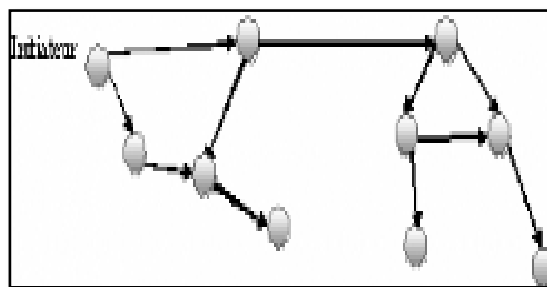


Figure II.2 Le mécanisme d'inondation

Notons que les nœuds peuvent être amenés à appliquer (durant l'inondation) certains traitements de contrôle dans le but d'éviter certains problèmes, tel que les boucles de routage et la duplication des messages. Le mécanisme d'inondation est utilisé généralement dans la

première phase du routage plus exactement dans la procédure de découverte des routes, et cela dans le cas où le nœud source ne connaît pas la localisation exacte de la destination.

V.1.1 FBR (Focused Beam Routing) :

Le Protocole FBR (Focused Beam Routing) [41] utilise l'inondation pour le routage des paquets où l'inondation est limitée par la puissance de transmission. Le système proposé utilise différents niveaux de puissance de transmission afin de minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sous-marins. Les niveaux de puissance d'émission ont une plage de P_1 à P_N .

Le protocole proposé est basé sur la localisation où chaque nœud est conscient de son propre position et la position de la destination. Dans FBR, chaque niveau de puissance correspond un rayon de transmission d_n . Le rayon de transmission est la zone à l'intérieur d'un cône d'angle émanant de la source vers la destination finale. Un nœud source diffuse un paquet RTS avec un niveau de puissance P_1 , contenant l'information de position de la source et la destination. Les nœuds existants dans le rayon de transmission accessible avec le niveau de puissance P_1 répond avec un paquet CTS.

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. En revanche, lorsque le nœud source ne reçoit aucune réponse il augmente le niveau d'énergie à un niveau supérieur. Le niveau de puissance est augmenté niveau par niveau jusqu'à ce que le nœud source reçoive une réponse CTS.

Si le niveau de puissance maximale P_N est atteint et le nœud source ne recevant aucune réponse, la source décale son cône vers la gauche ou vers la droite du cône principal. Puis la même procédure est employée en utilisant des niveaux de puissance de P_1 à P_N . De cette manière, en utilisant les différents niveaux de puissance, le paquet est transmis à partir d'une source vers une destination.

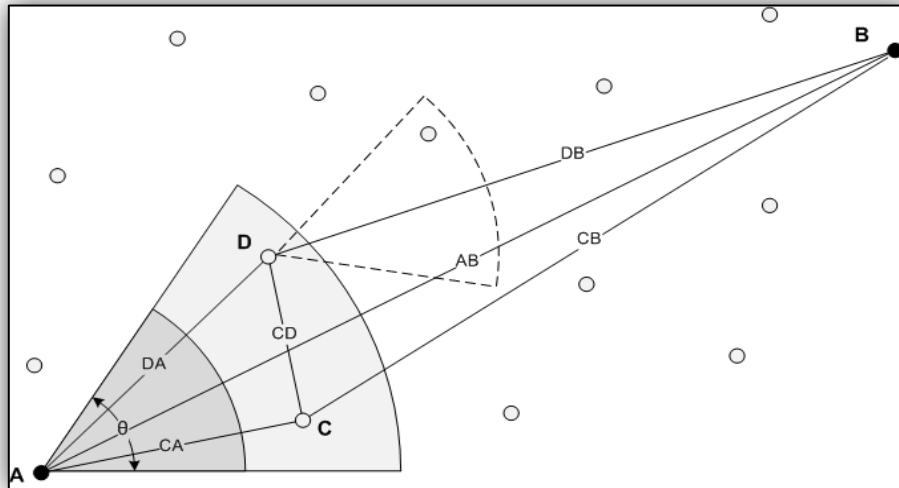


Figure II.3 l'architecture du protocole FBR

V.1.2 DBR (Depth-Based Routing):

Le Protocol DBR (Depth-Based Routing) [42] est basé sur l'inondation en utilisant l'information de la profondeur. La profondeur d'un nœud est acquise à l'aide d'un capteur de profondeur attaché au nœud. Le protocole proposé réduit la nécessité de localisation, ce qui est coûteux en UWSN, en utilisant uniquement les informations de profondeur des capteurs.

Dans DBR, chaque nœud ajoute l'information de profondeur dans le paquet de données. Un nœud lors de la réception du paquet transmet ce paquet lorsque la profondeur du nœud de réception est plus petite que la profondeur de l'émetteur.

Comme la montre la Figure II.4, le nœud S est l'émetteur, et les nœuds n1, n2 et n3 sont tous ses nœuds voisins d'un seul saut. Le cercle en trait plein représente la distance de transmission du nœud S. Lorsque le nœud S diffuse un paquet, tous les nœuds voisins recevront ce paquet. Le nœud N3 est inférieur à S ainsi il rejette le paquet. Bien que les nœuds n1 et n2 sont les deux nœuds de transfert qualifiés, le nœud n1 est préférable de transmettre le paquet. La transmission du nœud n2 est empêchée si elle reçoit le paquet de n1 avant d'envoyer son propre temps prévu pour le paquet [43].

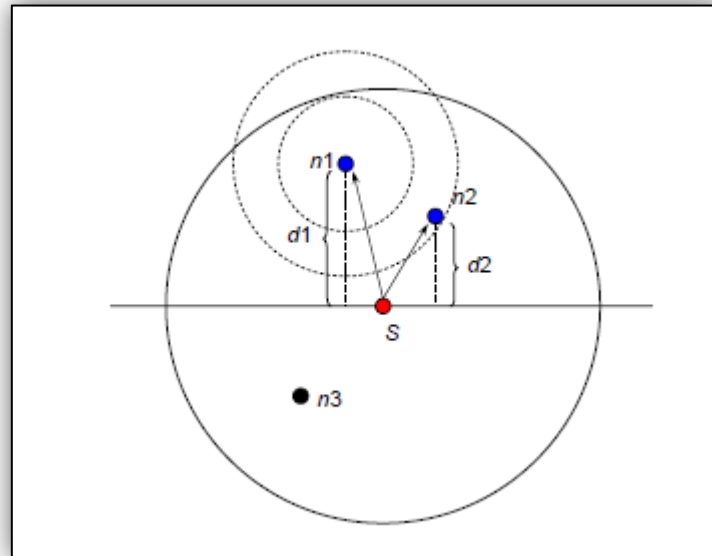


Figure II.4 Renvoi sélection de nœud

Dans le protocole proposé, chaque nœud maintient deux files d'attente, la file d'attente de priorité Q1 et tampon de paquet historique Q2, afin de réduire le nombre des nœuds de transfert et de contrôler la transmission double d'un paquet. Lors de la réception d'un paquet Chaque nœud calcule un temps d'émission prévue et insère le paquet dans la file d'attente de priorité. L'instant d'émission prévu est basé sur le temps de maintien et le moment où le paquet est reçu.

Le temps de maintien est basé sur la différence de profondeur entre le saut précédent et le saut en cours. Par conséquent, le nombre de nœuds de transfert est réduit en utilisant la file d'attente prioritaire. En outre, chaque nœud maintient l'information du paquet transmis dans le tampon de paquet historique Q2. Un nœud vérifie toujours Q2 avant de transmettre un paquet. Par conséquent, la transmission du paquet dupliquer est contrôlé par l'utilisation de tampon de paquet historique Q2.

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 duplique, un nœud vérifie toujours le tampon de paquet historique Q2 avant la transmission d'un paquet.

V.2 Protocoles basés sur trajets multiples

Dans les protocoles basés sur trajets multiples plusieurs chemins à partir du nœud source vers la destination sont établis. La formation des trajets multiples augmente la fiabilité et la robustesse du protocole. En outre, le rapport de livraison de paquets peut être amélioré par la transmission des paquets sur plusieurs voies simultanément.

V.2.1 Winston et al. Scheme :

Le protocole de Winston et al. [44] propose une architecture qui utilise des sinks (puits) virtuels et une transmission par trajets multiples. L'architecture des puits virtuels se compose de plusieurs puits reliés par des liaisons à haut débit i.e. câbles à fibres optiques. L'architecture proposée contient également les points d'agrégation des données locales, ces points d'agrégation sont connectés à plusieurs puits, comme le montre la Figure II.5

Il est précisé que dans un réseau de capteurs sous-marins, le plus souvent, les nœuds capteurs forment des clusters (groupes). Par conséquent, les agrégateurs des données locales recueillent les données obtenues à partir de leurs clusters locaux et les transmettent aux puits.

Dans le dispositif proposé, plusieurs chemins entre les capteurs et les puits sont formés. La formation de trajets multiples est exécutée pendant une phase d'initialisation.

Dans la phase d'initialisation, chaque puits diffuse un paquet de mise à jour du nombre de saut. Chaque nœud recevant ce paquet enregistre une entrée du nœud sink correspondant. En outre, pour les back-tracking, le nœud capteur enregistre également l'entrée du nœud par lequel le paquet de mise à jour du nombre de saut est reçu, puis Le capteur rediffuse le paquet de mise à jour du nombre de saut, après l'incrément d'une unité du nombre de saut. Au cours de la transmission des paquets de données, les nœuds transmettent des paquets de données à multiples puits en utilisant les chemins enregistrés. Les paquets de données sont transmis dans une direction inverse pour laquelle le nœud a reçu les paquets de mise à jour du calcul de sauts.

Il est précisé qu'il ya une grande possibilité de contention dans le cas d'un seul puits, puisque la transmission des paquets en provenance du capteur pourrait entrer en collision au niveau du puits. Toutefois, le schéma proposé permet d'éviter cette affirmation en utilisant les multiples chemins vers les multiples puits.

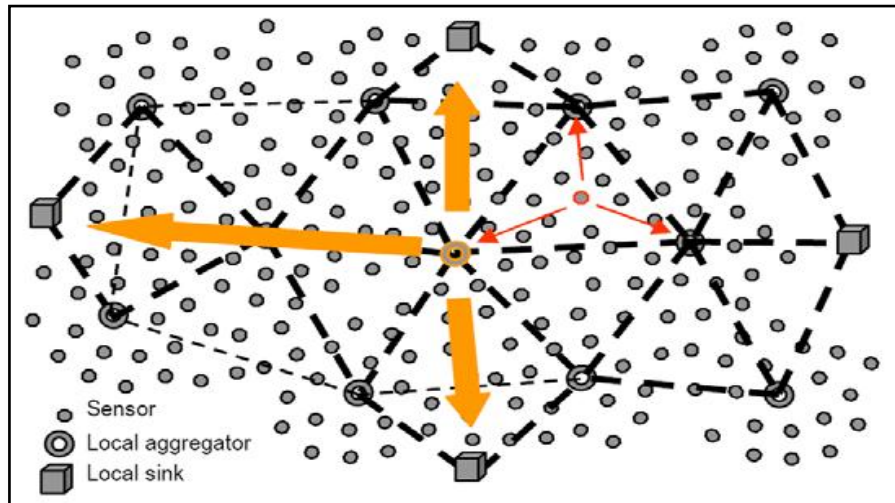


Figure II.5 Topologie du réseau en multi-trajets

V.2.2 MPT (Multipath Power-control Transmission):

Le protocole MPT [45] utilise la transmission à trajets multiples avec une puissance d'émission contrôlée. Le schéma proposé est divisé en trois phases: un routage multi chemin, transmission à puissance contrôlé et source initié, et la combinaison du paquet vers la destination.

Les chemins sont établis comme suit. Premièrement, le nœud source initie un paquet de requête RTS. Tous les nœuds intermédiaires transmettent cette requête, les nœuds de destination répondent avec un paquet de réponse. Quand la requête de route RTS est diffusé vers la destination, le nœud source reçoit de nombreux paquets de réponses à partir de plusieurs chemins avec un nombre différent de sauts.

Ensuite Le nœud source sélectionne un nombre optimal de chemins basés sur la longueur de trajet. Par ailleurs, le nœud source calcule une distribution d'énergie globale et optimale pour chaque trajet. Le calcul de la répartition d'énergie est basé sur les informations recueillies lors de la phase d'établissement de trajet. L'information recueillie est le nombre de sauts et les distances par-saut. Ensuite, les paquets de données sont

transmis à travers les chemins sélectionnés. Les paquets de données contiennent également la répartition de l'énergie totale et optimale calculée pour chaque trajet. Chaque nœud intermédiaire, basée sur des informations reçues à propos de la distribution d'énergie optimale, calcule sa puissance d'émission et transmet le paquet à son prochain saut.

Lors de la réception d'un paquet de données, La destination finale, vérifie l'exactitude du paquet en vérifiant le code de correction d'erreur. S'il n'y a pas d'erreur, le paquet est transmis à la couche d'application. Sinon, le paquet erroné est tamponné. Lors de la réception des duplications d'un même paquet à travers des trajets multiples, la destination décode une copie correcte du paquet en combinant plusieurs copies erronées. La combinaison des multiples copies erronées implique une approche simple d'élection. Un bit est marqué comme étant 1 lorsque la majorité des copies corrompues du paquet illustré en tant que 1, de même, un bit 0 est marquée lorsque la majorité des copies du paquet montré en tant que 0. Ainsi, le paquet est décodé par la combinaison de plusieurs copies erronées du même paquet reçu par l'intermédiaire de multiples chemins.

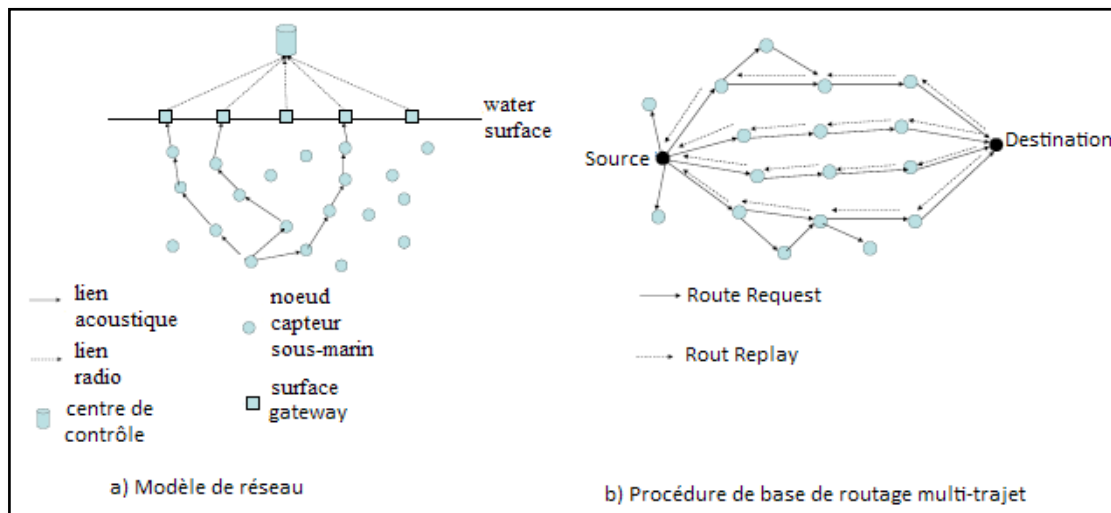


Figure II.6 Architecture du réseau utilisé dans le protocole de routage MPT

V.3 Protocoles basés sur des clusters

Dans la communication par groupe, les messages sont transmis à des entités abstraites ou groupes, les émetteurs n'ont pas besoin de connaître les membres du groupe destinataire. La gestion des membres d'un groupe permet à un élément de se joindre à un groupe, de quitter ce groupe, de se déplacer ailleurs puis rejoindre le même groupe. C'est en ce sens que la communication de groupe assure une indépendance de la localisation, ce qui la rend

parfaitement basées sur les groupe. Le concept de groupe facilite les taches de la gestion du routage (telles que les transmissions des paquets, l'allocation de la bande passante etc.) et cela en décomposant le réseau en un ensemble de groupes connecté.

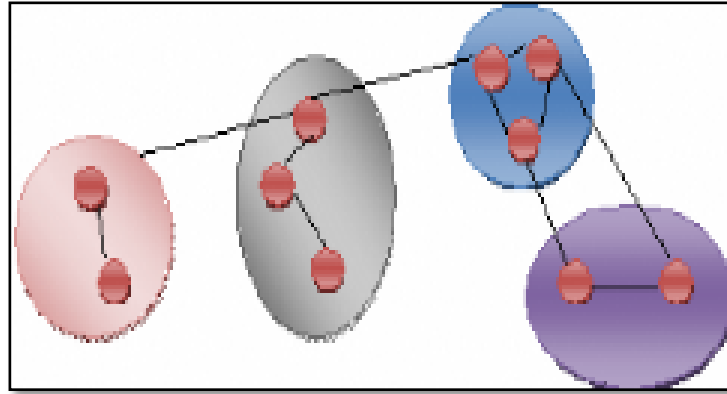


Figure II.7 La décomposition du réseau en clusters

V.3.1 DUCS (Distributed Underwater Clustering Scheme):

DUCS ne nécessite aucune information de localisation et basé sur une approche distribuée. Le protocole fonctionne en deux phases: dans la première phase (phase setup) les groupes sont formés où le nœud cluster-head et les nœuds membre du cluster sont sélectionnés. Dans la deuxième phase (phase steady) les paquets de données sont transmis. Dans la phase d'installation, chaque nœud a la probabilité de devenir un cluster-head, un nœud calcule son énergie résiduelle et sur la base de ce calcul, la probabilité d'un nœud de devenir un cluster-head est déterminée.

La probabilité d'un nœud à devenir un cluster-head se trouve au sein d'un certain seuil, ce nœud s'annonce comme cluster-head. Par conséquent, les nœuds non cluster-head envoient un message join-request au plus proche cluster-head.

Le nœud du cluster-head, lors de la réception des messages join-request, enregistre ces voisins et calcule un programme de transmission. Ce programme est basé sur le délai de propagation entre le cluster-head et ses membres du cluster.

Dans le protocole proposé, pour faire face à la mobilité des nœuds, une phase de maintenance est utilisée. Pendant cette phase, 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 de plus de (50%) du délai initial, ce nœud ré-estime ses distances vers chaque cluster-head. Tous les cluster-head sont pris en considération, de cette façon le cluster-head le plus proche est encore une fois sélectionné.

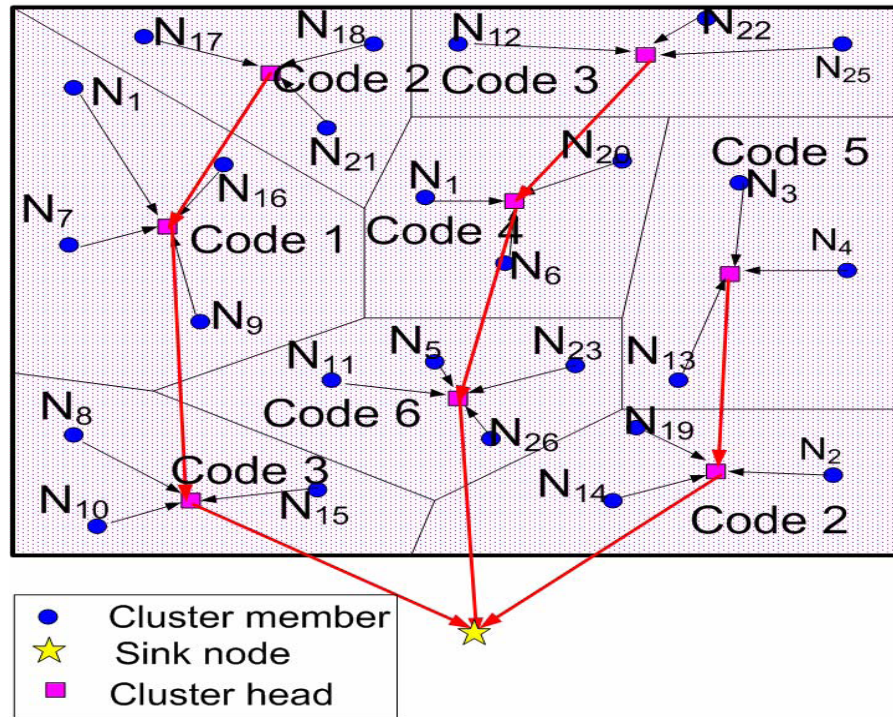


Figure II.8 Exemple réseau avec DUCS

V.3.2 MCCP (Minimum Cost Clustering Protocol):

MCCP (minimum cost clustering protocol) [46] est un protocole qui se base sur le 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 le puits, et l'énergie résiduelle du cluster-head et les membres du cluster.

Dans cette approche, un algorithme MCCA (minimum cost clustering algorithm) est proposé, où le cluster est sélectionné par une approche centralisée. Une unité de commande centralisée (un puits 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 ci-dessus. L'algorithme MCCA est étendu à une approche distribuée où MCCP est proposé.

Dans MCCP, la formation des clusters est effectuée d'une manière distribuée. Initialement, tous les nœuds peuvent être un cluster-head ou des membres du cluster. Un nœud cluster-head construit ses voisins fixes pour former un cluster. Ensuite, le coût du

cluster sélectionné est calculé en fonction des paramètres mentionnés ci-dessus. Le coût du cluster calculé est alors diffusé en direction de ses voisins de deux sauts.

A la réception du coût calculé, les autres cluster-head compare leur propre coût avec le coût du cluster reçu. Dans le cas où le nœud émetteur a un meilleur coût, ces nœuds extraire l'ID du cluster-head à partir du paquet reçu et envoient un message JOIN. Considérant que, si un nœud cluster-head a un coût minimum par rapport aux autres nœuds, ce nœud diffus d'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 et le transmet à ses membres.

Dans le protocole proposé afin d'éviter les hot-spots à proximité des sinks, d'autres clusters sont formées. Les clusters près de sink contiennent moins de nombre 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 les nœuds des membres change lors de la formation des nouveaux clusters.

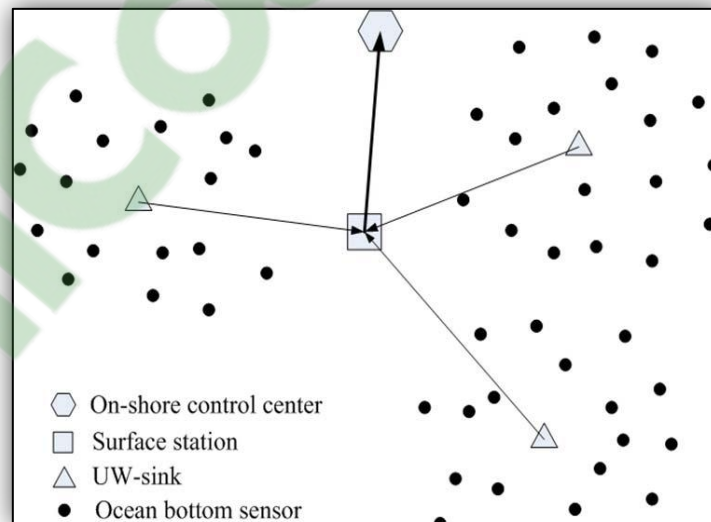


Figure II.9 Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP

V.4 Divers

V.4.1 Protocole de routage Adaptatif :

Le protocole proposé [47] est basé sur une nouvelle approche qui assigne des priorités aux paquets. Les priorités sont attribuées sur la base des caractéristiques des données détectées et le statut du réseau.

Plus précisément, la priorité d'un paquet est basé sur :

- le niveau d'urgence: l'importance des données,
- l'âge de paquets détectés: le temps passé par le paquet dans le réseau,
- la densité des nœuds,
- le niveau de la batterie de nœud: le niveau de l'énergie résiduelle d'un nœud.

Quand un paquet est généré, la priorité du paquet est calculée. La priorité calculée est associée à une valeur comprise entre 0 et 100, où 0 représente la plus faible priorité d'un paquet et 100 représentent la priorité la plus élevée. En outre, sur la base de la valeur de priorité du paquet, un état d'acheminement est calculé.

Généralement, il existe quatre états de routage basé sur la valeur de priorité [0, 25], [25, 50], [50, 75] et [75,100], par exemple, la valeur de priorité 45 montre que le paquet de routage se trouve dans l'état 2.

En se basant Sur l'état de routage, un nœud i envoie une copie du paquet où $0 < i < 4$. En outre, pour un état d'acheminement, une zone correspondant est choisi appelée la zone de transfert. La taille de chaque zone d'acheminement est prédéterminée par exemple pour la transmission de la zone 1, 2, 3, 4 le rayon correspondant est respectivement $R / 2$, $R / 2$, $3R / 4$ et R respectivement [47].

Le paquet est transmis à la zone de transfert correspondant, en général, une priorité plus élevée (un état de routage plus grand) correspond à une zone de transfert plus important. Figure II.10 illustre le schéma adaptatif proposé, où A est le nœud de transfert actuel. Le paquet est transmis vers le nœud B, puisque, B est dans la zone de transfert $R / 2$ et dans ce cas la, le paquet a la valeur de priorité 45.

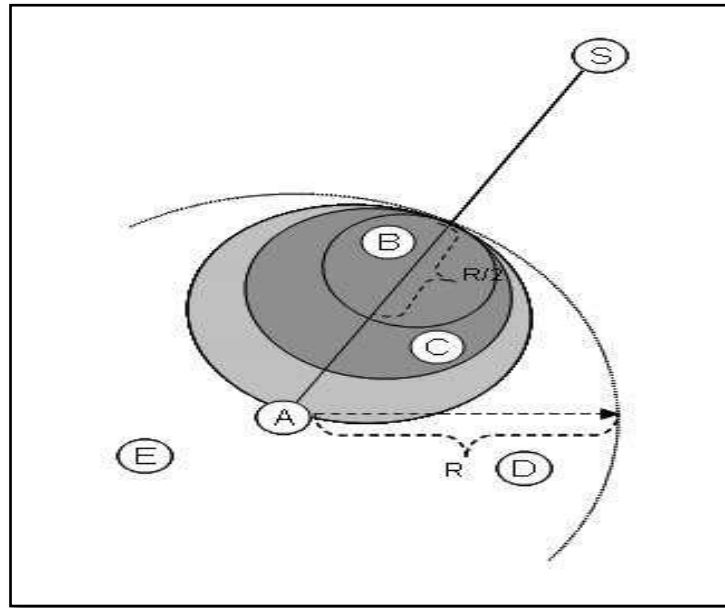


Figure II.10 Protocole de routage adaptatif

V.4.2 ICRP (Information Carrying based Routing Protocol):

ICRP (Information Carrying based Routing Protocol) [48] est un protocole réactif et non-géographique. Dans le protocole proposé considère la mobilité de la source et la destination, Le mécanisme réactif est utilisé de telle sorte qu'aucun paquet explicite RREQ n'est transmis. Au lieu de cela, un chemin d'accès est établi par la diffusion du paquet de données (qui agit également en tant que paquet RREQ). Initialement, le nœud source diffuse le paquet des données et les nœuds intermédiaires retransmettre le paquet reçu. Lors de la réception du paquet, la destination envoie une réponse qui suit le chemin enregistré au cours de l'envoi du paquet des données. Ainsi, une route depuis la source vers la destination est créée sans exploiter un paquet RREQ explicite.

Dans ICRP, pour la maintenance d'un chemin créé, les nœuds impliquent une table de routage dans ce chemin. En outre, la voie créée a un seuil de temps soit TIMEOUT. À l'expiration du timeout d'une route, les nœuds suppriment les entrées correspondantes de la route de leurs tables. Ensuite, le processus de découverte de route s'effectue à nouveau par la diffusion du paquet de données. Dans ce protocole l'application de la collection des données est prise en compte. Les capteurs transmettent le paquet de données sur une base d'intervalle. Pour la conservation d'énergie, les capteurs désactivent leurs émetteurs-récepteurs jusqu'à l'intervalle suivant.

VI. Comparaison entre les protocoles étudiés

La conception de chaque protocole fait une suite à certains objectifs c'est à dire réduire la consommation d'énergie, améliorer la latence de communication, assurer la robustesse et l'évolutivité, etc. Ce Tableau donne une comparaison entre les protocoles étudiés dans ce chapitre en terme du : Taux de délivrance, Délai de bout en bout, efficacité énergétique, Localisation.

Protocole	L'approche de routage	Taux de délivrance	Délai de bout en bout	Efficacité énergétique	Localisation
FBR	Basé sur Inondations (vecteur)	Moyen	Elevé	Moyen	Oui
DBR	Basé sur Inondations (profondeur)	élevé	Moyen	Moyen	Partielle
Winston et al. scheme	Basé sur multi-trajet	Moyen	Faible	Moyen	Non
MPT	Basé sur multi-trajet	Moyen	Elevé	Moyen	Non
DUCS	Basé sur Clustering (distribué)	Moyen	Elevé	Elevé	Non
MCCP	Basé sur Clustering (distribué)	Faible	Elevé	Elevé	Oui
Adaptive	Basé sur la priorité	Flexible	Flexible	Flexible	Oui
ICRP	Basé sur multi-trajet	Moyen	Elevé	Faible	Non

Tableau II.1 comparaison entre les protocoles de routage étudiés

VII. Discussion sur les performances des protocoles

Les approches basées sur les inondations sont simples et aussi sont caractérisés par un délai de bout-en-bout acceptable et un faible overhead. Par conséquent, ils sont convenables pour des applications sensibles en termes de délai. En outre, la plupart de ces protocoles utilisent une approche basée sur le conflit qui nécessite moins de nombre de transmissions, donc ces protocoles sont économes en termes d'énergie. Toutefois, l'existence d'une zone vide (void) (locale maximale) limite l'applicabilité des approches basées sur les inondations. Par conséquent, des solutions efficaces sont nécessaires pour éviter le problème de locale maximale. En outre, ces protocoles sont principalement basés sur la localisation, qui est elle-même un problème majeur dans les réseaux de capteurs sous-marins.

Les protocoles utilisant la stratégie des transmissions à travers multi chemin fournissent la robustesse et la fiabilité, et ces protocoles ont également des faibles délais de bout en bout. La robustesse est obtenue à l'aide du coût des transmissions répétitives. Les répétitions inutiles limitent les performances de ces protocoles. En outre, la complexité de maintenir plusieurs chemins augmente la charge de traitement. Ainsi, des solutions efficaces sont nécessaires pour éviter les répétitions. En cas de succès de livraison des paquets de données, la transmission de ces paquets à travers les mêmes trajets multiples doit être évitée.

Les protocoles basés sur l'approche du clustering, si on les compare à d'autres types de protocoles, sont très complexes en termes de charge de traitement. En outre, le coût du re-clustering influence sur la performance du protocole, la période de re-clustering nécessite une importante considération. Au lieu d'une période fixe, un critère adaptatif selon la mobilité des nœuds est nécessaire.

Dans la catégorie diverse, le protocole adaptatif [47] fournit une diversité d'applications avec des exigences différentes. Cependant, la performance du protocole pourrait subir en cas d'indisponibilité des nœuds dans la région (la zone sélectionnée sur la base de la priorité du paquet).

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la notion et les problèmes de routage dans les réseaux de capteur sous-marins. Le problème de routage est loin d'être évident dans cet environnement, où ce dernier impose de nouvelles limitations par rapport aux environnements classiques. Les stratégies de routage doivent tenir compte des changements fréquents de la topologie, de la limitation de la bande passante.

Finalement, nous avons présenté une classification des protocoles de routage et quelques exemples, une comparaison entre eux et discussion sur leurs performances.

I Introduction

Après avoir étudié les réseaux de capteurs sous-marins et ses caractéristiques, ainsi on a présenté plusieurs protocoles de routage à travers les chapitres précédents, nous allons étudier dans ce chapitre un protocole de routage spécifique à ce type de réseaux. On éte focalisés sur le protocole VBF (Vector-based forwarding) qui est le premier protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs mobiles sous-marins.

La contrainte énergétique est un facteur crucial dans ces réseaux, puisque les nœuds sont alimentés généralement par des batteries, et il est difficile, voire impossible de les recharger dans la plupart des scénarios d'application. Dans les réseaux de capteurs sous-marins, en plus de l'économie d'énergie, les algorithmes de routage doivent être capables de gérer la mobilité des nœuds d'une manière efficace. VBF vise à répondre à ces exigences avec succès et peut être plus efficace pour ces réseaux avec une mobilité des nœuds petite ou moyenne entre (1m/s - 3m/s).ainsi, il est assumé que les informations de localisation de chaque capteur peuvent être obtenues grâce à un service de localisation, ce qui est un autre problème difficile dans les UWSN. [49, 50, 51, 52].

II Choix du protocole

Après l'étude des différentes classes des protocoles de routage existant dans les réseaux de capteur sous-marins, nous sommes intéressés dans ce chapitre à choisir un. Ce protocole doit être adapté à ce genre de réseaux, et d'avoir un bon comportement dans différentes situations.

Notre choix s'est porté sur VBF (Vector-based forwarding). Vue la disponibilité de ses codes sources sur Internet, son bon comportement en terme de délai de transmission, VBF c'est un protocole géographique, donc il n'introduit pas beaucoup d'overhead de communication surtout, quand le nombre de nœuds est important [53]. Notre choix semble donc approprié.

III Présentation du protocole de routage VBF Vector-based forwarding

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 [54, 55, 56, 57,58]. 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 acoustique 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.

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 III.1 illustre l'idée principale de VBF, le nœud S_1 est la source, et le nœud S_0 est le sink. Le vecteur de routage est spécifié par $\overrightarrow{S_1S_0}$. Les paquets des données sont transmis de S_1 à S_0 . 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).

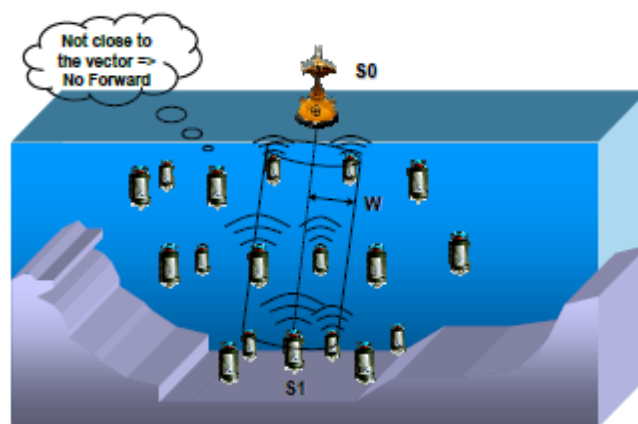


Figure III.1 Topologie du protocole VBF pour les UWSN.

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.

IV Décision de routage

Dans le protocole VBF, chaque paquet est constitué de simples informations de routage, il existe trois champs de position, OP, TP et FP, soit les coordonnées de l'émetteur, le destinataire et le nœud intermédiaire respectivement. Afin de gérer la mobilité des nœuds, chaque paquet contient un champ RANGE. Quand un paquet atteint la zone spécifiée par son TP, ce paquet est inondé dans une zone contrôlée par le champ RANGE. Le chemin de transmission est spécifié par le vecteur de routage à partir de l'émetteur vers le récepteur. Chaque paquet comporte également un champ RADIUS, qui est un seuil prédéfini utilisé par le nœud pour déterminer s'il est suffisamment proche au vecteur de routage et éligible pour la transmission du paquet.

- **Les types de requêtes envoyés par le protocole VBF :**

Il existe deux types de requêtes utilisées par le protocole VBF

- Requête dépendante de la localisation : Dans ce cas, le sink s'est intéressé à connaître l'emplacement d'un domaine spécifique.
- Requête indépendante de la localisation : Cette requête est envoyée par le sink lorsqu'il veut collecter un certain type de données spécifique indépendantes de son localisation.

- ❖ *Requête de transmission :*

- pour les requêtes dépendantes de la localisation, le sink s'est intéressé dans un domaine spécifique, il émet une requête INTEREST, qui porte les coordonnées de sink et la cible dans le système de coordonnées basé-sink. Chaque nœud qui reçoit ce paquet calcule sa propre position et la distance au vecteur de routage. Si la distance est inférieure à RADIUS (le seuil de distance), alors ce nœud met à jour le champ FP du paquet et le transmet, sinon, il ignore ce paquet.
- Pour les requêtes dépendant de la localisation, le paquet INTEREST peut porter quelques positions invalides de la cible. Pour éviter ce problème, à la réception du paquet, le nœud doit vérifier tout d'abord les données intéressées par le sink. Si c'est le cas, le nœud calcule sa position dans le système de coordination basé-sink, qui génère les paquets des données et les renvoie au sink. Dans le cas contraire, il met à jour le champ FP du paquet et le transmet.

❖ *Requête initié par la Source*: Dans certains scénarios d'application, la source peut initier le processus de requête. VBF supporte également la requête initié par la Source.

Si une source détecte des événements et souhaite informer le sink, il diffuse tout d'abord un paquet DATA- READY. Dès la réception de ce paquet, chaque nœud calcule sa propre position dans le système de coordonnées basée-source, met à jour le champ FP et transmet le paquet. Une fois que le sink reçoit ce paquet, il calcule sa position dans le système de coordonnées basée-source et transforme la position de la source dans son propre système de coordonnées, ensuite le sink peut décider s'il est intéressé par ces données, si c'est le cas, il peut envoyer un paquet INTEREST pour la région où réside la source.

V La manipulation de la Mobilité de la Source

Puisque le nœud source est mobile, son emplacement calculé en fonction de l'ancien paquet INTEREST ne pourraient pas être exacts. Si aucune mesure n'est prise pour corriger la position de la source, le chemin de transmission actuelle peut être obtenu loin de celui attendu, l'approche suivante a été proposée pour résoudre ce problème.

La source continue d'envoyer des paquets au puits, et le sink peut utiliser les informations de positions de la source transportées dans les paquets afin de déterminer si la source se déplace hors la portée de la cible. Par exemple, si le sink calcule sa position en tant que $P_C = (x_c, y_c, z_c)$ basée sur les coordonnées de la source, $P_{source} = (x_{source}; y_{source}; z_{source})$, et sa position réelle est $P = (x, y, z)$, ensuite le sink peut calculer sa position relative à la source en tant que $(\delta x, \delta y, \delta z) = (x_c - x_{source}; y_c - y_{source}; z_c - z_{source})$. Par conséquent, la position réelle de la source est $P'_{source} = (x - \delta x, y - \delta y, z - \delta z)$. En comparant P_{source} et P'_{source} , le puits peut décider si la source se déplace hors de la portée de la zone intéressée. Si c'est le cas, le puits transmet le paquet SOURCE_DENY à la source en utilisant P'_{source} . Une fois la source reçoit tels paquets, elle arrête d'envoyer des données. Au même temps, le sink initie une nouvelle requête INTEREST et trouve une nouvelle source.

VI L'algorithme d'auto-adaptation utilisé par VBF

Dans VBF, tous les nœuds assez proches au vecteur du routage sont qualifiés pour transmettre les paquets. Le protocole est simple et introduit peu de surcharge sur le calcul.

Toutefois, lorsque les nœuds sont densément déployés, VBF peut impliquer plusieurs nœuds dans le transfert de données, ce qui augmente la consommation d'énergie.

Ainsi, il est souhaitable d'ajuster la stratégie de transfert en fonction de la densité de nœud. En raison de la mobilité des nœuds dans le réseau, il est impossible de déterminer la densité globale des nœuds. D'autre part, il est inapproprié de mesurer la densité au niveau des extrémités de transmission (l'émetteur et la cible) en raison de la faible vitesse de propagation des signaux acoustiques. Un algorithme d'auto-adaptation pour VBF est proposé pour permettre à chaque nœud d'estimer la densité dans son voisinage (basé sur des informations locales) et transmet les paquets d'une manière adaptative.

- Facteur Désirable α : la notion du facteur désirable est introduite pour mesurer la concordance d'un nœud à transmettre les paquets.

Définition : Etant donné un vecteur de routage $\overrightarrow{S_1S_0}$, où S_1 est la source et S_0 est le sink, pour le nœud intermédiaire F , le facteur désirable VBF α , d'un nœud A , est définie comme suit :

$$\alpha = \frac{p}{W} + \frac{(R - d \times \cos \vartheta)}{R}$$

- P : est la distance entre le nœud A et le vecteur de routage $\overrightarrow{S_1S_0}$,
- d : est la distance entre le nœud A et le nœud F ,
- ϑ : est l'angle entre le vecteur $\overrightarrow{FS_0}$ et le vecteur $\overrightarrow{FA}$.
- R : est le rayon d'émission
- W : est le rayon de la pipe de routage (le seuil de distance).

La Figure III.2 présente les différents paramètres utilisés dans la définition du facteur désirable.

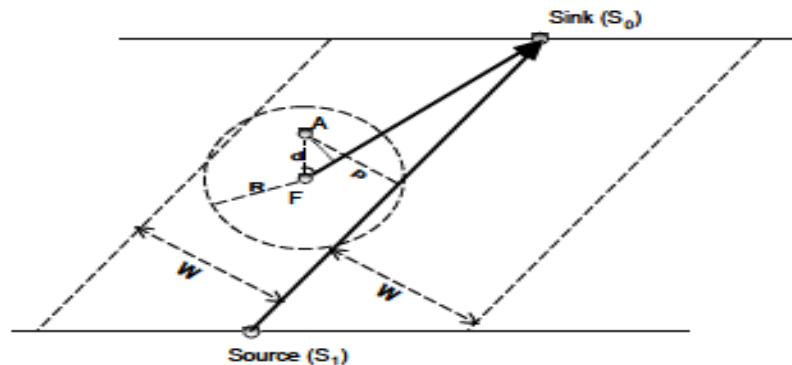


Figure III.2 Facteur Désirable α

D'après la définition, nous voyons que pour n'importe quel nœud assez proche au vecteur de routage, $0 \leq p \leq W$, le facteur désirable de ce nœud est dans la plage de $[0, 3]$. S'il est supérieur, cela signifie qu'il n'est pas souhaitable pour ce nœud de continuer à transférer le paquet. D'autre part, si le facteur désirable d'un nœud est égal à 0, alors ce nœud se trouve sur le vecteur de routage et le bord de la portée de transmission du nœud intermédiaire. Ce nœud est appelé le nœud optimal, et sa position est la meilleure position. Pour tout nœud intermédiaire, il y a plus d'un nœud optimal et une meilleure position. Si le facteur désirable d'un nœud est proche à 0, cela signifie que ce nœud est proche de la meilleure position.

• L'algorithme d'auto-adaptation

Un algorithme d'auto-adaptation basée sur le concept de facteur désirable (qui comporte les critères permettant de mesurer la capacité d'un nœud à transmettre les paquets). Cet algorithme a pour objectif de sélectionner les nœuds les plus désirables pour la transmission des données.

Dans cet algorithme, lorsqu'un nœud reçoit un paquet, il détermine tout d'abord si le nœud est suffisamment proche au vecteur de routage. Si c'est le cas, alors le nœud garde le paquet pour une période de temps liée à son facteur désirable. Chaque nœud qualifié par la transmission envoie le paquet après un intervalle de temps $T_{\text{adaptation}}$, qui est calculé comme suit:

$$T_{\text{adaptation}} = \sqrt{\alpha} \times T_{\text{delay}} + \frac{R-d}{v_0} \quad (1)$$

- T_{delay} : un délai maximal prédéfini
- v_0 : la vitesse de propagation des signaux acoustiques dans l'eau 1500 m/s
- d : la distance entre ce nœud et le nœud intermédiaire.

Pendant la période $T_{\text{adaptation}}$, si un nœud reçoit des paquets dupliqués à partir d'autres nœuds N , alors ce nœud doit calculer les facteurs désirables relatifs à ces nœuds, $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, et le nœud intermédiaire original, α_0 . Si $\min(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) < \alpha_c/2^n$, ce nœud transmet le paquet, sinon, il rejette le paquet. (α_c est une valeur initiale prédéfinie du facteur désirable ($0 \leq \alpha_c \leq 3$)).

• Analyse

L'algorithme d'auto-adaptation donne une grande priorité au nœud désirable pour continuer la diffusion du paquet, et il permet également au nœud moins désirable d'avoir

des chances de réévaluer son importance au voisinage. Après avoir reçu les mêmes paquets de ses voisins, le nœud le moins désirable peut mesurer son importance par le calcul de son facteur désirable par rapport à ses voisins. S'il y a plusieurs nœuds plus désirables, la probabilité de transmission du nœud est réduite de manière exponentielle. Cela signifie qu'il est inutile pour ce nœud de transmettre le paquet tandis que nombreux d'autres nœuds plus désirables ont transmis le paquet. En fait, si un nœud reçoit plus de deux paquets dupliqués pendant son temps d'attente, il est plus probable que ce nœud ne pourra pas transmettre le paquet quel que soit la valeur initiale α_c . De cette façon, nous pouvons réduire la surcharge de calcul en passant par la réévaluation du facteur désirable.

A partir de l'équation (1), nous pouvons voir que le nœud optimal ne reporte pas le transfert des paquets dans l'algorithme d'auto-adaptation. Ainsi, nous avons le lemme suivant.

Lemme : S'il existe un chemin optimal de l'émetteur vers la cible, alors l'algorithme d'auto-adaptation choisit cette voie et ne comporte aucun délai.

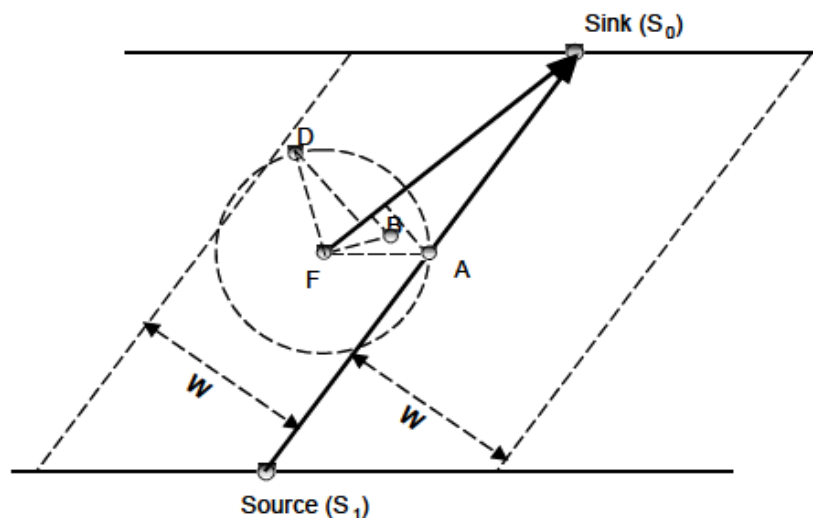


Figure III.3 VBF avec l'algorithme d'auto-adaptation

Dans la Figure III.3 nous illustrons VBF avec auto-adaptation, le chemin de transmission est défini comme un vecteur de routage $\overrightarrow{S_1S_0}$ de la source S_1 vers le sink S_0 . Le nœud F est le nœud intermédiaire actuel. Il y a trois nœuds A, B et D dans la portée de transmission. Le nœud A a le plus petit facteur désirable. Ainsi, A possède le délai le plus court et c'est le premier qui envoie le paquet. Comme le montre cette Figure, le nœud B est plus susceptible de jeter le paquet car il est dans la portée de transmission de A et il doit

réévaluer son importance d'envoyer le paquet. Le nœud D est hors de la portée de transmission de A, par conséquent, il a également transmet le paquet.

VII Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole VBF (Vector-Based Forwarding), d'après l'étude théorique en constate que VBF est évolutive, robuste et économe en énergie.

- Les paquets portent les informations du routage mais ne contient aucune information sur l'état du nœud. Ainsi, la taille du réseau peut être évolutive.
- Dans VBF, seuls les nœuds proches du vecteur de routage sont impliqués dans le transfert des données. Par conséquent, il est économe en énergie. De plus, l'algorithme d'auto-adaptation permet à un nœud à évaluer son importance dans sa région et donc d'ajuster sa politique de renvoi pour économiser plus d'énergie,
- VBF utilise la redondance des chemins (contrôlé par le rayon de routage pipe) pour fournir une protection robuste contre la perte de paquets et la défaillance des nœuds.

Pour évaluer les performances du protocole, nous présentons, dans le chapitre suivant, les résultats des simulations du protocole VBF, réalisées sur le simulateur Aqua-Sim basé NS2.

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous évaluons le protocole de routage VBF décrit précédemment. Une des caractéristiques principales de réseau de capteurs sous-marins visés est la taille de ce réseau. Le nombre important des capteurs nécessaires pour la couverture de l'espace surveillé et les principes du protocole de routage proposé constituent les arguments pour l'utilisation d'un simulateur afin d'évaluer le protocole VBF. Nous commencerons par une description du simulateur NS2 et Aqua-Sim que nous avons utilisé pour établir les simulations. Ensuite, nous montrerons les résultats des simulations et l'évaluation du protocole VBF selon trois métriques : l'énergie cumulée, le délai et le taux de perte.

II. Outils 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.

Il y a plusieurs simulateurs pour les réseaux de capteur sous-marins pour répondre aux attentes des utilisateurs. Parmi ces simulateurs, on peut citer:

➤ **NS-MIRACLE** est un ensemble de bibliothèques destinées à améliorer les fonctionnalités fournies par le simulateur de réseau NS2, pour gérer les messages inter-couche et en même temps permet la coexistence de plusieurs modules au sein de chaque couche de la pile de protocole. Le simulateur NS-MIRACLE facilite la mise en œuvre et la simulation des systèmes de communication modernes dans ns2; en raison de sa modularité, le code sera portable, réutilisable et extensible.

Mais l'installation de cette librairie prendra effet après la compilation patch qui a dû modifier un ensemble de fichier important de NS2 à savoir le Makefile, qui générerait suite à cela une erreur de compilation.

➤ **UAN-NS3** est un environnement et une base de code open source qui permettent de valider et d'optimiser les protocoles réseau tels que UWSN. Ainsi, UAN-NS3 simule des modèles réseau en temps réel (mode émulation) et peut échanger des paquets entre les nœuds simulés et les nœuds réels. Il permet aussi l'exécution directe de code existant

quasiment sans modification. Ce simulateur de réseau rassemble d'autre part une importante communauté de développeurs et est distribué sous licence libre.

➤ **Aqua-Sim** suit le style de conception orientée objet de NS-2, et toutes les entités du réseau sont mis en œuvre dans les classes en C++. Actuellement, Aqua-Sim est organisé en quatre dossiers, uw-common, uw-mac, uw-routing et uw-tcl. Les codes de simulation des capteurs sous-marins et du trafic sont regroupés dans le dossier uw-common, les codes de simulation des canaux acoustiques et des protocoles MAC sont organisés dans le dossier de uw-mac. Le dossier uw-routing contient tous les protocoles de routage. Le dossier uw-tcl comprend tous les exemples de scripts otcl pour valider Aqua-Sim.

III. Le choix de simulateur NS2

Nous avons opté pour le choix de NS2 comme outil de simulation de notre projet, car il dispose des modules spécifiques pour les réseaux de capteur et ses possibilités recouvrent la quasi-totalité des besoins formulés ; il est par ailleurs gratuit et bénéficie d'une large utilisation dans les recherches des réseaux.

IV. Simulateur NS-2

NS2 est un simulateur à événements discrets : l'ensemble des changements d'état du système simulé se produisent en des instants (sans durée) répartis sur un axe temporel. Par ailleurs, les simulations ne se font pas en temps réel. Le simulateur gère un temps propre sur lequel sont placés les différents événements.

Le traitement de ces derniers se fait dans l'ordre de placement sur l'axe temporel de la simulation et permet de séparer le passé (les événements déjà traités), le présent (l'événement en cours de traitement) et le futur (les événements restant à traiter). Les événements traités provoquent l'apparition de nouveaux événements dans le futur, ce qui reproduit les relations de causalité. La dissociation entre temps réel et temps de simulation, si elle a l'inconvénient d'empêcher une visualisation "directe" du fonctionnement du réseau, garantit néanmoins l'indépendance de la simulation vis-à-vis de la rapidité et de la puissance de calcul de l'ordinateur sur lequel elle est effectuée.

L'utilisation de NS2 pour un scénario donné nécessite schématiquement trois étapes :

La création de fichier de paramétrage. Ce fichier se présente sous la forme d'un script écrit dans le langage interprété TCL. Il décrit les différents aspects du scénario :

- le nombre et le déplacement des unités mobiles (appelées nœuds),
- le choix des différents protocoles pour chaque couche de chaque nœud,
- le nombre, le type et la durée de divers transferts de données entre ces nœuds,
- etc...

La simulation à proprement parler. Elle reproduit en interne le fonctionnement du scénario décrit précédemment et génère un *fichier de traces*. Ce dernier contient l'information jugée utile, écrite dans un format standardisé.

L'analyse du fichier de trace. Cette analyse peut être effectuée au moyen d'analyseurs syntaxiques ou d'outil de visualisation (comme le logiciel NAM, fournit avec NS2). Le contenu du fichier de trace consiste en une liste d'événements datés se produisant chronologiquement, à raison d'un événement par ligne. Les événements répertoriés dans le fichier de trace sont, à quelques exceptions près, de deux types : d'une part ceux concernant le déplacement des nœuds, d'autre part ceux concernant le parcours des différents types de paquets. C'est ce dernier type d'information qui s'avère le plus intéressant du point de vue de l'analyse du routage. Il permet de connaître à chaque fois qu'un paquet passe d'un à un autre ou passe - au sein d'un même nœud - d'une couche à une autre, le contenu de ses entêtes et des informations caractéristiques (identifiants, taille, etc...).

Ce simulateur est un logiciel libre de code source ouvert. C'est-à-dire on peut lui ajouter d'autres modules quand on en a besoin. Par exemple, on peut intégrer les modules de WiMAX, UMTS pour simuler les réseaux WiMAX, UMTS, module MannaSim pour simuler les RCSF, Aqua-sim pour simuler les UWSN ce dernier est bâti pour simuler et s'adapter aux réseaux de capteurs sous-marins. [59]

V. Aqua-Sim

Un simulateur de réseau, Aqua-Sim, est développé pour les réseaux de capteurs sous-marins. Aqua-Sim est basé sur NS-2, l'un des simulateurs de réseaux les plus utilisés, et il s'ensuit un modèle de conception orientée objet et toutes les entités du réseau sont mis en

œuvre dans les classes en C++. Aqua-Sim simule efficacement l'atténuation des canaux acoustiques sous-marins et les comportements de collision dans les réseaux acoustiques à long délai. Par ailleurs, Aqua-Sim prend en charge le déploiement du réseau en trois dimensions et fournit un ensemble de protocoles de base et avancées. A travers plusieurs études, Aqua-Sim peut se reproduire le monde réel avec une grande fidélité et flexibilité. Comme le montre la Figure IV.1 ci-dessous, Aqua-Sim est indépendant au package de simulation sans fil et n'est pas affectée par tout changement dans le package sans fil. D'autre part, toute modification de Aqua-Sim est également limité à lui-même et n'a pas d'impact sur autres packages dans NS2. De cette façon, Aqua-Sim peut évoluer indépendamment.

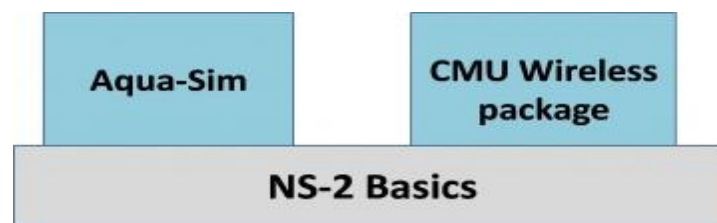


Figure IV.1 Relation entre Aqua-Sim et NS-2

Dans la Figure IV.2, l'objet "UnderwaterNode" est l'abstraction de capteur sous-marin. Il regroupe un grand nombre d'informations utiles sur le nœud telles que son emplacement et sa vitesse de déplacement. C'est un objet global et peut être consulté par n'importe quel objet dans Aqua-Sim. L'objet "UnderwaterChannel" représente le canal acoustique sous-marin. Il n'y a qu'un seul objet "UnderwaterChannel" dans le réseau et tous les paquets sont en attente ici avant d'être livré. L'objet "UnderwaterChannel" fournit également l'interface publique aux couches supérieures et ainsi l'objet dans la couche supérieure, comme un objet de couche de routage, peut facilement connaître les propriétés du canal. [60]

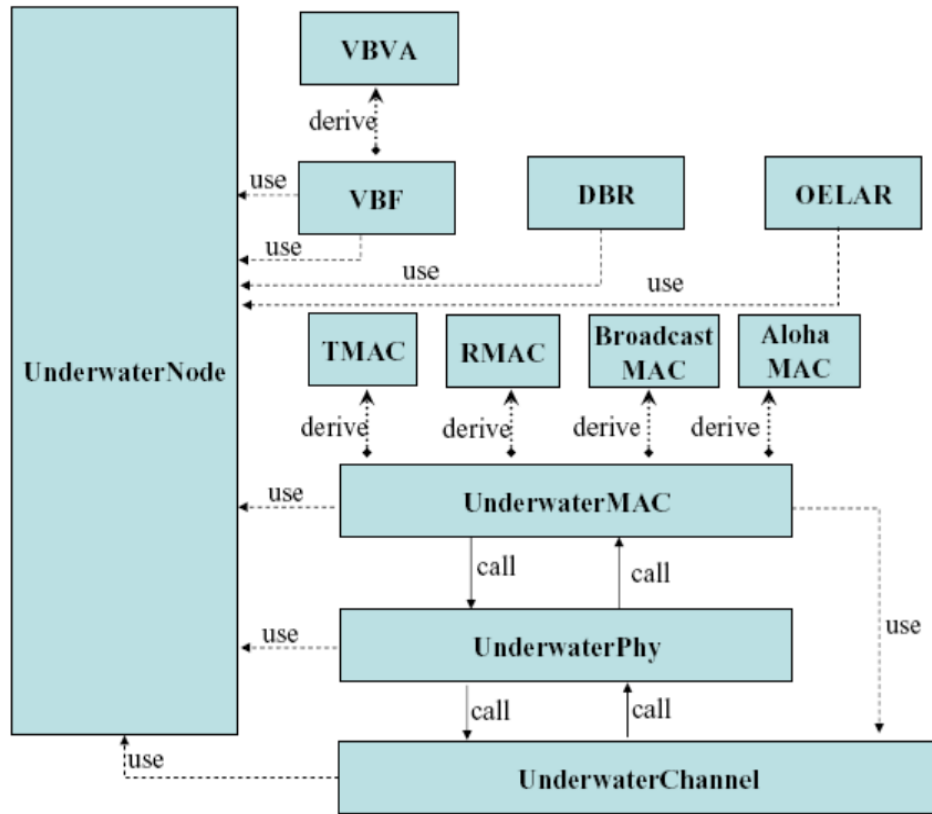


Figure IV.2 Architecture du simulateur Aqua-Sim

VI. Objectifs de la simulation

Le but général dans ce chapitre est d'analyser quelques propriétés des protocoles de routage sur le réseau de capteur sous-marin, VBF en particulier :

- Evaluer l'énergie cumulée.
- Evaluer le délai de transfert de paquet de donnée.
- Evaluer le taux de perte.

Ces métriques sont évaluées en fonction de la taille du réseau (changement du nombre de nœud dans le réseau).

VII. Métriques d'évaluation

Dans notre simulation, nous nous intéresserons essentiellement à la consommation d'énergie dans le réseau puisqu'elle constitue le paramètre le plus critique dans la détermination de la durée de vie d'un réseau de capteur et le temps dans lequel les paquets

arrivent à la destination, dans le but de montrer à quel point un protocole de routage est rapide à l'envoi des paquets de données en d'autre terme sa réactivité.

➤ **La métrique de l'énergie cumulée :**

L'énergie consommée dans tout le réseau est la différence entre l'énergie initiale et l'énergie résiduelle dans tous les nœuds.

➤ **La métrique du Délai de transfert des paquets vers le sink**

Le délai est le délai de bout-en-bout moyen pour chaque paquet reçu par le récepteur.

➤ **La métrique du taux de perte**

Le taux de perte est la différence entre le nombre de paquets reçus avec succès par le récepteur et le nombre de paquets générés par la source.

VIII. Méthodologie expérimentale

VIII.1 Création du modèle de simulation

Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres utilisés pour les simulations:

Paramètres du contexte de la simulation	
Nombre des nœuds	100, 200, 300, 400, 500, 600nœuds
Temps de simulation	200s
Energie Initiale	10000 joules
Topologie du réseau	200x200x200m
Les coordonnées de la source	170x170x200m
Les coordonnées du sink	30x30x0m
La portée de transmission	90m
Rayon de la pipe (width)	90m

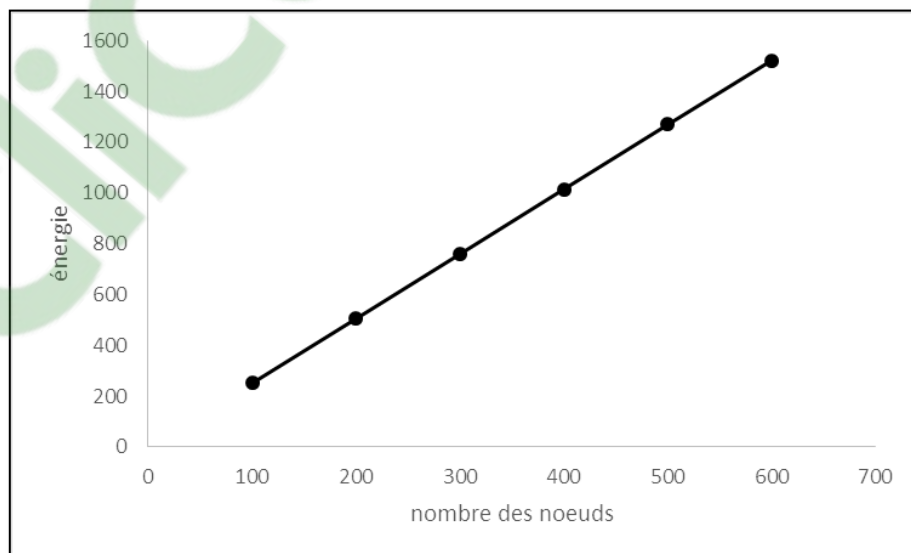
Environnement de simulation	
Machine	Pentium IV
Système d'exploitation	Mandriva
Simulateur	NS2.30

Tableau IV.1 Paramètres du contexte de la simulation

VIII.2 Etude de l'énergie cumulée

A partir des simulations réalisées par le simulateur Aqua-Sim, nous avons tracés les courbes relatives à la l'énergie cumulée. (Voir Tableau IV.2)

Nœuds	100	200	300	400	500	600
Energie (joule)	251,45	505,26	759,81	1014,98	1269,52	1522,04

Tableau IV.2 L'énergie cumulée (en joule) par les nœuds**Figure IV.3** L'énergie consommée cumulée en fonction de la densité du réseau

- **Interprétation**

La Figure IV.3 illustre l'influence de la densité de réseau sur la quantité d'énergie consommée par le réseau. On remarque que la consommation d'énergie dépend de la densité du réseau (i.e. la taille du réseau), ceci paraît logique car lorsque le nombre de nœud augmente, de nouveaux nœuds sont déployés pour capter et transmettre les événements, et par conséquent plus d'énergie à consommer.

VIII.3 Etude du délai de transmission

Pour le même réseau, nous avons effectué une simulation afin de calculer le délai de transmission de bout en bout en fonction de la taille du réseau pendant 200s.

Nœuds	100	200	300	400	500	600
Délai (ms)	67,71	60,46	64,23	62,53	54,15	58,17

Tableau IV.3 Délai de transfert des paquets de données.

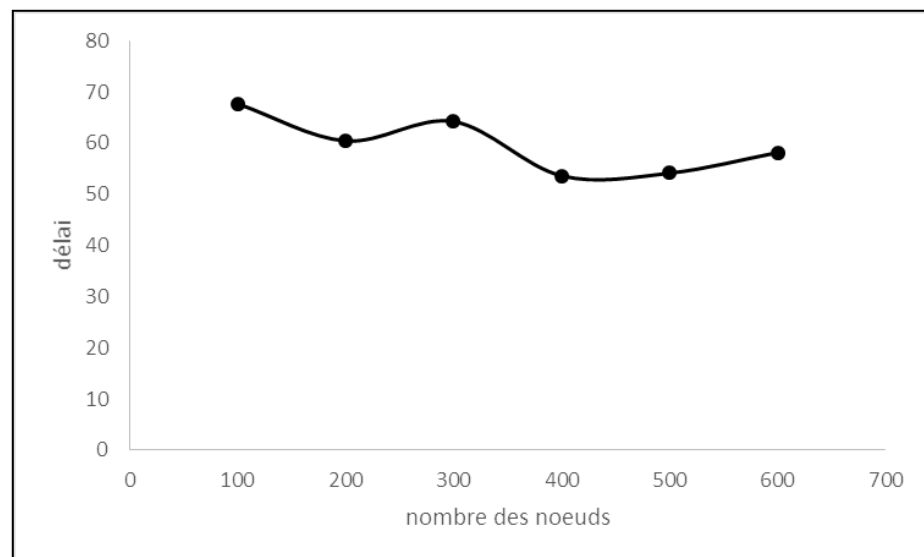


Figure IV.4 Délai de transfert des paquets en fonction de la taille du réseau

- **Interprétation**

Comme le montre la Figure IV.4, le délai était un peu élevée lorsque le nombre des nœuds était faible par exemple (100 nœuds), mais en augmentant la taille du réseau le délai commence à diminuer et cela implique que le chemin de la source vers la destination est plus proche de la trajectoire optimale, par conséquent le délai de bout en bout diminue.

VIII.4 Etude du taux de Perte

Cette simulation a été effectuée dans le but de mesurer le **taux de Perte en fonction du nombre des nœuds**.

Nœuds	100	200	300	400	500	600
Taux de perte	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0

Tableau IV. 4 Taux de Perte de transfert des paquets de données

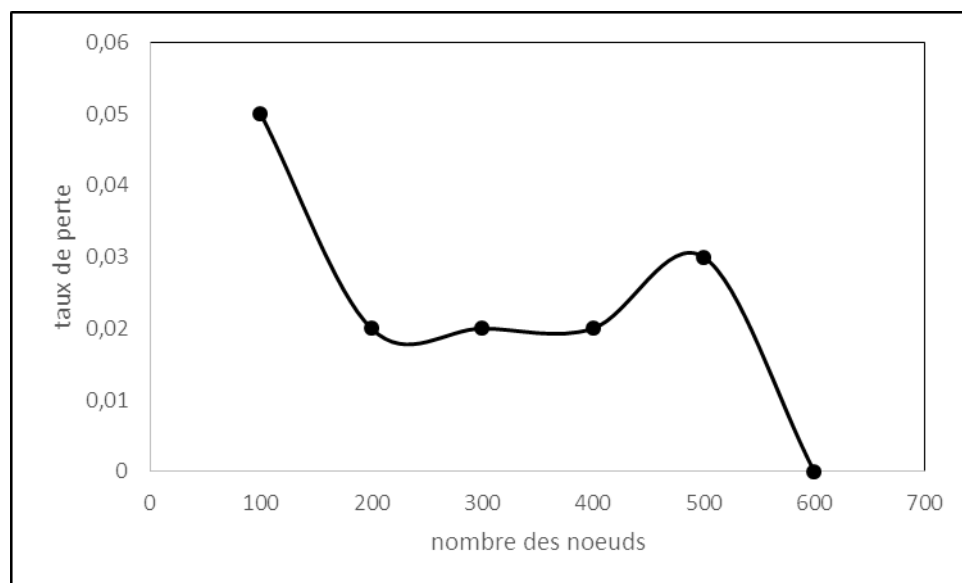


Figure IV.5 Le taux de perte en fonction du nombre des nœuds



- ***Interprétation***

La Figure IV.5 montre le taux de perte en fonction du nombre des nœuds. Lorsque la densité des nœuds est faible, le taux de perte est élevé. Toutefois, lorsque le nombre des nœuds augmente à 600, le taux de perte reste inférieur à 0.01%.

IX. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement de simulation avec lequel nous avons travaillé : simulateur NS2, Aqua-Sim et langages de programmation (TCL, OTCL). Nous avons également défini les paramètres de simulation ainsi que les métriques d'évaluation prise en compte dans notre étude.

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.

Suite à ces simulations, nous avons constaté clairement l'optimalité et l'efficacité du protocole VBF en termes d'énergie cumulée, délai de transfert et du taux de perte.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sous-marins constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant, il reste encore des nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles.

L'un des problèmes qu'on peut rencontrer dans ce genre de réseau est le routage. Cet aspect est fondamental pour ce genre de réseau caractérisé par l'absence d'infrastructure. Le routage se réalise en collaboration entre les différents nœuds du réseau. Un protocole de routage doit prendre en compte les contraintes matérielles d'un capteur : une batterie faible, une capacité de stockage modeste, une bande passante faible, etc.

Nous avons essayé à travers ce mémoire de faire le tour de ce phénomène qui touche les réseaux sans fil. Nous avons commencé par présenter les généralités qui entourent le domaine des UWSNs, puis nous avons focalisé notre étude sur la fonctionnalité de ces réseaux qui est le routage de données à partir des nœuds sources vers une station de base (sink), qui s'occupe des traitements spécifiques aux applications supportées.

Ensuite, nous avons étudié le protocole de routage VBF. Ce protocole résout le problème de la mobilité des nœuds d'une manière évolutive et économes en énergie. Afin de montrer le bon comportement du protocole proposé, nous avons réalisé des simulations. Nous avons utilisé le simulateur Aqua-Sim qui est développé pour les réseaux de capteurs sous-marins et basée sur NS2. Le protocole a été évalué selon trois métriques :

- l'énergie cumulée : défini comme la différence entre l'énergie initiale et l'énergie résiduelle de tous les nœuds.
- Le délai: est le délai de bout-en-bout pour chaque paquet reçu par le récepteur.
- Le taux de perte : est la différence entre le nombre de paquets reçus avec succès et le nombre des paquets générés par la source.

Les simulations ont montré que le délai diminue quand le nombre des nœuds augmente dans le réseau. Lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante, Le coût de l'énergie augmente du protocole de routage VBF. Le taux de perte diminue avec la densité des nœuds. Ces simulations ont également montré le bon comportement du protocole dans les réseaux à grande échelle.

Conclusion générale et perspective

Comme perspectives, nous proposons de développer ce travail, et surtout en prenant en compte d'autres métriques comme l'étude de transfert fiable des données et des problèmes de contrôle de congestion, qui sont très difficiles en raison des caractéristiques des UWSNs: délai élevé de bout en bout, une faible bande passante, et la probabilité d'erreur.

Nous espérons aussi ce mémoire servira de bon guide pour les promotions à venir.

Acronymes

AOA	Angle of Arrival
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CTS	Clear To Send
DBR	Depth-Based Routing
DUCS	Distributed Underwater Clustering Scheme
FBR	Focused Beam Routing
ICRP	Information Carrying based Routing Protocol
ISI	Inter-Symbol Interference
MCCA	Minimum Cost Clustering Algorithm
MCCP	Minimum Cost Clustering Protocol
MEMS	Microsystèmes Electriques et Mécaniques
MPT	Multipath Power-control Transmission
NS-2	Network Simulator-2
RCSF	Réseau de Capteur Sans Fil
RF	Radio Fréquence
RTS	Ready To Send ou Request To Send
TDMA	Time Division Multiple Access
ToA	Time of Arrival
UAN	Underwater Acoustique Network
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UWSN	Underwater Wireless Sensor Networks
VBF	Vector-Based Forwarding
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WSN	Wireless Sensor Network

I Installation des packages essentiels

Avant d'installer Aqua-Sim, il faut assurer que notre système Linux contient les bibliothèques essentielles pour l'installation de ns-allinone-2.30. Habituellement, il faut gcc/g++ compiler, automake, lib X11.

II Installation de Aqua-Sim

Tout d'abord, entrer dans le répertoire où se trouve Aqua-sim-1.0.tgz (supposons que le répertoire est ~/ aqua-sim). Ensuite, exécutez les commandes suivantes:

- ~/aqua-sim\$ tar zxvf aqua-sim-1.0.tgz
- ~/aqua-sim\$./install

A la fin de l'installation, ajouter la variable d'environnement suivante dans .bashrc dans le répertoire ~/Bashrc :

```
export NS_HOME=~ /aqua-sim
export PATH=$NS_HOME/bin:$NS_HOME/tcl8.4.13/unix:$NS_HOME/tk8.4.13/unix:$PATH
export LD_LIBRARY_PATH=$NS_HOME/otcl-1.12:$NS_HOME/lib:$LD_LIBRARY_PATH
export TCL_LIBRARY=$NS_HOME/tcl8.4.13/library:$TCL_LIBRARY
```

Ensuite, redémarrer le terminal ou utiliser "la source .bashrc" pour activer les nouvelles variables d'environnement.

Maintenant, on peut entrer « ns » dans la ligne de commande, et '%' s'affiche si l'installation est réussite.

```
$ ns
%
```


Code de simulation (script Tcl) :

```

set opt(chan)          Channel/UnderwaterChannel
set opt(prop)          Propagation/UnderwaterPropagation
set opt(netif)         Phy/UnderwaterPhy
set opt(mac)           Mac/UnderwaterMac/BroadcastMac
set opt(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue
set opt(ll)            LL
set opt(energy)        EnergyModel
set opt(txpower)       2.0
set opt(rxpower)       0.75
set opt(initialenergy) 10000
set opt(idlepower)     0.008
set opt(ant)           Antenna/OmniAntenna
set opt(filters)       GradientFilter      ;# options can be one or more of
;# TPP/OPP/Gear/Rmst/SourceRoute/Log/TagFilter
set opt(minspeed)      0      ;#minimum speed of node
set opt(maxspeed)      5      ;#maximum speed of node
set opt(speed)         1      ;#speed of node
set opt(position_update_interval) 0.1 ;# the length of period to update
node's position
set opt(packet_size)   60 ;#50 bytes
set opt(routing_control_packet_size) 20 ;#bytes
set opt(ifqlen)        50 ;# max queue length in if
set opt(nn)            100 ;# number of nodes
set opt(x)             200 ;# X dimension of the topography
set opt(y)             200 ;# Y dimension of the topography
set opt(z)             200
set opt(seed)          10
set opt(stop)          200 ;# simulation time
set opt(prestop)       90 ;# time to prepare to stop
set opt(tr)            "vbf_100.tr" ;# trace file
set opt(datafile)      "vbf_100.data"
set opt(nam)           "vbf_100.nam" ;# nam file
set opt(adhocRouting)  Vectorbasedforward
set opt(width)         90
set opt(interval)      10.0
set opt(range)         90 ;#range of each node in meters
if { $argc> 0 } {
set opt(seed) [lindex $argv 0]
set opt(nn) [lindex $argv 1]
set opt(datafile) [lindex $argv 2]
}
puts "the file name is $opt(datafile)"
puts "the sending interval is $opt(interval)"
# =====
LL set mindelay_      50us
LL set delay_         25us
LL set bandwidth_     0 ;# not used
Queue/DropTail/PriQueue set Prefer_Routing_Protocols 1

# unity gain, omni-directional antennas
# set up the antennas to be centered in the node and 1.5 meters above it
Antenna/OmniAntenna set X_ 0
Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
#Antenna/OmniAntenna set Z_ 1.5
Antenna/OmniAntenna set Z_ 0.05
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0
Agent/Vectorbasedforward set hop_by_hop_ 0

```

```

Mac/UnderwaterMac set bit_rate_ 50.0e4 ;#10kbps
Mac/UnderwaterMac set encoding_efficiency_ 1
Mac/UnderwaterMac/BroadcastMac set packetheader_size_ 0 ;# #of bytes
# Initialize the SharedMedia interface with parameters to make
# it work like the 914MHz Lucent WaveLAN DSSS radio interface
Phy/UnderwaterPhy set CPTresh_ 10 ;#10.0
Phy/UnderwaterPhy set CSTresh_ 0 ;#1.559e-11
Phy/UnderwaterPhy set RXThresh_ 0 ;#3.652e-10
#Phy/WirelessPhy set Rb_ 2*1e6
Phy/UnderwaterPhy set Pt_ 0.2818
Phy/UnderwaterPhy set freq_ 25 ;# 25khz
Phy/UnderwaterPhy set K_ 2.0 ;# spherical spreading
# =====
# Main Program
# =====
#
# Initialize Global Variables
#
#set sink_ 1
set ns_ [new Simulator]
settopo [new Topography]
$topoload_cubicgrid $opt(x) $opt(y) $opt(z)
$ns_ use-newtrace
settracefd [open $opt(tr) w]
$ns_ trace-all $tracefd
setnf [open $opt(nam) w]
$ns_ namtrace-all-wireless $nf $opt(x) $opt(y)

set data [open $opt(datafile) a]
settotal_number [expr $opt(nn)-1]
set god_ [create-god $opt(nn)]

$ns_ at 0.0 "$god_ set_filename $opt(datafile)"
set chan_1_ [new $opt(chan)]
globaldefaultRNG
$defaultRNG seed $opt(seed)

$ns_ node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    #-channelType $opt(chan) \
    -agentTrace OFF \
        -routerTrace ON \
        -macTrace OFF\
        -topoInstance $topo\
        -energyModel $opt(energy)\
        -txPower $opt(txpower)\
        -rxPower $opt(rxpower)\
        -initialEnergy $opt(initialenergy)\
        -idlePower $opt(idlepower)\
        -channel $chan_1_
puts "Width=$opt(width)"
#Set the Sink node

#node 0 is the sink

```

```

set node_(0) [ $ns_ node 0]
$node_(0) set sinkStatus_ 1
$god_ new_node $node_(0)
$node_(0) set X_ 30
$node_(0) set Y_ 30
$node_(0) set Z_ 0
$node_(0) set passive 1

setrt [$node_(0) set ragent_]
$rt set control_packet_size $opt(routing_control_packet_size)
set a_(0) [new Agent/UWSink]
$ns_ attach-agent $node_(0) $a_(0)
$a_(0) attach-vectorbasedforward $opt(width)
$a_(0) cmd set-range $opt(range)
$a_(0) cmd set-target-x 100
$a_(0) cmd set-target-y 50
$a_(0) cmd set-target-z 0
$a_(0) cmd set-filename $opt(datafile)
$a_(0) cmd set-packetsize $opt(packet_size) ;# # of bytes
Set xrand_ [new RandomVariable/Uniform]
$xrand_ set min_ 0
$xrand_ set max_ $opt(x)
setyrand_ [new RandomVariable/Uniform]
$yrand_ set min_ 0
$yrand_ set max_ $opt(y)
setzrand_ [new RandomVariable/Uniform]
$zrand_ set min_ 0
$zrand_ set max_ $opt(z)

for {set i 2} { $i< $opt(nn) } { increi } {
set node_($i) [ $ns_ node $i]
    $node_($i) set sinkStatus_ 1
    $node_($i) random-motion 1

    $node_($i) set max_speed $opt(maxspeed)
    $node_($i) set min_speed $opt(minspeed)
    $node_($i) set position_update_interval_ $opt(position_update_interval)

    $god_ new_node $node_($i)
    $node_($i) set X_ [$xrand_ value]
    $node_($i) set Y_ [$yrand_ value]
    $node_($i) set Z_ [$zrand_ value]
    $node_($i) set passive 1
    $node_($i) move
    setrt [$node_($i) set ragent_]
    $rt set control_packet_size $opt(routing_control_packet_size)

    set a_($i) [new Agent/UWSink]
    $ns_ attach-agent $node_($i) $a_($i)
    $a_($i) attach-vectorbasedforward $opt(width)
    $a_($i) cmd set-range $opt(range)
    $a_($i) cmd set-target-x 100
    $a_($i) cmd set-target-y 50
    $a_($i) cmd set-target-z 0
    $a_($i) cmd set-filename $opt(datafile)
    $a_($i) cmd set-packetsize $opt(packet_size) ;# # of bytes
}
#Set the source node
set node_(1) [$ns_ node 1]
$god_ new_node $node_(1)

```

Annexe B

```
$node_(1) set sinkStatus_ 1

$node_(1) set max_speed $opt(maxspeed)
$node_(1) set min_speed $opt(minspeed)
$node_(1) set position_update_interval_ $opt(position_update_interval)
$node_(1) set X_ 170
$node_(1) set Y_ 170
$node_(1) set Z_ $opt(z)
$node_(1) set-cx 170
$node_(1) set-cy 170
$node_(1) set-cz $opt(z)
setrt [$node_(1) set ragent_]
#$rt set control_packet_size $opt(routing_control_packet_size)
$ns_ at 2.0 "$node_(1) move"

set a_(1) [new Agent/UWSink]
$ns_ attach-agent $node_(1) $a_(1)
$a_(1) attach-vectorbasedforward $opt(width)
$a_(1) cmd set-range $opt(range)
$a_(1) cmd set-target-x 100
$a_(1) cmd set-target-y 50
$a_(1) cmd set-target-z 0
$a_(1) cmd set-filename $opt(datafile)
$a_(1) cmd set-packetsize $opt(packet_size) ;# # of bytes
$a_(1) set data_rate_ [expr 1.0/$opt(interval)]
# make nam workable
setnode_size 10
for {set k 0} { $k<$opt(nn)} {incr k} {
$ns_ initial_node_pos $node_($k) $node_size
}
set opt(stop2) [expr $opt(stop)+100]

puts "Node 1 is sending first!!"
$ns_ at 1.33 "$a_(1) cbr-start"
$ns_ at $opt(stop).001 "$a_(1) stop"
$ns_ at $opt(stop2).002 "$a_(1) terminate"

$ns_ at $opt(stop2).002 "$a_(0) terminate"

$ns_ at $opt(stop2).003 "$god_ compute_energy"
$ns_ at $opt(stop2).004 "$ns_ nam-end-wireless $opt(stop)"
$ns_ at $opt(stop2).005 "puts \"NS EXISTING...\"; $ns_ halt"

puts $data "New simulation...."
puts $data "nodes = $opt(nn), maxspeed = $opt(maxspeed), minspeed =
    $opt(minspeed), random_seed = $opt(seed),
    sending_interval_=$opt(interval), width=$opt(width)"
puts $data "x= $opt(x) y= $opt(y) z= $opt(z)"
close $data
puts "starting Simulation..."
$ns_ run
```

Bibliographies

- [1] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology, In Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Data communications in Latin America and the Caribbean, Apr. 2001.
- [2] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, and D. Culler, Wireless sensor networks for habitat monitoring, In Proceedings of the ACM Workshop on Sensor Networks and Applications, Atlanta, Georgia, USA, Sept. 2002.
- [3] D. Whang, N. Xu, S. Rangwala, K. Chintalapudi, R. Govindan, and J. Wallace, Development of an embedded sensing system for structural health monitoring, In Proceedings of the International Workshop on Smart Materials and Structures Technology, Jan. 2004.
- [4] N. Ramanathan, M. Yarvis, J. Chhabra, N. Kushalnagar, L. Krishnamurthy, and D. Estrin, A stream-oriented power management protocol for low duty cycle sensor network applications, In Proceedings of the IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, Sydney, Australia, May 2005.
- [5] Lanbo Liu, Shengli Zhou, and Jun-Hong Cui Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks, WILEY WCMC SPECIAL ISSUE ON UNDERWATER SENSOR NETWORKS (INVITED), pp. 977-994 July 2008
- [6] Mohamed Hamdi, Noureddine Boudriga, and Mohammad S. Obaidat. Whomoves: An optimized broadband sensor network for military vehicle tracking. *Int. J. Communication Systems*, 21(3):277-300, 2008.
- [7] Tibor Istvan Nagy and Jozsef Tick. Intelligent sensor networks in the military and civil sectors. In 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2009, Timisoara, Romania, May 28-29, 2009, pages 471-474. IEEE, 2009.
- [8] David M. Davenport, Budhaditya Deb, and Fergus J. Ross. Wireless propagation and coexistence of medical body sensor networks for ambulatory patient monitoring. In Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, BSN 2009, Berkeley, CA, USA, 3-5 June 2009, pages 41-45. IEEE Computer Society, 2009.
- [9] Mehmet R. Yuce, Peng Choong Ng, and Jamil Y. Khan. Monitoring of physiological parameters from multiple patients using wireless sensor network. *J. Medical Systems*, 32(5):433-441, 2008.
- [10] François Ingelrest, Guillermo Barrenetxea, Gunnar Schaefer, Martin Vetterli, Olivier Couach, and Marc Parlange. Sensorscope: Application-specific sensor network for environmental monitoring. *ACM Transactions On Sensor Networking*, 6(2):1-32, 2010.
- [11] Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Yue M. Lu, and Martin Vetterli. Assessing the challenges of environmental signal processing through the sensorscope project. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP 2008, March 30 - April 4, 2008, Caesars Palace, Las Vegas, Nevada, USA, pages 5149-5152. IEEE, 2008.
- [12] Guillermo Barrenetxea, François Ingelrest, Gunnar Schaefer, Martin Vetterli, Olivier Couach, and Marc Parlange. Sensorscope: Out-of-the-box environmental monitoring. In Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2008, St. Louis, Missouri, USA, April 22-24, 2008, pages 332-343. IEEE Computer Society, 2008.
- [13] Vassileios Tsetos, George Alyfantis, Tilemahos Hasiotis, Odysseas Sekkas, and Stathes Hadjiefthymiades. Commercial wireless sensor networks: Technical and business issues. In 2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Service (WONS 2005), 19-21 January 2005, St. Moritz, Switzerland, pages 166-173. IEEE Computer Society, 2005.

Références bibliographique

- [14] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, and V.Z. Groza. Sensor-based information appliances. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, vol.3, no.4, pp.31- 35, December 2000.
- [15] F.Schill1, R. Zimmer1, J. Trumpf, “Visible Spectrum Optical Communication and Distance Sensing for Underwater Applications”, National ICT Australia Ltd, ACRA 2004.
- [16] A. Bouzoualegh, “ modelisation et simulation des caracteristiques physiques d’un systeme de communication aquatique sans fil ”, Tunisie, SETIT 2007.
- [17] M.Tivey, P.Fucile, and E.Sichel, “A Low Power, Low Cost, Underwater Optical Communication System”, Ridge 2000 Events, 2004.
- [18] 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, Pages 319-326, Mai 2003.
- [19] E. Sozer, M. Stojanovic et JG. Proakis, “Design and Simulation of an Underwater Acoustic Local Area Network”, Communication and Digital Signal Processing Center, Northeastern University. In Proc. Oponetwork’99, Washington, DC, August 1999.
- [20] M.Stojanovic, “Recent advances in high rate underwater acoustic communication”, IEEE J.Ocean Eng.pp125-136, April 1996.
- [21] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov, “Fundamentals of Oceans Acoustics”, Springer, New York, 2001.
- [22] G. Zaibi, N. Nasri and A. Kachouri and M. Samet, “Survey Of Temperature Variation Effect On Underwater Acoustic Wireless Transmission”, ICGST International Journal on Computer Network and Internet Research, CNIR dec 2009.
- [23] M. Abdellaoui, N. Nasri, B. Gassara, A. Kachouri, M. Samet, T. Val, “Determination of the underwater channel characteristics to improve a multiband OFDM communication”, Applied Sciences Research 1(5): 431-443, 2006 ISSN 1819- 3579 © Academic Journals Inc, USA.
- [24] N.Nasri, A.Kachouri, L. Andrieux and M.Samet, “Surveys of design considerations for underwater networks”, 5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 22-26, 2009 –TUNISIA.
- [25] J.H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, Challenges: Building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications, IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking, pp. 12-18, 2006.
- [26] Manjula.R.B, Sunilkumar S. Manvi ,Issues in Underwater Acoustic Sensor Networks, International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.3, No.1, February, 2011
- [27] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, Underwater acoustic sensor networks: Research challenges, Ad Hoc Networks, pp. 257–279, 2005.
- [28] Ocean Engineering at Florida Atlantic University, Available from <<http://www.oe.fau.edu/research/ams.html>>.
- [29] N.N. Soreide, C.E. Woody, S.M. Holt, Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs, in: 16th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, January 2004.

Références bibliographique

- [30] D.L. Codiga, J.A. Rice, P.A. Baxley, Networked acoustic modems for real-time data delivery from distributed subsurface instruments in the coastal ocean: Initial system development and performance, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in press.
- [31] E.M. Sozer, M. Stojanovic, J.G. Proakis, Underwater acoustic networks, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1) (2000) 72–83.
- [32] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: A survey, *Computer Networks* 38 (4) (2002) 393–422.
- [33] E. Cayirci, H. Tezcan, Y. Dogan, V. Coskun, Wireless sensor networks for underwater surveillance systems, *AdHoc Networks*, in press; doi:10.1016/j.adhoc.2004.10.008.
- [34] AUV Laboratory at MIT Sea Grant, Available from <<http://auvlab.mit.edu/>>.
- [35] Second field test for the AOSN program, Monterey Bay August 2003, Available from <<http://www.mbari.org/aosn/MontereyBay2003/MontereyBay2003Default.htm>>.
- [36] J. Jalbert, D. Blidberg, M. Ageev, Some design considerations for a solar powered AUV: Energy management and its impact on operational characteristics, *Unmanned Systems* 15 (4) (1997) 26–31.
- [37] Ian F. AKYILDIZ, Mehmet Can VURAN, “Wireless Sensor Networks”, John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [38] Jose CECILIO, Joao COSTA, Pedro FURTADO, “Survey on Data Routing in Wireless Sensor Networks”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [39] Yonca Bayrakdar, Nirvana Meratnia, Aylin Kantarci, A comparative view of routing protocols for underwater wireless sensor networks.978-1-61284-4577-0088-0/11/\$26.00,2011IEEE.
- [40] S. KACI et N. KHOULALENE Proposition d'un protocole de routage avec différenciation de terminaux dans les réseaux ad hoc. Université A. Mira, Bejaia, Algérie, 2006.
- [41] M Jornet, M Stojanovic, M Zorzi, “Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks”, 3rd ACM conference WuWNet’08, 2008.
- [42] Hai Yan, Zhijie Shi, Jun-Hong Cui, “DBR: Depthbased Routing for Underwater Sensor Networks”, Springerlink NETWORKING, pp.16-1221, 2008.
- [43]Huang, C. J., Wang, W. Y., Shen, Y. H., Hu, W. K., Hsu, A. P., and Chang, Y. T. (2009). “A direction-sensitive routing protocol for underwater wireless sensor networks”, in *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, Taiwan, pp. 419-428.
- [44]Winston K.G. Seah, Hwee-Xian Tan, “Multipath Virtual Sink Architecture for Underwater Sensor Networks”, *IEEE OCEANS* 2006, pp. 1-6, 2006.
- [45] Zhong Zhou, Jun-Hong Cui, “Energy Efficient Multi- Path Communication for Time-Critical Applications in Underwater Sensor Networks”, *ACM MobiHoc’08*, pp. 221-230, 2008.
- [46] Pu Wang, Cheng Li, Jun Zheng, “Distributed Minimum-Cost Clustering Protocol for UnderWater Sensor Networks (UWSN)”, *IEEE International Conference on Communications ICC’07*, pp. 3510- 3515, 2007.
- [47] Zhen Guo, Gioele Colombi, Bing Wang, Jun-Hong Cui, Dario Maggiorini, Gian Paolo Rossi, “Adaptive Routing in Underwater Delay/Disruption Tolerant Sensor Networks”, *Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems WONS* 2008, pp. 31-39, 2008.

Références bibliographique

- [48] Wei Liang, Haibin Yu, Lin Liu, Bangxiang Li, Chang Che, “Information-Carrying baed Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Network”, International Conference on Mechatronics and Automation ICMA 2007, pp.729-734, 2007.
- [49] Liu, L., Zhou, S., and Cui, J. H. (2008). ‘Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks’, *Wireless Communications & Mobile Computing*, Vol. 8, October 2008, pp. 977-994.
- [50] Xie, P., Cui, H. J., and Lao, L. (2006). ‘Vbf: Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks’, in *Proceedings of IFIP Networking*, May 2006, pp. 228–235.
- [51] Yan, H., Shi, J. Z., and Cui, H. J. (2008). ‘DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks’, in *NETWORKING 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2008, pp. 72-86.
- [52] Cheng, X., Shu, H., Liang, Q., and Du, D. H.-C. (2008). “Silent positioning in underwater acoustic sensor networks”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 1756-1766.
- [53] S. Corsen and J. Macker. *Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Consideration (RFC 2501)*, January 1999.
- [54] T. C. Austin, R. P. Stokey, and K. M. Sharp. PARADIGM: A Buoy-based System for AUV Navigation and Tracking. In *IEEE Proceedings of Oceans*, 2000.
- [55] J. E. Garcia. Ad hoc Positioning for Sensors in Underwater Acoustic Networks. In *IEEE Proceedings of Oceans*, 2004.
- [56] N. H. Kussat, C. D. Chadwell, and R. Zimmerman. Absolute Positioning of an Autonomous Underwater Vehilce Using (GPS) and Acoustic Measurements. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1):153{164, Jan 2005.
- [57] Y. Zhang and L. Cheng. A Distributed Protocol for Multi-hop Underwater Robot Positioning. In *IEEE Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics*, August 2004.
- [58] Z. Zhou, J.-H. Cui, and S. Zhou. Localization for Large-Scale Underwater Sensor Networks. In *Proceedings of IFIP Networking'07*, pages 108{119, Atlanta,Georgia, USA, May 14-18 2007.
- [59] Eddy Cizeron. *Routage Multichemins et Codage à Description Multiple dans les Réseaux Ad Hoc*. Thèse de Doctorat de l’Université de Nantes. 2009.
- [60] www.eawag.ch/forschung/siam/software/aquasim/pdf/aquasim_manual.pdf.

Résumé : Les réseaux de capteurs sous-marins (UWSN) représentent un domaine de recherche très actif et ils attirent beaucoup d'attention de la communauté scientifique, les domaines d'application des UWSN sont très nombreux tels que: la surveillance de l'environnement, l'exploration sous-marines, la prévention des catastrophes ou bien encore la navigation assistée. Toute fois ces nœuds capteurs sont limités en termes d'énergie. De ce fait, la mise en place de ce système est confrontée à de nombreux problèmes parmi lesquels ceux liés au routage des informations vers un nœud distant (sink) via multiples nœuds intermédiaire éventuellement mobiles. En effet, c'est dans le cadre de ce thème que s'oriente l'objectif de notre projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à l'étude et l'évaluation des performances d'un protocole de routage appelé VBF (Vector Based Forwarding) qui est le premier protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs sous-marins mobiles.

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

Abstract: Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN) has been gaining a lot of attention from the research community .The application areas for UWSN are various: Distributed tactical surveillance, undersea explorations, disaster prevention, and assisted navigation. However, these sensor nodes are limited in energy. So, the installation of this system is confronted with many problems among which those related to the routing of information towards a distant unit (sink) via different nodes of the network. Indeed, it is within the framework of this topic that the objective of our project is directed. We are interested in the study and the performance evaluation of the protocol of routing VBF (Vector Based Forwarding) which is the first routing protocol designed for mobile underwater sensor networks.

Key words: Underwater wireless Sensor Networks, Acoustic waves, Routing, VBF.