

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En :** Télécommunications

**Spécialité :** Réseaux Mobiles et Services de Télécommunications (RMST)

**Par :** ZEROUALI NASSIMA

**Sujet**

**LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL  
SOUS-MARINS**

Soutenu le 26 / 05 /2016, devant le jury composé de :

Mr. **H.ZERROUKI**

Mr. **D.MOUSSAOUI**

Mr. **M.HADJILA**

Melle. **S.SOUIKI**

MCB, Université Tlemcen

MAA, Université Tlemcen

MCB, Université Tlemcen

Docteur, Université Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

**Année Universitaire : 2015/2016**



# Remerciements

*Tout d'abord, le grand remerciement va **ALLAH** tout puissant de nous armés de force et de courage pour mener à terme ce projet.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à mon encadreur Mr **M.Hadjila**, pour sa gentillesse, sa disponibilité, son soutien et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie également ma Co-encadreur M<sup>elle</sup> **S.Souiki** pour m'avoir orienté dans ce thème, aussi pour sa sympathie, ses idées, conseils et qui m'a aidé pour faire ce travail.*

*Un remerciement chaleureux est adressé à Mr **H.Zerrouki**, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de présider le jury.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également à Mr **D.Moussaoui** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Et aussi mes remerciements vont à tous les enseignants de département de génie électrique et électronique et en particulier au département de télécommunication.*

*A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin.*

**ZEROUALI NASSIMA**





# Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie*

*Que je dédie cet humble travail*

*À mes chers et respectueux parents*

*Vraiment aucune dédicace ne saurait exprimer mon attachement, mon amour et mon affection, je vous offre ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont vous m'avez toujours su me combler.*

*Puisse dieu vous garder et vous procurer santé et bonheur.*

*À mon frère, mon grand-père, ma grand-mère, à toutes ma familles en témoignage de mon profond respect.*

*À mes amis(es) et mes camarades de promotion de télécommunication.*

*À toutes personnes qui m'ont encouragé ou aidé dans l'élaboration de ce travail.*

ZEROUALI NASSIMA.



# Table de matière

---

Liste des figures .....	v
Liste des tableaux .....	vi
Liste des abréviations .....	vii
Introduction générale.....	1

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

---

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF).....	3
I.3 Applications des réseaux de capteurs sans fil .....	4
I.3.1 Applications militaires .....	4
I.3.2 Applications médicales.....	5
I.3.3 Applications environnementales .....	5
I.3.4 Applications commerciales .....	5
I.3.5 Agriculture .....	5
I.3.6 Applications à la surveillance.....	5
I.3.7 Applications domestiques .....	5
I.4 Les réseaux de capteurs sous-marins .....	6
I.4.1 Définition : .....	6
I.4.2 Architecture interne d'un capteur sous-marin .....	8
I.4.3 Techniques de communication sans fil aquatique sous-marin .....	9
I.4.3.1 Ondes électromagnétiques :.....	9
I.4.3.1.a Onde EM en eau douce :.....	9
I.4.3.1.b Onde EM dans l'eau de mer:.....	10
I.4.3.2 Ondes optiques : .....	10
I.4.3.3 Ondes acoustiques :.....	11
I.4.4 Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique.....	14
I.4.5 Les caractéristiques uniques des réseaux de capteurs acoustiques sous-marins .....	15

I.4.6 L'Architecture de communication.....	17
I.4.6.1 Réseaux de capteurs à une dimension .....	17
I.4.6.2 Réseaux de capteurs à Deux dimensions .....	17
I.4.6.3 Réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions .....	18
I.4.6.4 Les réseaux de capteurs avec véhicules sous-marins autonomes .....	20
I.4.7 Les applications des capteurs aquatiques .....	22
I.4.7.1 Les applications de la surveillance .....	23
I.4.7.2 Catastrophe .....	23
I.4.7.3 Militaire .....	24
I.4.7.4 Navigation assistée .....	24
I.4.7.5 Sports .....	24
I.5 La différence entre réseaux de capteurs terrestre et sous-marins.....	25
I.6 Conclusion .....	26

## **Chapitre II : Etat de l'art sur les protocoles de routages conçus pour les (UWSNs).**

---

II.1 Introduction .....	27
II.2 Le routage dans les réseaux de capteurs sous-marins.....	27
II.3 Les principaux défis dans le développement des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins .....	28
II.4 Critères de performances d'un protocole de routage.....	29
II.5 Classification des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins .....	30
II.5.1 La mobilité .....	31
II.5.1.1 Le protocole de routage Basé sur la Profondeur « DBR » .....	32
II.5.1.2 Le protocole de routage basé sur l'acheminement par vecteur « VBF » .....	34
II.5.2 Réseaux clairsemées .....	36
II.5.2.1 Le protocole de routage adaptative .....	36
II.5.2.2 Le protocole de routage Saut par saut VBF « HH-VBF».....	40
II.5.3 Réseaux denses .....	41
II.5.3.1 Le protocole de routage axé par faisceau « FBR ».....	41
II.5.4 Routage fiable .....	43

II.5.4.1 Le protocole de Routage Directionnel à Base d'Inondation « DFR ».....	44
II.5.5 Efficacité énergétique .....	45
II.5.5.1 Le protocole de routage de regroupement des coûts minimum « MCCP » .....	45
II.5.6 Mécanismes spéciaux.....	47
II.5.6.1 le protocole de routage Délai d'une approche tolérante mobile « DDD » .....	47
II.6 Comparaison entre les protocoles étudiés .....	48
II.7 Conclusion .....	50

## **Chapitre III : Évaluations des performances du routage dans les UWSNs.**

---

III.1 Introduction .....	51
III.2 Outil de simulation .....	51
III.3 Choix du simulateur NS2 .....	52
III.4 Simulateur NS2 .....	52
III.5 Aqua-Sim .....	54
III.6 Objectifs de la simulation.....	56
III.7 Métriques d'évaluation.....	56
III.8 Méthodologie expérimentale.....	57
III.8.1 Création du modèle de simulation .....	57
III.8.2 L'influence de la densité des nœuds.....	58
III.8.2.1 Etude du délai de transmission.....	58
III.8.2.2 Etude de l'énergie consommée .....	59
III.8.3 Etude de l'influence de rayon de la pipe .....	60
III.8.3.1 Etude du délai de transmission.....	60
III.8.3.2 Etude de l'énergie consommée .....	61
III.8.4 Comparaison entre les performances du « VBF » et« HH-VBF » .....	62
III.8.4.1 Etude du délai de transmission.....	62
III.8.4.2 Etude de l'énergie consommée .....	63
III.9 Conclusion.....	64

## **Conclusion générale et perspectives**

Conclusion générale ..... 65

Perspectives ..... 66

Bibliographie ..... 67

Annexe

Résumé

# LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Exemple de réseau de capteurs sans fil-----	4
Figure I-2: les applications des RCSF -----	6
Figure I-3: les réseaux de capteurs sous-marins -----	7
Figure I-4: photos des différents capteurs et des AUV. -----	8
Figure I-5: Anatomie du capteur sous-marin -----	8
Figure I-6: l'architecture de communication -----	17
Figure I-7: Réseau de capteurs à deux dimensions -----	18
Figure I-8: Réseau de capteurs à trois dimensions-----	20
Figure I-9: Réseau de capteurs à quatre dimensions -----	21
Figure I-10: photo des différentes applications -----	22
Figure I-11: les applications des réseaux des capteurs aquatiques -----	23
Figure II-1: Classification des protocoles de routage. -----	31
Figure II-2: Architecture multiple-sink de réseau de capteurs sous-marins. -----	32
Figure II.3: Sélection de nœud de Transfert dans le protocole DBR. -----	34
Figure II-4: Une vue de protocole VBF.-----	35
Figure II-5: Illustration de la procédure de décision de routage. -----	39
Figure II-6: Vecteurs par-Saut de HH-VBF. -----	41
Figure II-7: Illustration du protocole FBR.-----	43
Figure II-8: Exemple de transmission de paquets dans DFR. -----	44
Figure II.9: Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP. -----	47
Figure III.1: Relation entre Aqua-Sim et NS2-----	54
Figure III.2: Architecture du simulateur Aqua-Sim -----	55
Figure III.3: Le délai de transmission vs le nombre des nœuds-----	58
Figure III.4: la courbe de l'énergie consommée vs le nombre de nœuds -----	59
Figure III.5: Le délai de transmission vs le rayon -----	60
Figure III.6: L'énergie consommée vs le rayon -----	61
Figure III.7: Le délai vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF -----	62
Figure III.8: l'énergie consommée vs le nombre de nœuds en VBF et HH-VBF -----	63



# Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison des ondes acoustique, EM et optiques dans l'eau de mer .....	15
Tableau II-1 : La comparaison des protocoles de routage en fonction de leurs caractéristiques et performances.....	49
Tableau III.1 : principaux protocoles et modèles disponibles sous NS2.....	53
Tableau III.2: environnement de la simulation .....	57
Tableau III.3: Paramètres du contexte de simulation .....	57
Tableau III.4: les résultats de l'influence de densité des nœuds sur le délai (ms).....	58
Tableau III.5: les résultats de l'influence de densité des nœuds sur l'énergie (joule).....	59
Tableau III.6 : les résultats de l'influence du rayon (m) sur le délai (ms).....	60
Tableau III.7 : les résultats de l'influence de rayon(m) sur l'énergie (joule).....	61
Tableau III.8 : le délai de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds.....	62
Tableau III.9 : l'énergie de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds .....	63

# ***GLOSSAIRE***

## **A**

**AUV** Autonomous Underwater Vehicle

## **C**

**CPU** Central Processing Unit

**CTS** Clear To Send

## **D**

**DBR** Depth Based Routing

**DDD** Delay tolerant Data Dolphin

**DFR** directional flooding-Based Routing

## **E**

**EM** Électromagnétique

## **F**

**FBR** Focused Beam Routing

## **H**

**HH-VBF** hop-by-hop VBF

## **M**

**MCCA** Minimum Cost Clustering Algorithm

**MCCP** minimum cost clustering protocol.

## **N**

**Nam** Network Animator

**NS-2** Network Simulator-2

## **P**

**PSU** practical salinity unit

## **R**

**RCSF** Réseaux de capteurs sans fil

**RF** Radio Frequency

**RTS** Request To Send

## **T**

**TDS** Total dissolved solid

**TDMA** Times Division Multiple Access

## **U**

**UWSN** Under water Wireless Sensor Networks

## **V**

**VBF** Vector Based Forwarding.



*Introduction*  
*Générale*

# *Introduction générale*

Au cours des dernières années, de nombreuses normes de connectivité et de technologies sans fil ont vu le jour. Ces technologies permettent aux utilisateurs de connecter facilement et simplement un large éventail de dispositifs informatiques et de télécommunications, sans avoir besoin d'acheter, de transporter ou de connecter des câbles. Ces technologies peuvent offrir des possibilités de connexions rapides automatiques entre les appareils. La technologie des réseaux sans fil n'a cessé de croître grâce aux développements technologiques dans divers domaines liés à la micro-électronique.

La planète terrestre est recouverte d'eau de plus de 2/3 de sa surface, sous forme des rivières, canaux, mers et des océans. Cette grande partie a fasciné les chercheurs pour l'explorer. La communication sans fil en milieu aquatique est une thématique de recherche émergente dans notre étude. Les progrès récents dans les technologies ont conduit à explorer des réseaux de capteurs sans fil sous-marins (**UWSNs** : Underwater Wireless Sensor Networks) et cela est devenue la technologie habilitante pour l'exploration sous-marine.

Ceux-ci sont composés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui collectent et transmettent des données environnementales vers une station de base afin de surveiller un évènement ou explorer l'océan. Ce type de réseau est déployé de manière aléatoire dans un champ de captage au fond de la mer, ce qui peut s'avérer très utile pour de nombreuses applications militaires, civiles, environnementales, industrielles ...etc.

Les techniques de transmission de l'information utilisée dans les systèmes de communications sous-marines sont les ondes EM (électromagnétique), optique et acoustique. L'utilisation des ondes EM ou optique dans les réseaux sous l'eau n'est pas trop efficaces car ses techniques sont confrontées des problèmes d'atténuation et de dispersion du signal, par conséquent les ondes acoustiques sont la solution de la communication dans des environnements sous-marins. Les ondes acoustiques sont des ondes de basse fréquence qui offrent faible bande passante, mais qui ont de longues longueurs d'onde. Ainsi, les ondes acoustiques peuvent parcourir de longues distances et sont utilisés pour relayer l'information sur des kilomètres, pour cette raison les ondes acoustiques sont les plus utilisés dans les milieux aquatiques.

Les réseaux de capteurs sous-marins sont sans infrastructure qui gère les données entre les différents nœuds du réseau, pour cela le routage est nécessaire dans ce type de réseau. Le routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets et qui assure le trafic nominal et garantit la qualité de service.

L'objectif ultime de ce mémoire est d'analyser les performances de protocole VBF (Vector Based Forwarding), en utilisant deux métriques (le délai de transfert et l'énergie) ; aussi nous faisons une comparaison avec les performances de protocole HH-VBF (Hop by Hop VBF). Toutes ces simulations sont faites par le simulateur Aqua-Sim qui est basée sur NS2.

La-structure de ce manuscrit est organisée en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, les concepts fondamentaux d'un réseau de capteurs sans fil sont présentés. Dans un premier temps nous décrivons le principe de fonctionnement de ce type de réseaux et leurs applications dans des différents domaines. Puis nous focalisons notre étude sur les réseaux de capteurs sans fil sous-marins, nous avons définis ce réseau et donner l'architecture interne d'un capteur sous-marin. Nous présentons aussi un état de l'art des différents systèmes de communication sans fil dont le milieu de propagation aquatique (électromagnétique, optique, acoustique), notre concentration est surtout sur les ondes acoustiques tant qu'elle est la meilleur technique de transmission sous l'eau. Par la suite nous exposons les caractéristiques uniques des réseaux de capteurs sous-marins et ses architectures de communication. A la fin de ce chapitre, nous donnons les différentes applications d'un capteur aquatique et les points qui diffèrent entre les réseaux de capteurs sous-marins et les réseaux de capteurs terrestres.

Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude du routage dans les réseaux de capteurs sous-marins, nous présentons aussi les défis dans le développement d'un protocole de routage aquatique et ses critères de performances. En suite, nous décrivons les principaux protocoles de routage proposés sous différentes classifications et nous terminons par un tableau comparatif entre ces protocoles.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats d'évaluation des performances du protocole VBF et nous faisons une comparaison avec le protocole de routage Hop-by-Hop VBF, tout sa après une définition de simulateur. Nous utilisons deux métriques dans la simulation: l'énergie consommée et le délai de transmission.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale qui contient les principales contributions présenté tout au long de ce mémoire. Nous proposons ensuite quelque perspective dans ce domaine.



# *Chapitre I*

*Généralités sur  
les réseaux de  
capteurs sous-  
marins  
(UWSNs)*

## I.1 Introduction

Plus de 2/3 de la surface terrestre est recouverte d'eau. Les progrès récents dans les technologies ont conduit à explorer des réseaux de capteurs sans fil sous-marins (UWSNs : Under water Wireless Sensor Networks) et cela est devenue la technologie habilitante pour l'exploration sous-marine. Un réseau de capteurs aquatique est un réseau de nœuds capteurs autonomes, qui sont répartis dans l'espace sous-marin pour détecter les propriétés liées à l'eau telles que la qualité, la température et la pression. Les capteurs sont fixes ou mobiles, connectés sans fil via des modules de communication pour transférer les diverses informations. Les réseaux de capteurs sont utilisés pour un large éventail d'applications. Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins diffèrent principalement dans les moyens de communication utilisés pour la transmission de l'information.

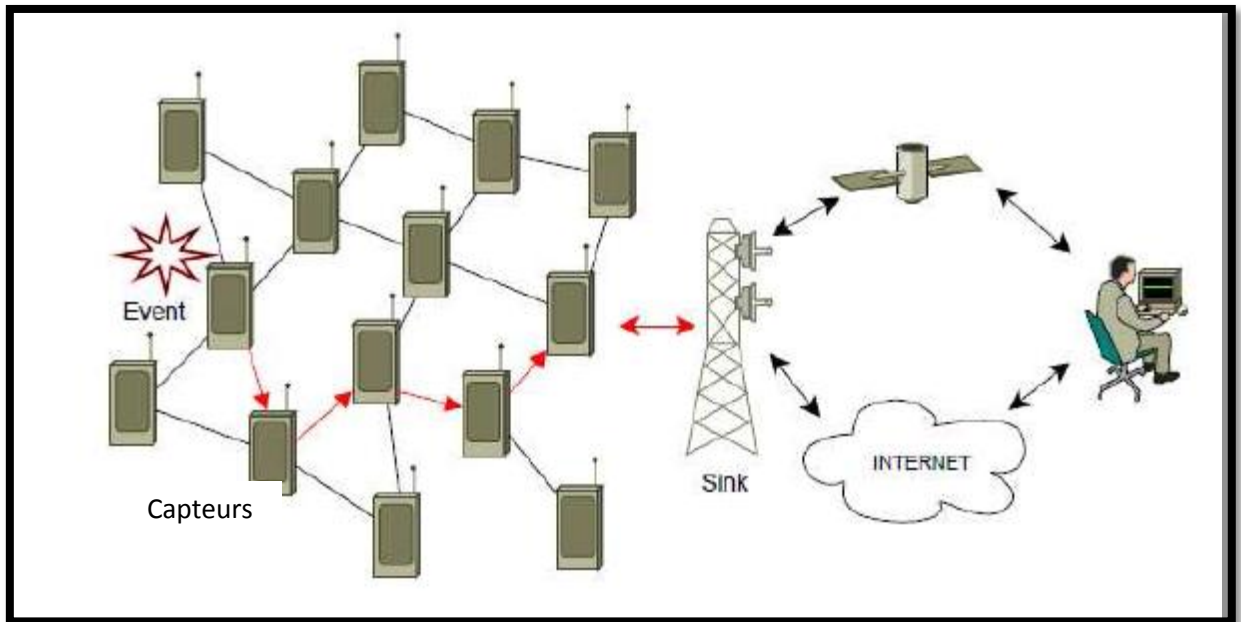
Cette partie introduit des généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins (UWSNs) et décrit ses caractéristiques, ses applications et ses différentes architectures de communication.

## I.2 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont un type particulier de réseaux Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des "capteurs intelligents". Ils se composent généralement d'un grand nombre de capteurs communicants entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif.

Dans ce type de réseau, les capteurs échangent des informations par exemple sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée, qui est rendue accessible à l'utilisateur externe par un ou plusieurs nœud(s). Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via les autres capteurs de proche en proche à un "point de collecte", appelé station de base (ou Sink). Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite. En outre, l'utilisateur peut adresser ses requêtes aux capteurs en précisant l'information d'intérêt.

Un exemple de réseaux de capteurs est fourni dans la Figure I-1 : les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt, et une station de base, située à l'extrémité de cette zone, est chargée de récupérer les données collectées par les capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication entre les capteurs. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes.



**Figure I-1:- Exemple de réseau de capteurs sans fil**

Les réseaux de capteurs viennent en soutien de l'environnement, de la santé et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans fil.

Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques telles que la température, la pression ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques. [1]

### **I.3 Applications des réseaux de capteurs sans fil**

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications. Parmi ces évolutions, on peut citer la diminution de taille et du coût des capteurs, ainsi que l'élargissement des gammes de capteurs disponibles (mouvement, température, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil. En effet, les applications des réseaux de capteurs peuvent être militaires, médicales, environnementales, commerciales... etc. (voir figure I-2).

#### **I.3.1 Applications militaires**

Un réseau de capteurs déployé dans un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements, ou d'analyser le champ de bataille avant d'y envoyer du renfort.



### **I.3.2 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.

### **I.3.3 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.

### **I.3.4 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. [2]

### **I.3.5 Agriculture**

Des nœuds peuvent être incorporés dans la terre. On peut ensuite questionner le réseau de capteurs sur l'état du champ (déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité). [3]

### **I.3.6 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 détection de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance. [1]

### **I.3.7 Applications domestiques**

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, etc. [4]. 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 s'arrête quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, l'alarme est déclenchée par le capteur anti-intrusion quand un étranger veut pénétrer dans la maison. [1]

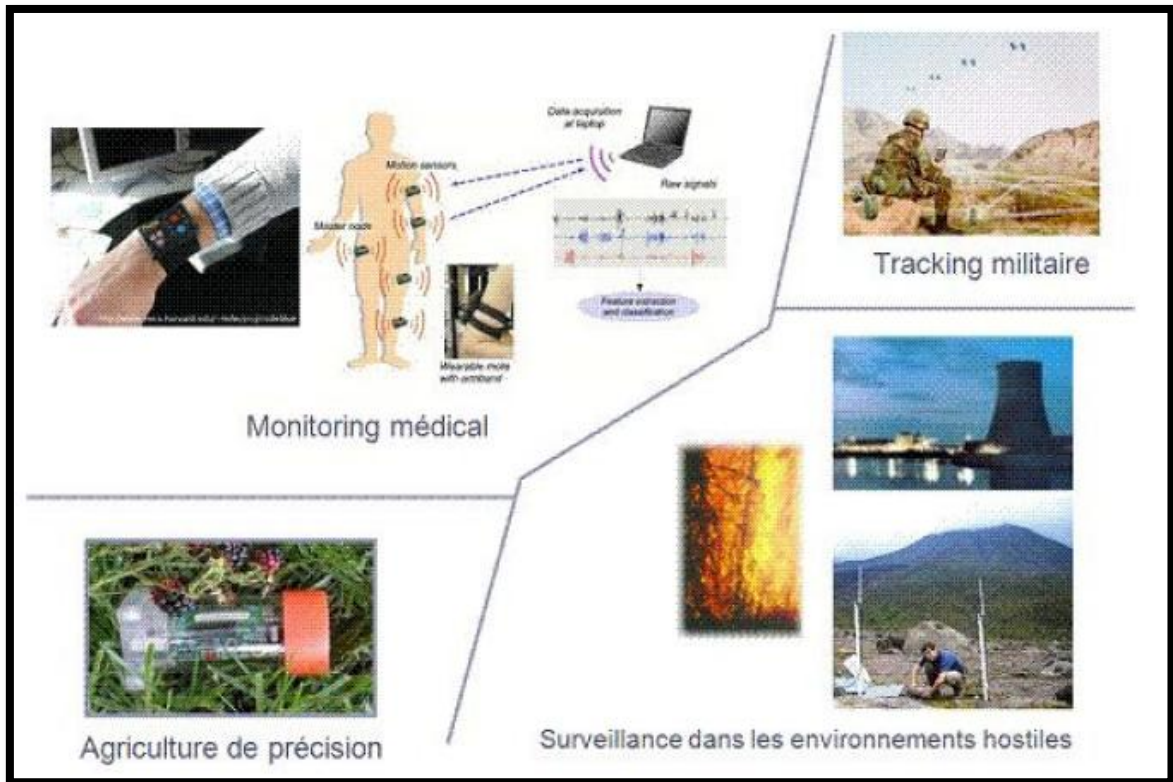


Figure I-2 : les applications des RCSF [3]

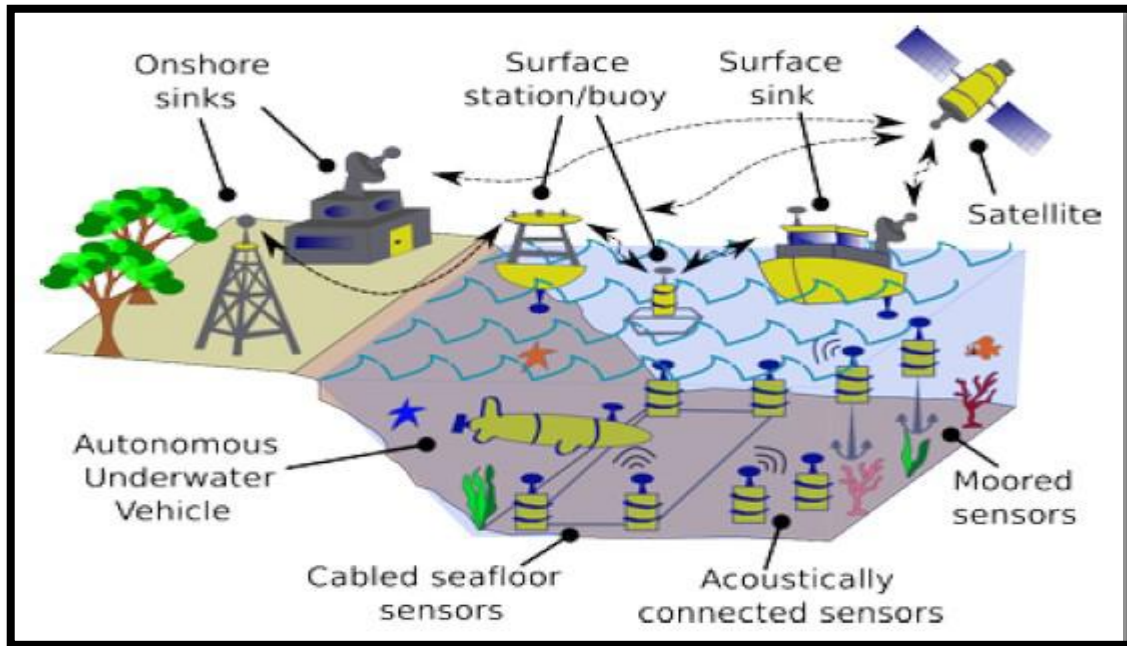
## I.4 Les réseaux de capteurs sous-marins

### I.4.1 Définition :

Le réseau de capteurs sous-marins est formé par la coopération entre plusieurs nœuds établissant des liens bidirectionnels acoustiques entre eux. Il se compose d'un nombre de nœuds capteurs et des véhicules déployés sous l'eau. Chaque nœud du réseau est capable d'échanger des messages avec ses nœuds voisins, et de relayer des messages vers d'autres nœuds pour atteindre une station de base (ou Sink). Chaque nœud peut être doté d'un ou plusieurs capteurs qui enregistrent des données environnementales à transmettre généralement vers des plates-formes ou des bouées à la surface (Station de base) comme le montre la Figure I-3.

A la différence des réseaux de capteurs terrestres, les nœuds capteurs sous-marins sont plus chers et sont moins déployés. Les véhicules sous-marins autonomes sont utilisés pour

l'exploration ou la collecte des données de nœuds capteurs. Comparé à un déploiement dense des nœuds capteurs dans un réseau de capteurs terrestre, un déploiement clairsemé de nœuds capteurs est placé sous l'eau.



**Figure I-3 : les réseaux de capteurs sous marins**

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

Il existe d'autres capteurs pour des mesures sous l'eau, tels que des capteurs de sulfure hydro thermique, des capteurs silicates, des capteurs volta métriques spectrophotométrie, des capteurs d'électrodes en or-amalgame pour les mesures des sédiments d'ions métalliques à sélectivité ionique (analyse)... . [6][23]

La Figure I-4 illustre des différents types de capteurs sous-marins :



Figure I-4 : photos des différents capteurs et des AUV.

### I.4.2 Architecture interne d'un capteur sous-marin

Un nœud capteur est composé principalement d'un processeur, d'une mémoire, d'une unité de capture, d'une pile d'énergie, et d'un modem acoustique. [7]

L'architecture interne typique d'un capteur aquatique est représentée sur la Figure I-5

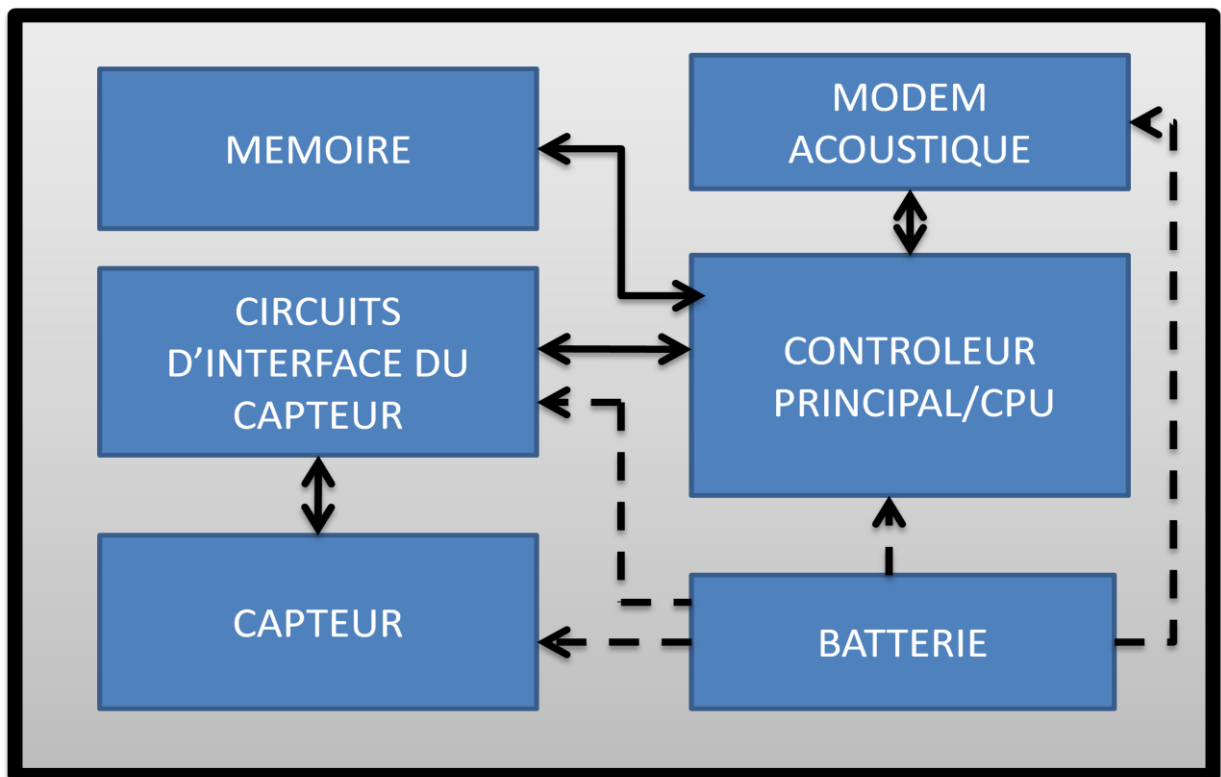


Figure I-5 : Anatomie du capteur sous-marin

Il se compose d'un contrôleur principal CPU qui est interfacé avec un instrument ou un capteur océanographique à travers un circuit d'interface de capteur.

Le contrôleur reçoit les données du capteur et il peut stocker dans la mémoire embarquée, processus, les traiter et l'envoyer à d'autres dispositifs de réseau en contrôlant le modem acoustique.

Les circuits électroniques sont généralement montés sur un châssis qui est protégé par un boîtier PVC. Parfois, les composants de capteur sont protégés par des trames de fond de l'instrument monté qui sont conçus pour permettre des communications acoustiques omnidirectionnelles en azimut, Et de protéger les capteurs et les modems de l'impact potentiel des engins de chalutage, en particulier dans les zones soumises à des activités de pêche.

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. [8]

### **I.4.3 Techniques de communication sans fil aquatique sous-marins**

Comprendre les principes premiers de chaque onde physique utilisée dans la communication sans fil aquatique est extrêmement important. Dans cette section nous avons présentés les propriétés physiques fondamentales et les questions critiques pour chaque onde utilisée comme support de communication dans des environnements sous-marins. Nous discutons les avantages et les inconvénients de chaque support physique vers une communication sous-marine sans fil efficace. [9]

#### **I.4.3.1 Ondes électromagnétiques :**

Le principal défi dans l'utilisation sous-marine de la radio est l'atténuation sévère en raison de la nature conductrice de l'eau de mer. En conséquence, la Communication Électromagnétique fonctionne dans la région de la puissance limitée [10]. L'utilisation d'ondes électromagnétiques dans la bande des fréquences radio a plusieurs avantages que les autres ondes, notamment en vitesse plus rapide et une fréquence de fonctionnement élevée (conduisant à bande passante plus élevée). Cependant, il ya beaucoup de facteurs limitant lors de l'utilisation des ondes EM dans l'eau. Dans cette section, nous analysons la faisabilité de l'utilisation de l'EM pour les réseaux de capteurs sous-marins. En raison du fait que les champs EM se propagent très différemment dans l'eau douce et l'eau de mer, nous décrivons les ondes EM dans ces deux types de supports séparément comme suit [10]:

##### **I.4.3.1.a Onde EM en eau douce :**

L'eau douce est un milieu à faible perte. La vitesse des ondes électromagnétiques sous-marines est ralentie par seulement un facteur de 9 de la vitesse de la lumière dans l'espace libre, et il ne pose aucun problème dans le canal de latence. Notez qu'ici la perte d'absorption est essentiellement indépendante de la fréquence et les ondes électromagnétiques peuvent littéralement se propager à travers le corps de l'eau douce.

En tant que tel, en utilisant des ondes électromagnétiques comme support de communication dans des environnements d'eau douce semble très attrayant. Cependant, le

---

problème clé dans l'utilisation des ondes EM pour la communication dans les réseaux de capteurs sous-marins d'eau douce est la taille de l'antenne. La grande taille de l'antenne d'un émetteur EM (par exemple, un couple de mètres pour une antenne de 50 MHz) est impraticable pour le déploiement dense de réseaux de capteurs sous-marins. [10]

#### **I.4.3.1.b Onde EM dans l'eau de mer:**

L'eau de mer est un moyen-élévé de perte. La conductivité électrique de l'eau de mer est d'environ deux ordres supérieurs à celle de l'eau douce. La conductivité plus élevé dans l'eau de mer est principalement due à l'augmentation cumulative de concentration totale de solide dissous (TDS) dans les océans, présentée comme la grande salinité; La salinité moyenne de l'eau de mer est d'environ 34 parties par mille. Dans les milieux hautement conducteurs, à la fois la vitesse de propagation et de la perte d'absorption des ondes électromagnétiques sont des fonctions de la fréquence porteuse. [10]

La conception de l'antenne dans ce cas est très différente de celui des antennes utilisées pour le service classique dans l'atmosphère. Au lieu d'avoir un contact direct avec l'eau de mer, la transmission de métal et les antennes de réception sont entourés par des matériaux électriquement isolants étanches. De cette façon, un signal EM peut être lancé à partir de l'émetteur dans un corps d'eau de mer et ramassé par un récepteur distant. [10] [12] [13]

En raison de la propriété de propagation des ondes électromagnétiques, l'onde EM est un choix attrayant que pour des applications de très courte portée. Un exemple est la communication entre les véhicules sous-marins autonomes (AUV) et des stations de base, où les AUV peuvent se déplacer au sein de la portée de communication d'une station de base pour décharger des données et recevoir d'autres instructions. [14]

En résumé, la limitation de l'utilisation de l'onde électromagnétique dans l'eau douce est la grande taille de l'antenne, et le problème critique d'ondes électromagnétiques dans l'eau de mer est la forte atténuation. Ainsi, pour rendre l'utilisation des ondes EM pratiques pour la communication réseau de capteurs sous-marins, des approches plus novatrices doivent être recherchées. [9]

#### **I.4.3.2 Ondes optiques :**

Comme l'a souligné dans la section précédente, la qualité de l'eau joue un rôle déterminant dans la décision des ondes optiques qui peuvent être utilisés pour la communication sous-marine. Par conséquent, l'applicabilité de communication optique dépend fortement de l'environnement. [15]

Actuellement, il n'y a pas beaucoup d'activités de recherche sur la communication optique sous-marine, et quelques modems optiques commerciaux sont disponibles spécifiquement pour les communications sous-marines.

Comme bien détaillé dans les paragraphes suivants, les intérêts récents dans les réseaux de capteurs sous-marins et les observatoires du fond de mer ont fortement stimulé l'intérêt à court terme à taux élevé de la communication sous-marine optique. [14]

Utilisant des ondes optiques pour la communication dans l'eau a évidemment un grand avantage dans le débit de données, qui peut potentiellement dépasser 1 Gbps.

Cependant, il ya un ensemble d'inconvénients pour la communication optique dans l'eau. Tout d'abord, les signaux optiques sont rapidement absorbés dans l'eau. Deuxièmement, la diffusion optique causée par des particules en suspension et des planctons est significatif. Troisièmement, le niveau élevé de la lumière ambiante dans la partie supérieure de l'eau est un autre effet néfaste pour l'utilisation de la communication optique.

Maintenant, laissez-nous limitons notre discussion à la situation d'utiliser la lumière monochromatique seulement en eau profonde (où la lumière ambiante est généralement pas un problème majeur). Ensuite diffusion optique est le sujet plus pertinent à l'aide d'ondes optiques pour la communication. Le processus de diffusion des ondes optiques et de la dépendance à la longueur d'onde de canaux optiques sous-marins peut être évalué par la théorie de diffusion de Mie. Contrairement à la diffusion de Rayleigh, ce qui est valable dans la région où la longueur d'onde est plus grande que la taille des particules de diffusion, la solution de Mie au problème de diffusion est rigoureusement valable pour tous les rapports possibles de diamètre de particule de longueur d'onde. Selon la théorie de Mie, lorsque la longueur d'onde lumineuse est similaire au diamètre des particules, la lumière interagit avec la particule sur une surface de section transversale supérieure à la section transversale géométrique de la particule. [16]

En bref, en plus des questions courantes de perte d'absorption et ambiante "bruit" de l'environnement que pour d'autres ondes, la turbidité de l'eau joue un rôle important pour décider si des ondes optiques peuvent être utilisés comme supports de communication pour les réseaux de capteurs sous-marins. [9]

### **I.4.3.3 Ondes acoustiques :**

Parmi les Techniques de communication sans fil aquatique, des ondes acoustiques sont utilisées comme support primaire pour des systèmes de communication sous l'eau en raison de l'absorption relativement faible dans des environnements sous-marins. Nous commençons la

---

discussion avec les fondamentaux physiques et les implications de l'utilisation des ondes acoustiques en tant que support de communication sans fil dans des environnements sous-marins. [9]

**1- Propriétés physiques:** Les ondes acoustiques ont un certain nombre de caractéristiques de propagation qui sont uniques, dont deux sont mis en évidence ci-dessous :

- **La vitesse de propagation:** La vitesse de propagation du son extrêmement lente dans l'eau est un facteur important qui le différencie de la propagation électromagnétique. La vitesse du son dans l'eau dépend des propriétés de l'eau de température, de salinité et de la pression (directement liées à la profondeur). Une vitesse typique du son dans l'eau près de la surface de l'océan est d'environ 1 520 m / s, ce qui est plus de 4 fois plus vite que la vitesse du son dans l'air, mais cinq ordres de grandeur plus petite que la vitesse de la lumière. La vitesse du son dans l'eau augmente avec la température de l'eau, la salinité croissante et l'augmentation de la profondeur. La plupart des changements dans la vitesse du son dans l'océan sont dus à des changements de température. Ceci est parce que l'effet de la salinité sur la vitesse du son est faible et les changements de salinité dans l'océan ouvert sont de petite taille. Près de la côte et dans les estuaires, où la salinité varie grandement, la salinité peut avoir un effet plus important sur la vitesse du son dans l'eau. Comme la profondeur augmente, la pression de l'eau a le plus grand effet sur la vitesse du son. Dans la plupart des conditions de la vitesse du son dans l'eau est simple à comprendre. Le son se déplace plus vite dans l'eau plus chaude et plus lente dans l'eau froide. la vitesse du son augmente de 4,0 m / s pour température de l'eau résultant 1 °C. Lorsque la salinité augmente 1 unité pratique de salinité (PSU), la vitesse du son dans l'eau augmente de 1,4 m / s. Comme la profondeur de l'eau augmente 1 km (donc aussi la pression), la vitesse sonores augmente environ 17 m / s.

- **Absorption:** Au cours de la propagation, l'énergie des ondes peut être converti en d'autres formes et absorbée par le milieu. La perte d'énergie d'absorption est liée directement par l'imperfection matérielle pour le type d'onde physique propageant à travers elle. Pour les ondes acoustiques, cette imperfection matérielle est l'élasticité, qui convertit l'énergie des ondes en chaleur. La perte d'absorption de propagation d'ondes acoustiques est dépendante de la fréquence [17].

**2- phénomènes de multi-trajets :** Une onde acoustique peut atteindre un certain point par des chemins multiples. Dans un environnement en eau peu profonde, où la distance de transmission est plus grande que la profondeur de l'eau, des réflexions d'ondes à partir de la surface et le fond génèrent plusieurs arrivées d'un même signal. Dans les applications en eaux



profondes, la surface et des réflexions de fond peuvent être négligé. En raison de la vitesse du son variant dans l'espace, les réfractions d'ondes, cependant, peuvent provoquer des phénomènes de multi-trajets importants. [18]

**3- Perte de Chemin:** Nous discutons maintenant la perte d'énergie de canaux. Pour toute onde de propagation, il ya trois principaux mécanismes de perte d'énergie: la propagation géométrique, la perte d'absorption, et la perte de diffusion. La perte d'absorption des ondes acoustiques a été déjà discutée. Nous avons ensuite l'accent sur la propagation géométrique et la perte de diffusion.

Propagation géométrique est la perte de puissance locale d'une onde acoustique qui se propage en raison de la conservation de l'énergie. Quand une impulsion acoustique se propage loin de sa source avec une distance plus longue, l'onde occupe une grande surface. Par conséquent, l'énergie des ondes dans chaque unité de surface diminue (également appelé flux d'énergie).

Pour l'onde sphérique générée par une source ponctuelle, la perte de puissance causée par la propagation géométrique est proportionnelle au carré de la distance. D'autre part, les ondes cylindriques engendrées par une source de ligne très longue, la perte de puissance causée par la propagation géométrique est proportionnelle à la distance. On notera que la propagation géométrique est indépendante de la fréquence [19].

Diffusion est un processus physique général selon lequel un ou plusieurs localisée non uniformité dans le milieu, comme les particules et les bulles, qui obligent certaines formes de rayonnement d'onde à dévier d'une trajectoire rectiligne. Il comprend également l'écart du rayonnement réfléchi à partir de l'angle prévu par la loi de la réflexion. Cela est particulièrement pertinent pour les chaînes sous-marines. Lorsque la vitesse du vent augmente, la rugosité de surface et l'effet de la diffusion de surface devient évident. Diffusion de surface introduit non seulement la perte de puissance, mais aussi la diffusion en retard de chaque chemin de rebond de surface (contribue ainsi à des phénomènes de propagation par trajets multiples). [20]

**4- Bruit ambiant:** Le bruit ambiant est défini comme «le bruit associé avec d'une grande quantité de sources non identifiées. Ses caractéristiques sont dû à de multiples sources, les sources individuelles ne sont pas identifiées» [21]. Les sources de bruit surface de la mer commune comprennent la surface navire rayonnée bruits, les ondes déferlantes associés à la production de la bulle qui a suivi, et ainsi de suite; et les bruits d'eaux profondes proviennent principalement des animaux marins [22].

---

Les caractéristiques uniques de la voie de communication acoustique sous-marine, tels que la capacité de la bande passante limitée et les retards variables, nécessitent de nouveaux protocoles de communication de données très efficace et fiable et les nœuds capteurs sont encore un champ ouvert à la recherche. Les principales limites de la communication acoustique, peuvent être résumées comme suit:

- La bande passante disponible est très limitée.
- Le canal sous-marin est gravement compromis, surtout en raison de multi-trajets.
- Le délai de propagation est d'ordres de grandeur plus élevé que dans la fréquence radio (RF) des chaînes hertziennes, et extrêmement variable.
- taux d'erreur binaire élevé. [14]

#### **I.4.4 Comparaison 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.

Les ondes acoustiques ne sont pas le seul moyen 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. 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. 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 de mauvaises conditions [23]. Pour une compréhension plus intuitive, nous résumons les principales caractéristiques de l'acoustique, électromagnétique et l'onde optiques dans le tableau suivant :

Paramètre	Acoustique	EM	Optique
Vitesse de propagation	~ 1500 ms-1	~ 3.10 <sup>8</sup> ms-1	3.10 <sup>8</sup> ms-1
perte de puissance	>0.1 db/m/HZ	~ 28 db/1km/100MHZ	~ turbidité
Bande de fréquence	~0-400 KHz	~ 20 KHz-300 GHz	~193.10 <sup>12</sup> -435. 10 <sup>12</sup> Hz
bande passante	~KHZ	~MHZ	~10 – 150 MHZ
taille de l'antenne	~0.1 m	~0.5 m	~0.1 m
portée effective	~km	~10 m	~10 – 100 m

**Tableau I-1 : Comparaison des ondes acoustique, EM et optiques dans l'eau de mer[9]**

Cette étude comparative montre que la transmission acoustique est la solution optimale afin de réaliser un système de communication sans fil fiable, s’adaptant bien aux contraintes du support aquatique. [9]

### **I.4.5 Les caractéristiques uniques des réseaux de capteurs acoustiques sous-marins**

- **Moyens de communication:** le système de communication sous-marine implique la transmission de l'information en utilisant les différents médias, soit des ondes acoustiques, ondes électromagnétiques ou optiques. Chacune des techniques ont leurs propres avantages et limites. La Communication acoustique est la technique la plus polyvalente et largement utilisé dans le réseau de capteurs sous-marins en raison de la faible atténuation dans l'eau.

- **Perte de transmission:** la perte de transmission est causée par 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, elle est proportionnelle avec la distance et la fréquence. La propagation géométrique se renvoie à la propagation de l'énergie sonore en raison de l'élargissement des ondes. Elle augmente avec la distance de propagation et indépendante de la fréquence.

- **Bruit:** le bruit peut être classé comme un bruit artificiel et le bruit ambiant. le premier est principalement causée par le bruit des machines (pompes, réducteurs, centrales électriques), et l'activité de transport (la vie animale sur la coque, la cavitation), tandis que le

---

second est lié à l'hydrodynamique (mouvement de l'eau, y compris les marées, les courants, les tempêtes, le vent et la pluie), et à des phénomènes sismiques et biologiques.

▪ **Multi trajet:** la propagation par trajets multiples peut être responsable d'une grave dégradation du signal de communication acoustique, car elle génère Inter Symbole interférences. La géométrie de la propagation par trajets multiples dépend de la configuration de la liaison. Canaux verticaux sont caractérisés par une faible dispersion de temps, tandis que les canaux horizontaux peuvent avoir des longs écarts de trajets multiples. La mesure de l'étalement est une fonction forte de la profondeur et la distance entre l'émetteur et le récepteur.

▪ **Étalement Doppler:** La propagation 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 fréquences continue, ce qui constitue un signal non décalé. Alors que le premier est aisément compensé au niveau du récepteur, l'effet de ce dernier est plus difficile à compenser. [24]

### **I.3.6 Les contraintes dans les réseaux de capteurs acoustiques sous-marins :**

Intenses recherches sont actuellement en cours dans le développement de solutions de réseaux appropriés pour les réseaux de capteurs acoustiques sous-marins. Même si il ya beaucoup de protocoles récemment développées pour les réseaux de capteurs sans fil, les différentes caractéristiques des systèmes de communication sous-marins pose des défis différents, qui peuvent être résumées comme suit :

- Le délai de propagation dans la communication sous-marin est 5 fois plus élevé que les chaînes hertziennes.
- les capteurs sous-marins sont confrontés à des défaillances en raison de la corrosion et de l'encrassement.
- puissance de la batterie est limitée et généralement les batteries ne peuvent pas être rechargée, aussi parce que l'énergie solaire ne peut être exploitée.
- En raison des caractéristiques extrêmes du canal sous-marin comme des zones d'ombre, la perte temporaire de la connectivité est souvent accompagnée par des taux d'erreur binaire élevé.
- La bande passante disponible pour les capteurs aquatiques est extrêmement limitée.
- Les réseaux sous-marins sont gravement altérés, cela est principalement dû au multi-trajet.

- Le bruit élevé résultant de l'activité de transport et les machines est préoccupation dans les réseaux de capteurs sous-marins.
- Les dispositifs des capteurs sous-marins sont très chers et leur disponibilité sur le marché est limitée. [26]

### I.4.6 L'Architecture de communication

Dans cette section, nous décrivons l'architecture de communication des réseaux de capteurs acoustiques sous-marins. Nous introduisons les principales architectures de réseaux de capteurs aquatiques pour une, deux, trois et la quatrième dimension (voir la Figure I-6).

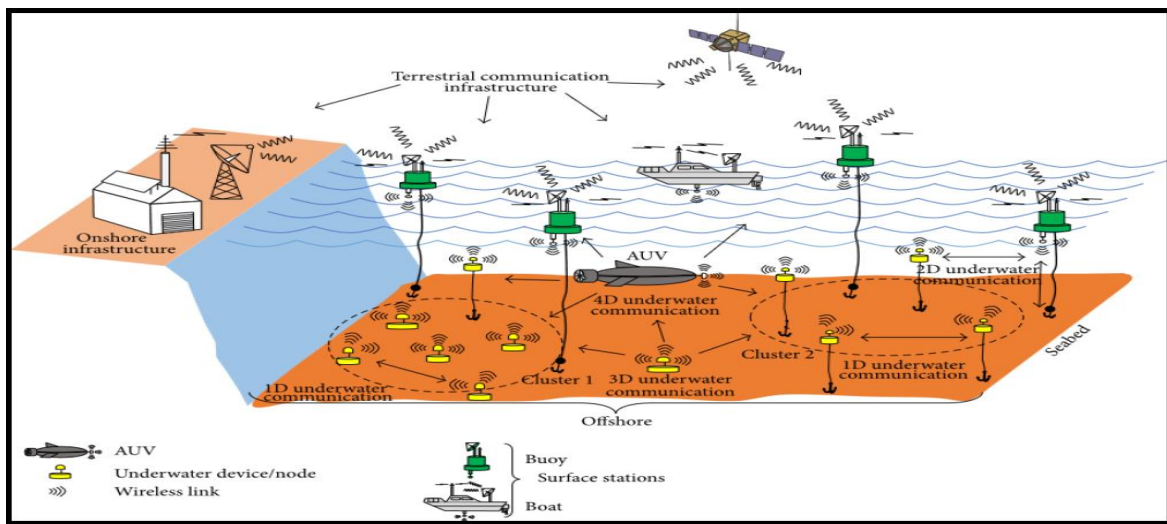


Figure I-6: l'architecture de communication [27]

#### I.4.6.1 Réseaux de capteurs à une dimension

Pour les réseaux de capteurs aquatiques à une dimension, l'architecture se réfère à un réseau où les nœuds capteurs sont déployés de manière autonome. Chaque nœud est responsable de la détection, le traitement et la transmission des informations à la station distante. Un nœud dans ce type d'architecture peut être mis sur une bouée flottante qui peut détecter les propriétés sous-marines ou il peut être déployé sous l'eau pendant une période donnée pour capter des informations et ensuite flotter vers la surface pour transmettre de l'information obtenue à la station distante. Il peut être un véhicule sous-marin autonome (AUV) qui plonge à l'intérieur de l'eau, pour collecter les propriétés sous-marines, et de relayer l'information à la station distante (voir la Figure I-6). [27]

#### I.4.6.2 Réseaux de capteurs à Deux dimensions

Les réseaux de capteurs sous-marins bidimensionnels (2D) ont une architecture « comme elle est montrée dans la Figure I-7) qui se renvoie à un réseau dans lequel un groupe des nœuds capteurs sont déployées sous l'eau. Chaque groupe a une tête de cluster « cluster

head » également appelé nœud ancre. Les clusters sont fixés comme elles sont ancrées au fond sous-marin. Chaque membre du cluster rassemble les données sous-marines et la communique au cluster head. Le cluster head rassemble les informations / données de tous ses nœuds membres et les transmet à la station de la surface. En réseaux de capteurs aquatiques bidimensionnels la communication est effectuée en deux dimensions; où chaque membre du cluster communique avec son cluster head avec un lien de communication horizontale tandis que le cluster head communique avec la station de la surface avec un lien de communication verticale. En réseaux de capteurs à deux dimensions, la communication (acoustique, optique, et RF) peut être utilisée en fonction du type d'application et la nature de l'environnement sous-marin. En réseau bidimensionnel, la communication acoustique est préférable entre le cluster head sous-marin et la station de la surface en raison généralement de la distance élevés entre eux. [28]

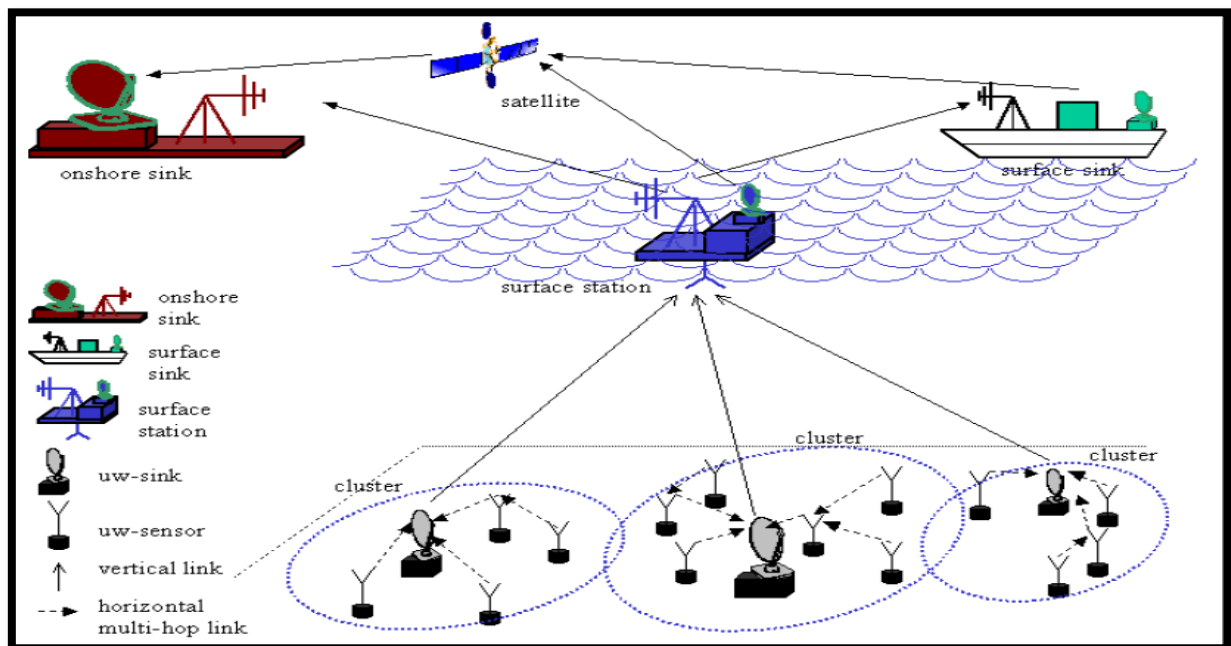


Figure I-7 : Réseau de capteurs à deux dimensions [25]

#### I.4.6.3 Réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions

Les réseaux de capteurs sous-marins en trois dimension (3D) sont utilisés pour détecter et observer des phénomènes qui ne peuvent être observés de manière adéquate au moyen de nœuds capteurs déployés dans le fond de l'océan, à savoir, d'effectuer l'échantillonnage coopérative de l'environnement de l'océan en 3D.

Les réseaux sous-marins en trois dimensions sont représentés dans la Figure I-8, dans cette architecture les capteurs flottent 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 manière à ajuster la profondeur de chaque nœud de capteur. Cependant, cette solution permette un déploiement facile et rapide du réseau de capteurs, de multiples bouées flottantes peuvent obstruer les navires naviguant sur la surface, ou ils peuvent être facilement détectée et désactivé par les ennemis dans les milieux militaires. En outre, les bouées flottantes sont vulnérables aux intempéries et à la falsification les vols. Pour ces raisons, une approche différente est proposée pour ancrer des dispositifs capteurs au fond de l'océan.

Dans cette architecture, chaque capteur est fixé au fond de la mer et muni d'un flotteur qui peut être gonflée 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 se trouve sur le capteur. Un défi à relever dans une telle architecture est l'effet des courants océaniques sur le mécanisme qui permet de régler la profondeur des capteurs.

De nombreux défis restent posés avec une telle architecture, et 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. [8]

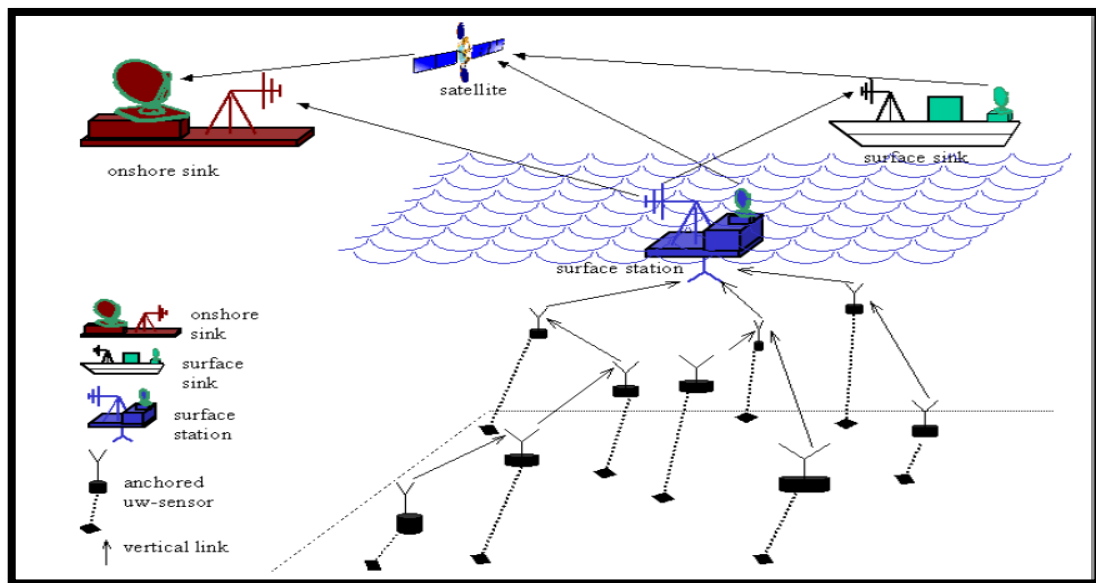


Figure I-8 : Réseau de capteurs à trois dimensions [25]

#### I.4.6.4 Les réseaux de capteurs avec véhicules sous-marins autonomes

L'architecture des réseaux de capteurs sous-marins en quatre dimensions (4D) est conçue par la combinaison des capteurs aquatiques fixe et mobile. Le réseau de capteurs sous-marins mobile consiste en véhicules sous-marins autonomes à distance (AUVs) pour recueillir des données à partir du cluster head et de relayer les données à la station distante.

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 AUVs sous-marins (Figure I-9) équipés de plusieurs capteurs sous-marins pouvant atteindre n'importe quelle profondeur dans l'océan. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour renforcer les capacités des réseaux de capteurs sous-marins.

Le scénario de communication entre AUV et le capteur sous l'eau dépend de données, la distance entre eux, et le type du lien utilisé (acoustique ou radio). Comme la transmission est directement avec l'AUV, les capteurs qui ont de grandes données et sont proches de AUV sous-marins peuvent utiliser des liaisons radio tandis que les capteurs qui ont de petites données à transmettre ou sont loin d'AUV peuvent utiliser des liens acoustique.

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



**• Échantillonnage adaptatif :**

Cette méthode consiste des stratégies de contrôle afin de 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. 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 surveillé.

**• Auto-configuration :**

Cette approche 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 temporaires 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. [27, 29]

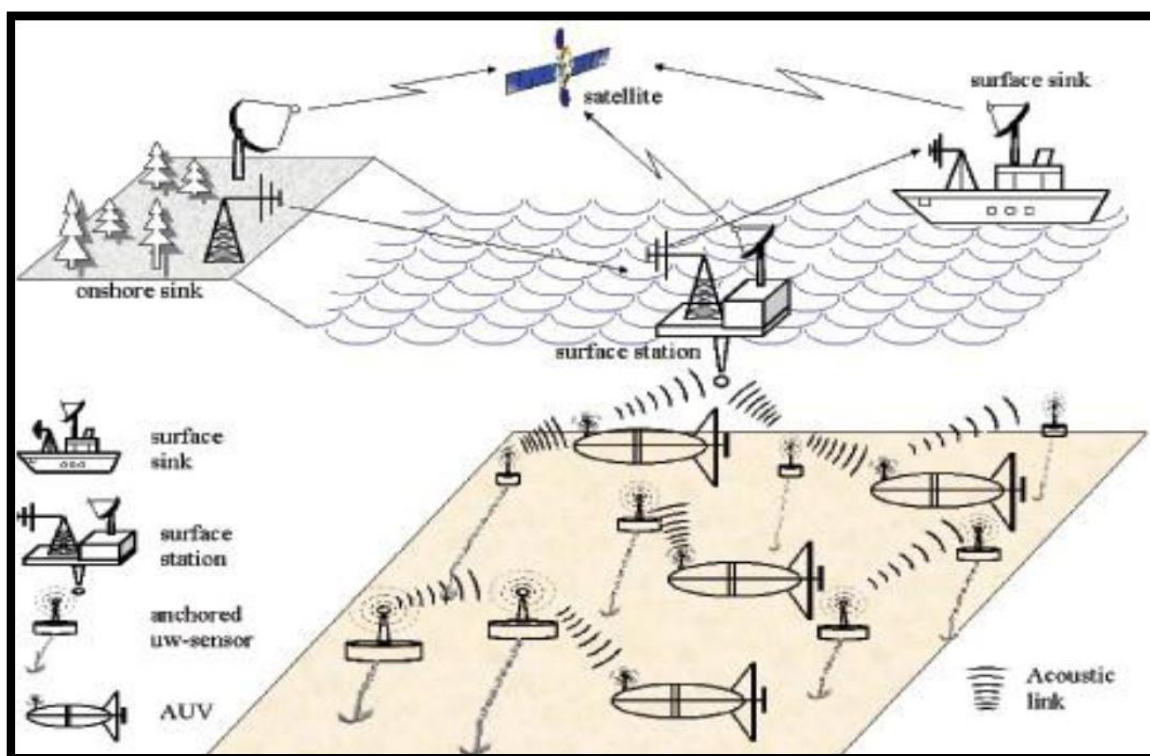


Figure I-9 : Réseau de capteurs à quatre dimensions [29]

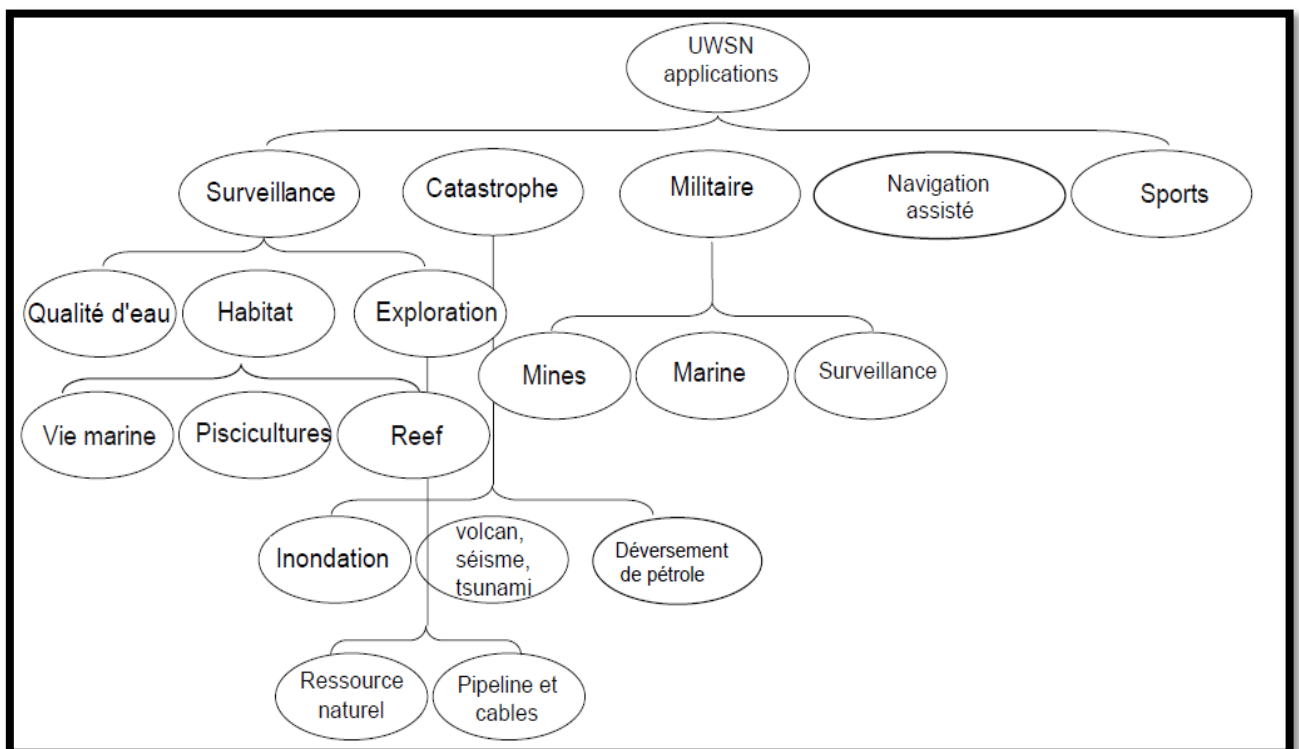
### I.4.7 Les applications des capteurs aquatiques

Il y a beaucoup d'applications dédiées aux réseaux de capteurs sous l'eau pour permettre des avancées dans le domaine de la surveillance des océans et des systèmes de l'observatoire, la surveillance côtière, le suivi des différentes entités de l'environnement aquatique, et l'exploration des ressources. Les réseaux de capteurs sous-marins trouvent leur application dans des différents usages comme le pétrole et l'extraction de gaz, les déversements de pétrole, la surveillance militaire et de reconnaissance, la détection des mines, la surveillance de la pollution, les catastrophes naturelles comme le tsunami et la prévision des ouragans, des récifs coralliens et de surveillance de l'habitat de la vie marine, et de la pisciculture. (Voir la Figure I-10)



Figure I-10: photo des différentes applications

Cette section présente un aperçu des développements récents dans le domaine des applications des réseaux de capteurs sous-marins, Une classification complète d'applications est représentée en Figure I-11. Ces applications peuvent être regroupé en 5 classes : la surveillance, la prévision et la gestion des catastrophes, applications militaires, la navigation assistée, et les sports, qui vont avoir un impact significatif sur le monde sous-marin et de fournir des avantages pour la vie humaine. Chaque classe est composée de sous-classes pertinentes.



**Figure I-11: les applications des réseaux des capteurs aquatiques [27]**

#### **I.4.7.1 Les applications de la surveillance**

La surveillance sous-marine se réfère à un réseau de capteurs qui est déployé sous l'eau pour surveiller l'environnement sous-marin, ses caractéristiques, ses propriétés. Ces applications sont particulièrement liées à la surveillance de l'environnement physique. Les applications de surveillance sous-marine peuvent en outre être classés en : la détection de la qualité de l'eau, la surveillance de l'habitat, et l'exploration sous-marines.

#### **I.4.7.2 Catastrophe**

Généralement, les catastrophes naturelles sont inévitables. Les catastrophes naturelles de cet environnement sont plus dangereuses et produit d'énormes destructions sur la terre. En conséquence, la surveillance des catastrophes et des mécanismes de prévention sont très

nécessaires. Un réseau de capteurs aquatique offre plusieurs applications pour la gestion et la récupération de ces catastrophes. Plus particulièrement, elle se rapporte à la surveillance des événements qui aggravent une suite des catastrophes.

Avec les moyens insuffisants pour la surveillance complète dans le milieu aquatique (par exemple, l'océan), la tâche devient encore plus difficile parfois avec la météo impitoyable. Par conséquent, une surveillance efficace de l'environnement sous-marin est un important défi de recherche. Des stratégies de surveillance pour la gestion des catastrophes et la prévention peuvent être formulées dans une large variété d'applications telles que les inondations, les éruptions volcaniques sous-marines, les tremblements de terre sous-marins, et les déversements de pétrole qui mènent des déséquilibres écologiques sous-marins.

#### **I.4.7.3 Militaire**

Les réseaux de capteurs sous-marins sont utilisés pour aider les applications militaires. Ces systèmes prennent l'aide de différents capteurs déployés pour la détection des différents aspects des applications militaires. Différents capteurs tels que des caméras, des sonars d'imagerie, et des détecteurs de métaux intégrés avec AUV sont utilisés pour aider à trouver des mines sous-marines, des ports sécurisés, et sont également utilisés pour le suivi et la surveillance. Ces applications peuvent conduire à une solution économique pour protéger les forces navales.

#### **I.4.7.4 Navigation assistée**

L'environnement sous-marin est extrêmement inexploré, aléatoire, accidenté et sombre avec la profondeur. Dans un tel environnement, il est nécessaire d'avoir des mécanismes pour aider la navigation des navires, bateaux et même nageur explorateurs. Pour cette application, un réseau de capteurs aquatique peut être utilisé pour fournir des systèmes et des applications de navigation fonctionnels.

#### **I.4.7.5 Sports**

Un large éventail d'applications des réseaux de capteurs sous-marins existe pour la catégorie des sports sous-marins. Ces applications sont différentes des autres applications marines en termes de vitesse de la mobilité des nœuds, des paramètres de détection, et ainsi de suite.

Un réseau de capteurs sans fil peut être utilisé pour surveiller la performance d'un nageur ou plusieurs nageurs, où ces performances sont envoyées aux entraîneurs et aux autres nageurs simultanément. Il peut être utilisé aussi pour chercher l'emplacement des nageurs

dans une piscine. Ceci est fait en utilisant des variations magnétiques qui sont causées par les piscines.

En ce qui concerne les applications sportives sont considérées, émetteurs-récepteurs RF sont largement utilisés; Toutefois, une tendance à l'aide de signaux optiques a également été utilisé comme la plupart des applications qui tombent dans cette catégorie utilisent une faible zone de couverture (comme dans les piscines). Architectures en 2D ont été utilisées parce que les capteurs sous forme de clusters sont en suspension dans l'eau pour recueillir l'information nécessaire qui aurait communiqué avec le cluster Head (agissant comme une station distante lorsque les distances sont courtes). [27]

### I.5 La différence entre réseaux de capteurs terrestre et sous-marins

Les réseaux de capteurs sous-marins sont très différents des réseaux de capteurs terrestres [25], il existe plusieurs points de divergences entre eux, ces différences sont résumées dans les points 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.

◆ **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.

♦ **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.

♦ **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. [24]

♦ **Puissance:** Plus de puissance est nécessaire dans les communications sous-marines dues à des distances supérieures et les plus complexes de traitement du signal au niveau des récepteurs. [25]

## I.6 Conclusion

Les réseaux de capteurs sous-marins sont des technologies intéressantes et très utilisées dans divers domaines

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les réseaux de capteurs sous-marins. Nous avons identifié les caractéristiques uniques des capteurs aquatiques, décrit les défis posés par les particularités du canal sous-marin et présenté les différentes architectures de réseau pour différents types d'applications aquatiques.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder un état de l'art sur les protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sous-marins.

A decorative border made of grey, stylized floral and vine motifs, including leaves, scrolls, and fleur-de-lis-like elements, framing the central text.

## *Chapitre II*

*Etat de l'art sur  
les protocoles de  
routages conçus  
pour les  
(UWSNs)*

## II.1 Introduction

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

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

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

Une classification des protocoles de routage est présentée, ces protocoles sont classés en six catégories en fonction de leurs caractéristiques et fonctionnalités. L'utilisation d'un tableau comparatif pour comparer entre ces protocoles en fonction de leur rapport de livraison, efficacité de délai, efficacité énergétique, efficacité de la bande passante, fiabilité, saut par saut/ bout en bout, performance.

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

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers une destination donnée dans un réseau de connexion. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance comme la consommation énergétique. Le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût qui assure le routage du trafic nominal et garantit la qualité de service.

Chaque nœud participe donc au routage ce que lui permet de découvrir les chemins existants afin d'atteindre les autres nœuds du réseau. Le fait que la taille d'un réseau puisse être importante, surtout dans le cas des réseaux de capteurs.



---

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau Ad-hoc est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds afin que des messages puissent être acheminés.

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

En plus, le routage dans les capteurs sous-marins consiste en général, à acheminer les données collectées par les nœuds du réseau vers un seul ou plusieurs destinations qui sont les puits (Sink). Ces données sont caractérisées par une corrélation spatiale et temporaire très importante relative à la densité élevée du déploiement des nœuds. [30, 39, 23]

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

Actuellement, de nombreux protocoles de routage sont disponibles pour les réseaux de capteurs sans fil terrestres. Toutefois, les propriétés spécifiques du milieu sous-marin font les protocoles de routage existants inapproprié sous l'eau. Les principaux défis dans le développement de protocoles de routage efficaces pour les environnements sous-marins sont les suivants:

**-Délai de propagation élevé :** Les signaux radio ne fonctionnent pas de manière efficace sous l'eau et ce problème encourage l'utilisation de canal acoustique comme méthode de communication. Cependant, les principaux problèmes de canal acoustique sont les faibles bandes passantes et les délais de propagation élevés.

**-la mobilité des nœuds :** En raison de courants d'eau, les nœuds peuvent fluctuer ou déplacer s'ils ne sont pas ancrés au fond de la mer. Cette situation se traduit par une topologie de réseau dynamique. En outre, les véhicules sous-marins autonomes AUV et des robots utilisés pour l'exploration et les commandes peuvent être utilisées pour acheminer les données de nouveau.

**-Erreur du canal acoustique sous-marin :** les canaux acoustiques ont la capacité de bande passante très faible, ils souffrent du problème du taux d'erreur binaire élevé.

- **énergie limitée** : comme dans les réseaux de capteurs terrestres sans fil, la majorité des nœuds de capteurs dans un environnement aquatique sont alimentés par batterie. En effet, il y a une forte dépendance entre la durée de vie d'un nœud capteur et la durée de vie de la batterie.

- **environnement de déploiement dur** : les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller, les informations de positions des capteurs dispersés aléatoirement sur une zone à surveiller sont difficiles à connaître ou à prévoir.

En plus de ces défis, tout en développant un protocole de routage sous-marine, il est important d'éviter l'overhead dans les messages échangés ou l'utilisation des mécanismes de découverte de la route à base d'inondations puisque l'énergie et la consommation de bande passante de ces techniques est élevé. [31]

## II.4 Critères de performances d'un protocole de routage

L'efficacité d'un protocole de routage permet à un réseau de capteurs de mener sa mission jusqu'à la fin et pour une longue durée. Ainsi, on dit qu'un protocole de routage est efficace s'il répond aux propriétés suivantes :

- **Extensibilité**

Il supporte le passage à l'échelle sans présenter de goulots d'étranglement.

- **Mobilité des nœuds**

La position des capteurs sur la zone de captage n'est pas toujours constante. Un nœud capteur peut devenir mobile et changer sa position selon les besoins de l'utilisateur. Des traitements spécifiques pour la maintenance des liens et la mise à jour des informations de routage sont à prévoir lors de la conception d'un protocole de routage.

- **Consommation énergétique**

Le facteur le plus important à prendre en considération est l'énergie consommée dans les réseaux de capteurs lors de la détection et de la transmission des données, sa conservation est indispensable pour garantir une longue durée de vie aux réseaux puisqu'il est généralement impossible de recharger les batteries des capteurs. Cette consommation est optimisée quand le nombre de messages retransmis et le nombre de messages redondants aux réceptions sont réduits.

---

- **Consommation de la bande passante**

La consommation de la bande passante est optimisée par La minimisation du nombre de messages redondants.

- **Latence**

C'est le temps pris par un nœud capteur pour effectuer des opérations de calcul sur les données récoltées ou reçues. Ce temps doit être raisonnable pour ne pas causer des retards de transmission d'informations pour des applications critiques et à temps réel.

- **Sécurité des échanges**

Le routage est l'un des mécanismes les plus essentiels dans les réseaux de capteurs sous-marins. L'insécurité des mécanismes de routage peut non seulement nuire aux performances des capteurs sous-marins, mais aussi le rendre vulnérable à de nombreuses attaques de sécurité, telles que la modification, l'interception et la fabrication de l'information.

Des mécanismes de sécurité doivent être adaptés aux réseaux de capteurs sous-marins afin de protéger le fonctionnement du réseau. [39]

## **II.5 Classification des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins**

Le routage est un aspect important dans un réseau multi-sauts. La couche de routage est chargée de sélectionner les voies les plus commodes pour fournir des données vers la destination. Dans de tels scénarios, les protocoles de routage doivent être en mesure de déterminer les meilleurs itinéraires à la destination sans aucune connaissance en réseau préexistant.

Récemment, de nombreux protocoles ont été proposés pour les réseaux de capteurs sous-marins. Dans cette section, les principaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins sont discutés et présentés dans la figure II-1. Le routage efficace est un élément clé dans ces types de réseaux. Par conséquent, les protocoles de routage doivent tenir compte de leurs caractéristiques particulières et les conditions requises de nouveaux champs d'application pour les capteurs sous-marins. Les protocoles présentés peuvent être classés en plusieurs façons différentes en fonction des critères de pondération. La classification qui a été

suivie est conforme aux critères indiqués dans chaque sous-section, bien que de nombreux protocoles puissent appartenir à plusieurs classes. [32]

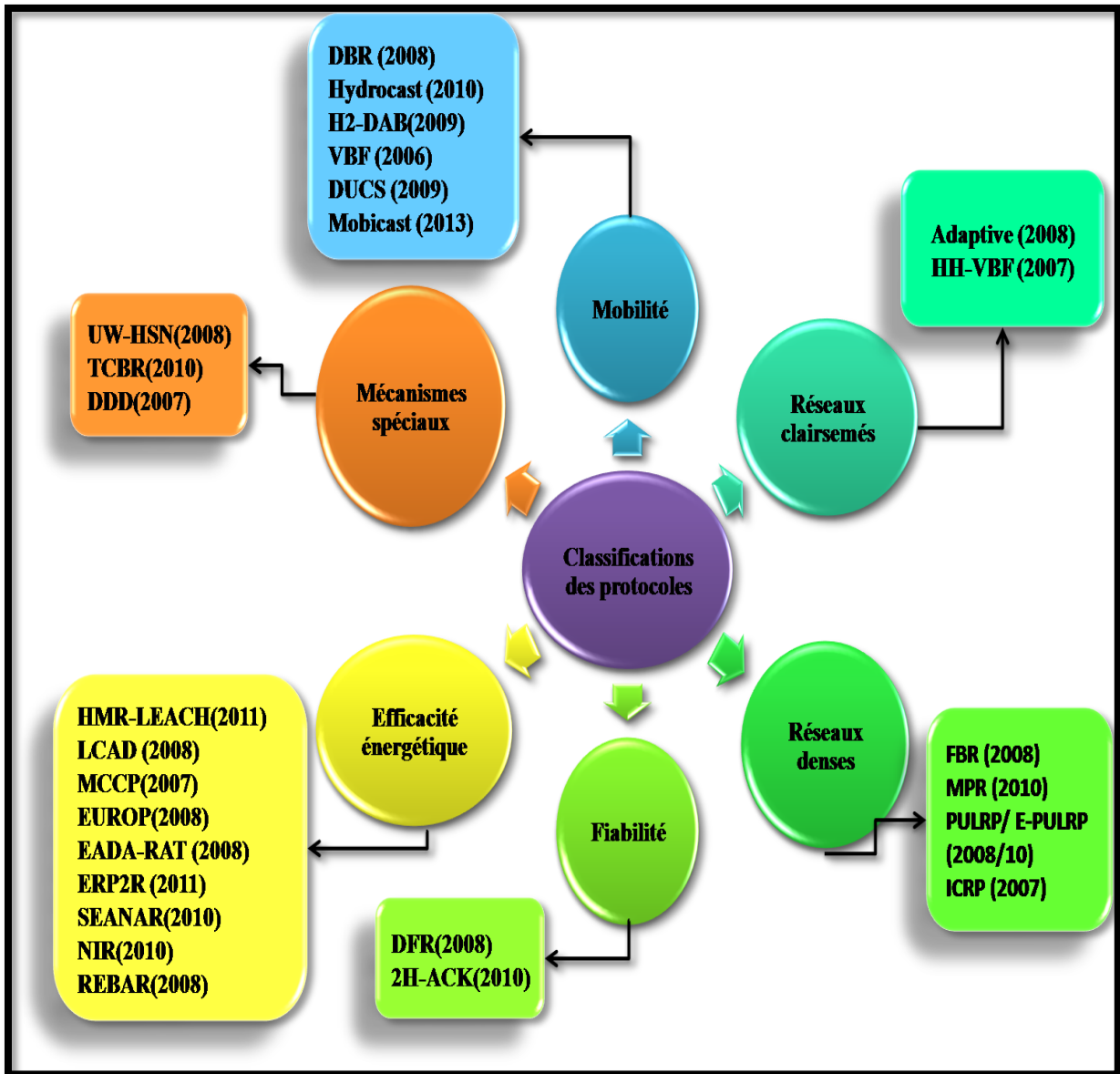


Figure II-1: Classification des protocoles de routage.

### II.5.1 La mobilité

Dans cette sous-section, les protocoles de routage qui soutiennent la mobilité sont discutés. Il existe de nombreuses applications de réseaux sous-marins où la mobilité est nécessaire au moins dans certains nœuds; par conséquent, différents auteurs ont tenté de faire face à ce problème. [32]

### II.5.1.1 Le protocole de routage Basé sur la Profondeur « DBR »

Depth Based Routing (**DBR**) est un protocole qui ne nécessite pas d'informations dimensionnelles complètes de l'emplacement. Il gère un réseau dynamique avec une bonne efficacité énergétique et utilise une architecture de réseau multi-sinks sans introduire des frais supplémentaires.

Sur la base des informations de profondeur de chaque capteur, le protocole DBR transmet des paquets de données vers la surface de l'eau. En outre, un paquet de données a un champ qui enregistre les informations de profondeur de son récent transitaire, ce champ est mis à jour à chaque saut.

Une architecture à multiple puits (sink) dans les réseaux de capteurs sous marins peut être un avantage pour DBR, comme le montre la figure II-2, avec l'hypothèse que chaque nœud sous-marin connaît ses informations de profondeur à savoir la distance verticale de lui-même à la surface de l'eau.

En effet, les informations de profondeur peuvent être obtenues facilement avec un capteur de profondeur. Cependant, l'obtention d'une information complète de sa position est assez difficile. Comme on le voit sur la figure II-2, les nœuds capteurs transmettent des signaux acoustiques (cercle rouge en pointillé) aux nœuds sinks situés sur la surface. A leur tour, ils transmettent des signaux radio (cercle continu bleu) soit à des stations terrestres ou satellites.

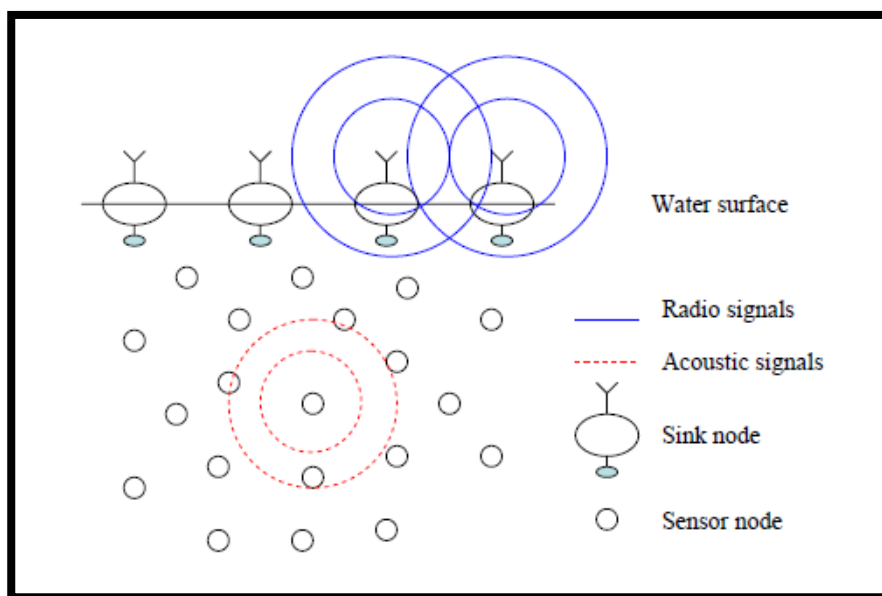


Figure II-2 : Architecture multiple-sink de réseau de capteurs sous-marins.

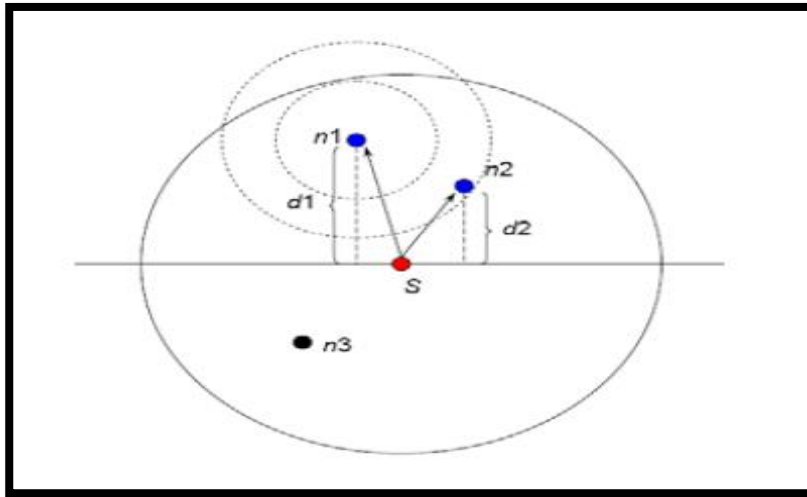
---

Dans ce protocole, chaque nœud maintient une file d'attente de priorité Q1 et la mémoire tampon d'historique des paquets Q2, afin de réduire le nombre des nœuds de transfert et de contrôler la transmission dupliqué 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 dupliqué est contrôlée 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 dupliqués, un nœud vérifie toujours le tampon de paquet historique Q2 avant la transmission d'un paquet.

Comme cela est représenté sur la figure II-3, le nœud S est l'émetteur, et les nœuds n1, n2 et n3 sont tous des nœuds voisins à un seul saut. Le cercle de la ligne solide représente la plage 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 de sorte qu'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 son envoi programmé de temps pour le paquet.



**Figure II.3 : Sélection de nœud de Transfert dans le protocole DBR**

Afin d'évaluer la performance de DBR les mesures suivantes ont été utilisées :

1. Rapport de livraison de paquet qui est défini comme le rapport entre le nombre de paquets distincts reçus avec succès dans le puits au nombre total des paquets générés au niveau du nœud source. Bien qu'un paquet puisse atteindre les puits à plusieurs reprises, ces paquets redondants sont considérés comme un seul paquet distinct.
2. Délai moyen de bout en bout qui représente le temps moyen pris par un paquet se déplacer à partir du nœud de source à l'un des puits.
3. La consommation totale d'énergie qui représente l'énergie totale consommée dans la livraison de paquets, y compris la transmission, la réception et la marche au ralenti la consommation d'énergie de tous les nœuds du réseau. [33,23]

### **II.5.1.2 Le protocole de routage basé sur l'acheminement par vecteur « VBF »**

Vector Based Forwarding (**VBF**) a été le premier protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs sous marins mobiles où chacun des nœuds voisins de l'expéditeur détermine sa candidature pour être le nœud relais suivant. Dans les réseaux de capteurs, la contrainte énergétique est un facteur crucial car les capteurs fonctionnent habituellement sur la batterie, et il est impossible ou difficile de les recharger dans la plupart des scénarios d'application.

Dans la figure II-4, le paquet est fourni à partir du nœud source  $S_1$  vers le nœud de destination (sink)  $S_0$  guidé par le vecteur de routage  $\overrightarrow{S_1S_0}$  (une ligne hypothétique avec des

coordonnées en commençant à partir de la source vers le nœud de destination). Les paquets de données sont transmis que par les nœuds capteurs qui se trouvent dans un rayon  $W$  du vecteur, où  $W$  est un paramètre accordé. Le processus de transfert de VBF est considéré comme une pipe de routage (pipe virtuel) entre la source  $S1$  et la destination  $S0$ . Un nœud intermédiaire transmet un paquet au nœud le plus proche du vecteur de ses nœuds voisins. Lorsque les nœuds capteurs sont densément déployés, VBF peut utiliser trop de nœuds dans le transfert de données, ce qui pourrait augmenter la consommation d'énergie. Pourtant, en VBF uniquement les nœuds proches du vecteur de routage sont impliqués dans la transmission de paquets et tous les autres nœuds sont en état de repos, ce qui entraîne des économies d'énergie.

Dans VBF, chaque paquet comporte les positions de l'émetteur (expéditeur), la cible (destination) et le transitaire (relais). Le vecteur d'acheminement de l'émetteur vers la cible spécifie le chemin de transmission. Une fois qu'un paquet est reçu, le nœud calcule sa position par rapport au relais et si elle détermine qu'il est assez proche du vecteur de routage (pipe virtuel), il met sa propre position calculée sur le paquet et continue de le transmettre. D'autre part, si elle n'est pas assez proche du vecteur de routage, il ignore tout simplement le paquet. Tous les nœuds capteurs qui transmettent un paquet forment une pipe d'acheminement dans le réseau de capteurs.

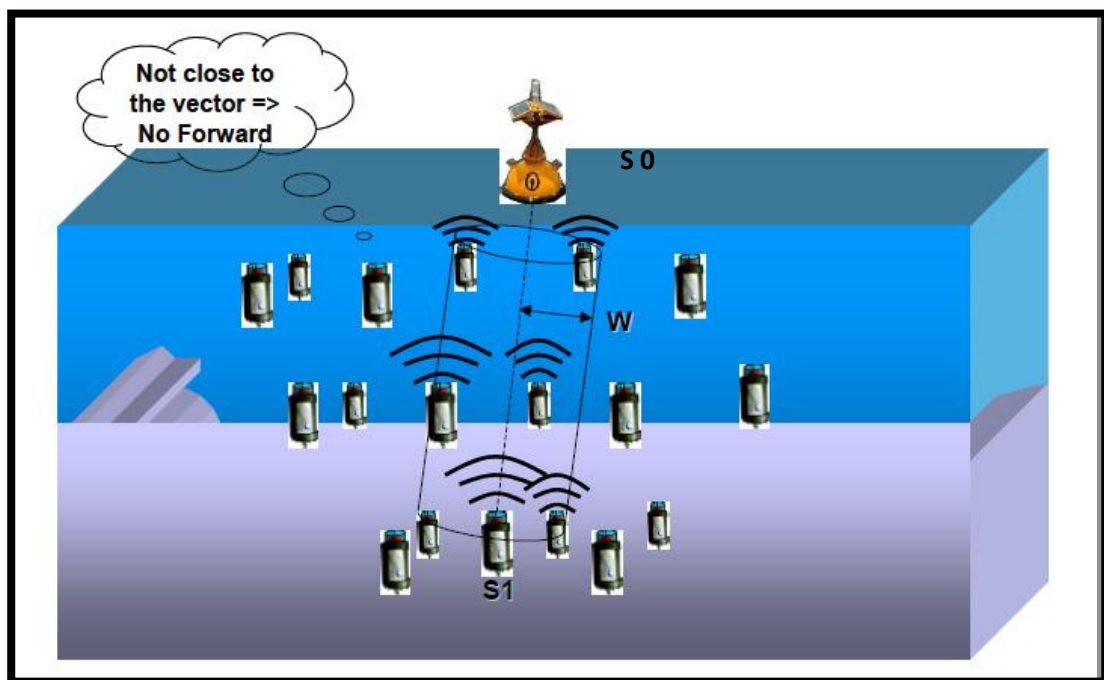


Figure II-4 : Une vue de protocole VBF.



VBF est extensible à la taille du réseau, car il ne nécessite pas d'informations d'état à chaque nœud. L'énergie du réseau est conservée parce que seuls les nœuds qui traversent le chemin de transmission sont impliqués dans le routage des paquets. [34]

Cependant, VBF a quelques problèmes. Tout d'abord, l'utilisation d'une pipe de routage virtuel de la source à la destination peut affecter l'efficacité d'acheminement du réseau avec différentes densités de nœud. Dans certaines régions, si les nœuds sont très peu déployés ou deviennent plus clairsemés en raison de certains mouvements, alors il est possible que très peu ou même aucun nœud ne se trouve dans ce canal virtuel, qui est responsable de la transmission de données; il est même possible que certains chemins puissent exister en dehors de la pipe. En fin de compte, cela se traduira par de faibles délivrances de données dans les zones clairsemées. Deuxièmement, VBF est très sensible au seuil de rayon de la pipe de routage, et ce seuil peut affecter les performances de routage de façon significative; telle fonction peut ne pas être souhaitable dans les développements de protocole réel. En outre, certains nœuds le long de la pipe de routage sont utilisés plusieurs fois afin de transmettre les paquets de données provenant de sources concrètes à la destination ce qui peut épuiser leur énergie rapidement. [39]

## **II.5.2 Réseaux clairsemés**

Dans cette sous-section, on va parler sur les protocoles de routage destinés principalement aux réseaux clairsemés. Un nombre croissant d'applications pour ce type de réseau sont en train d'émerger, car les coûts de déploiement dans les réseaux sous-marins sont plus élevés que ceux des réseaux RF. [32]

### **II.5.2.1 Le protocole de routage adaptative**

Dans cette section, le protocole de routage adaptatif est présenté. Dans ce protocole de routage, il existe deux types de paquets:

Les paquets HELLO et les paquets de données. Les paquets HELLO sont utilisés pour que les nœuds capteurs peuvent échanger des informations et de découvrir le voisinage, tandis que chaque paquet de données comprend la charge utile ordinaire et une surcharge de protocole simple avec deux champs: le niveau d'urgence et les paquets générant le temps, qui sont utilisée dans le calcul de la priorité de paquet.

---

Ce protocole n'a pas d'exigences élevées sur les capacités de calcul et de stockage de nœud capteur. Outre les paramètres de base du système, tels que la taille de la mémoire tampon, la batterie résiduelle, et la file d'attente de paquet reçu. La principale information supplémentaire, c'est que chaque nœud doit maintenir le statut de son voisinage.

### ❖ Calcul de priorité

La priorité d'un paquet doit tenir compte des caractéristiques du paquet et les statuts du réseau. Plus précisément, la priorité du paquet est calculée sur la base d'un vecteur d'informations. En considérant un paquet au niveau d'un nœud, on définit un vecteur d'informations comprenant le niveau des paquets d'urgence, l'âge du paquet, la densité de nœuds spatio-temporel, et le niveau de la batterie du nœud. Chaque élément est décrit comme suit.

- **niveau des paquets d'urgence:** Lorsqu'un paquet est généré, son niveau d'urgence est ordinaire, intermédiaire ou émergente, ce qui indique la qualité de l'eau détectée. Ceci est le principal facteur pour calculer la priorité de paquet.

- **Age du paquet:** Cet élément peut être récupéré à partir du temps de génération de paquet dans l'en-tête et représente le temps passé du paquet dans le réseau

- **densité de nœud spatio-temporel:** Cet élément est défini comme étant le nombre de différents voisins du nœud rencontré dans le passé. Il est mis à jour chaque fois que le nœud reçoit un paquet *HELLO*. Lorsqu'un nœud a une faible densité spatio-temporelle, le plus probable, il est dans une zone très clairsemée. Dans ce cas, les priorités des paquets sont augmentées au niveau de ce nœud pour acheminer rapidement hors de cette zone clairsemé pour éviter de longs retards.

- **niveau de la batterie du nœud:** Cet élément définit l'énergie résiduelle de la batterie au niveau du nœud. Il est clair que la batterie de nœud est l'un des moyens les plus critiques dans les réseaux de capteurs sous-marins. Pour utiliser pleinement l'énergie, lorsque le niveau de la batterie de nœud est faible, les priorités des paquets peuvent être diminuées en transit de sorte que le nombre d'exemplaires à reproduire pour chaque paquet est réduit. De cette façon, il est possible d'utiliser la limite des ressources d'énergie pour fournir plus de paquets distincts plutôt que plusieurs copies de certains paquets.

La valeur de priorité de paquet est calculée comme suit. La gamme de la priorité est entre [0 et 100] ; où 0 signifie la priorité la plus basse et 100 signifie la plus haute priorité. De plus, une fonction de mappage a été créée pour chaque élément du vecteur d'information de sorte que les valeurs mappées tombent dans la même plage que la priorité. Plus précisément, soit E, A, D, B représentent respectivement les valeurs mappées pour le niveau d'urgence de paquets, l'âge de paquets, le niveau de la batterie de nœud et densité spatio-temporelle de nœud. La priorité  $p$  est calculée comme une combinaison linéaire de la manière suivante:

$$P = a_1E + a_2A + a_3D + a_4B \quad (1)$$

$$\text{Où } a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1; \quad a_1; a_2; a_3; a_4 \in [0; 1]; \quad (2)$$

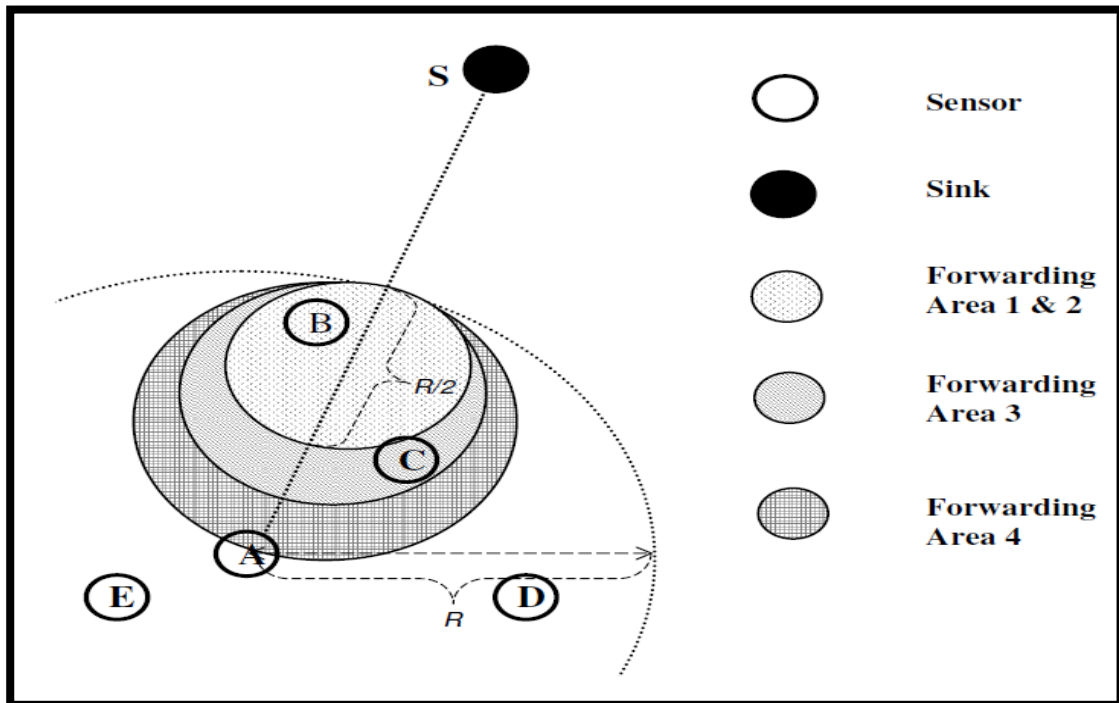
Les poids  $a_i$  ( $0 \leq i \leq 4$ ) sont choisis en fonction des exigences de l'application. Par exemple, dans la surveillance de la pollution de l'eau, les objectifs sont de réagir rapidement aux paquets émergents alors atteindre l'efficacité énergétique pour les paquets ordinaires. Ainsi, le niveau d'urgence de paquet doit être explicitement différencié et le poids,  $a_1$ , devrait être assez grand. Dans d'autres scénarios, on peut vouloir attribuer un grand poids à  $a_2$  si l'objectif est de minimiser les retards de bout en bout.

Pour calculer les paquets de priorité: lorsqu'un nœud reçoit un paquet, il ne calcule pas la priorité du paquet immédiatement. Le seul nœud qui calcule la priorité du paquet, c'est quand il rencontre un nouveau voisin (à savoir, une occasion de transmission potentielle). Cette approche est appelée par le contact de routage et peut aider à utiliser les dernières informations pour construire le vecteur d'information. Une fois que la priorité du paquet est calculée, le nœud peut déterminer si le nouveau voisin rencontré est un nœud approprié pour le "saut suivant". Si oui, le nœud reproduit une copie du paquet à ce voisin, et utilise juste la priorité calculée pour décider le nombre gauche de copies à transmettre. Après le nœud transmet le nombre requis de copies, il va jeter le paquet.

Lors de la livraison du paquet dans le réseau, tous les éléments du vecteur d'information ne cessent de changer, sauf le niveau d'urgence. Ainsi, pour tout paquet, il peut avoir différentes priorités à différents nœuds.

Après qu'un nœud calcule la priorité pour un paquet, il doit prendre des décisions de routage en conséquence pour transmettre le paquet vers Le sink. Dans ce protocole de routage adaptatif, on divise l'ensemble du spectre de routage en 4 états. Plus précisément, on partitionne uniformément l'échelle de priorité en 4 intervalles [0; 25], (25; 50], (50; 75] et (75;

100] basé sur la valeur de priorité. Un nœud choisit l'état de routage  $i$  pour qu'un paquet puisse transmettre  $i$  copies du paquet ( $1 \leq i \leq 4$ ). Avec l'aide d'un service de localisation, le routage géographique est celui utilisé dans ce protocole. La Figure II-5 illustre la procédure de décision de routage à un nœud, montrant en particulier comment les quatre états de routage sont intégrés avec un simple schéma de routage géographique.



**Figure II-5 : Illustration de la procédure de décision de routage.**

On notera que la Figure II-5 est un graphique 2-D (la vue de face) de l'espace de réseau 3-D. Dans cette figure, le nœud A est le nœud qui a besoin de prendre des décisions de routage en fonction des états de routage de ses paquets en transit; nœud B, nœud C, nœud D, et le nœud E sont ses voisins; nœud S est le sink; et R désigne le rayon de transmission des nœuds de capteurs. De plus, pour un état d'acheminement, une zone correspondant est choisi appelée la zone de transfert. Pour un paquet à l'état de routage  $i$ , il dispose d'un espace de transfert correspondant  $i$ , qui est une sphère tangente à la sphère de transmission du nœud A au point d'intersection  $\vec{AS}$  (le vecteur de transmission du nœud courant vers le sink) et la sphère du nœud A de transmission. La taille de chaque zone de transfert est prédéterminée. Dans cette conception, le diamètre de la zone de transmission 1, 2, 3, 4 est respectivement  $R/2$ ,  $R/2$ ,  $3R/4$ , et  $R$ , (en raison de la rareté des réseaux de capteurs sous-marins, une même taille était choisit pour la zones d'expédition 1 & 2). En général, il est clair que, une priorité plus élevée (à savoir, un état de routage plus grand) correspond à une zone de transfert plus grande. Dans

---

la Figure II-5, le nœud 'A' a un paquet avec une priorité de 45. Ensuite, ce paquet a le routage d'état 2. Ainsi le nœud A transmet une copie du paquet à un voisin dans la zone de transfert 2, qui est le nœud B, et attendre jusqu'à ce que le prochain voisin se déplaçant dans la zone de transfert 2 à transmettre une autre copie. Si plusieurs voisins acceptables à différentes couches, un nœud préfère les voisins de la couche supérieure, car ils sont plus proches de sink. [35]

### II.5.2.2 Le protocole de routage Saut par saut VBF « HH-VBF »

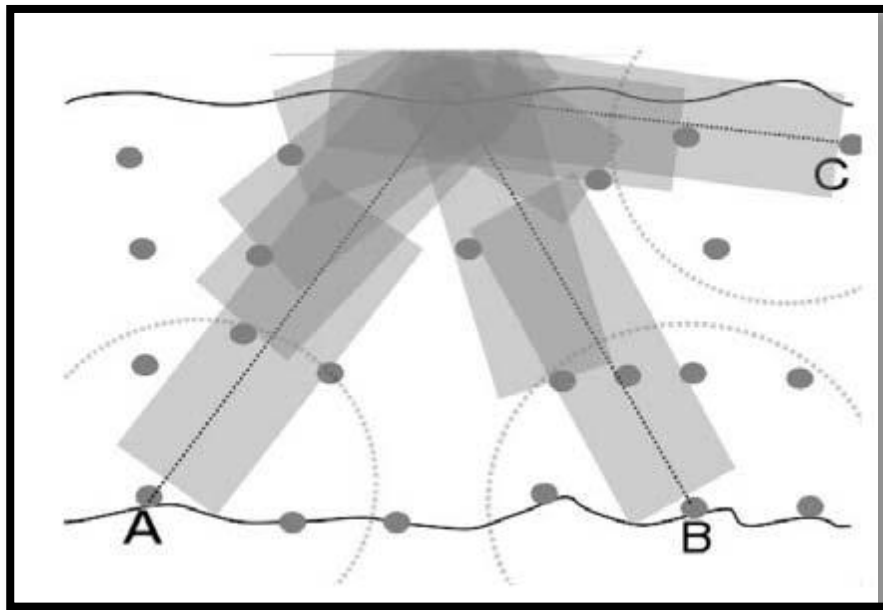
Afin de surmonter deux problèmes rencontrés par le protocole VBF, à savoir le faible taux de livraison de données dans les réseaux clairsemés, et la sensibilité au rayon de la pipe de routage, le protocole HH-VBF (Hop by Hop-VBF) a été proposé. HH-VBF forme la pipe de routage de façon saut-par-saut, en améliorant le taux de délivrance de paquets de manière significative. Bien qu'il soit basé sur le même concept du vecteur de routage utilisé en VBF, au lieu d'utiliser une seule pipe virtuelle à partir de la source au sink, il définit un canal virtuel différent autour du vecteur de chaque saut de l'expéditeur vers le sink. De cette façon, chaque nœud peut prendre des décisions d'acheminement de paquets d'une manière adaptative sur la base de son emplacement actuel. Cette conception peut directement apporter les avantages suivants:

- Étant donné que chaque nœud possède sa propre pipe de routage, le rayon maximal de la pipe est la portée de transmission. En d'autres termes, il n'y a pas de nécessité d'augmenter le rayon de la pipe au-delà de la portée de transmission afin d'améliorer les performances de routage.

- Dans les réseaux clairsemés, malgré que le nombre de nœuds qualifiés par la transmission puisse être petit, le protocole HH-VBF peut trouver un chemin de transmission de données tant que l'un existe dans le réseau.

Dans HH-VBF, la pipe virtuelle de routage est redéfinie pour être une pipe virtuelle par-saut, au lieu d'une pipe unique à partir de la source (A ou B) au sink Z. Lorsqu'un nœud E reçoit un paquet de la source A ou un nœud de transitaire D, il calcule le vecteur de l'expéditeur vers le sink, puis le récepteur calcule sa distance à ce vecteur. Si cette distance est inférieure au seuil prédéfini, alors il est admissible de transmettre le paquet. Lorsque certaines zones du réseau ne sont pas remplies avec des nœuds, par exemple, il existe des "vides" dans

le réseau. Dans ce cas, le transitaire est incapable d'atteindre tout les autres nœuds. La figure II-6 illustre l'idée de base de protocole HH-VBF. [32]



**Figure II-6 : Vecteurs par-Saut de HH-VBF.**

Bien que les résultats de simulation montrent que HH-VBF produit des résultats nettement meilleurs pour le taux de délivrance de paquets, en particulier dans les zones clairsemées par rapport à VBF, le problème inhérent au seuil de rayon de la pipe de routage persiste encore; ce qui peut affecter sa performance. En outre, en raison de sa nature saut-par-saut, HH-VBF produit beaucoup plus de surcharge par rapport à la signalisation en VBF. [39]

### II.5.3 Réseaux denses

Dans cette sous-section, les protocoles de routage qui traitent principalement des réseaux denses sont présentés. De tels réseaux sont caractérisés par une forte densité de nœud dans la zone géographique du déploiement du réseau. [32]

#### II.5.3.1 Le protocole de routage axé par faisceau « FBR »

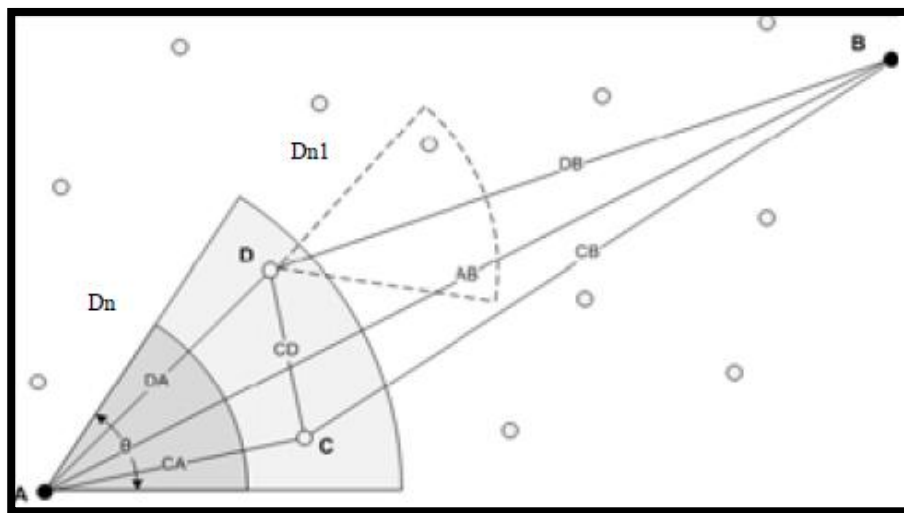
Le protocole **FBR** (Focused Beam Routing) représente une technique de routage évolutive pour les réseaux de capteurs sous-marins (généralement pour les réseaux ad-hoc multi-saut) basée sur des informations de localisation. Elle est adaptée aux réseaux contenant à la fois des nœuds fixes et mobiles qui ne sont pas nécessairement synchronisés sur une horloge globale.

---

En FBR, un nœud source doit être conscient de son propre emplacement et l'emplacement de sa destination finale, mais pas ceux des autres nœuds. Le protocole FBR peut être définie comme une approche inter-couche (cross-layer), dans lequel le protocole de routage, le contrôle d'accès au support et les fonctionnalités de la couche physique sont étroitement couplés par un contrôle de puissance. Il peut être décrit comme un algorithme distribué, dans lequel un chemin est établie dynamiquement en tant que paquet de données traverse le réseau vers sa destination finale. La sélection du prochain relais est effectuée à chaque étape du chemin après que les candidats appropriés ont proposés eux même. [36]

L'analyse de ce protocole de routage se fait avec la présentation de l'exemple illustré dans la Figure II-7. Le Protocole FBR 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  $P_N$ .

Dans FBR, chaque niveau de puissance lui 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 A vers la destination finale B. Un nœud source diffuse un paquet RTS (Request To Send) 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  $P_1$  répondent avec un paquet CTS (Clear To Send). Dans le cas où, le nœud source reçoit plusieurs paquets de réponse CTS, il sélectionne un nœud intermédiaire approprié (le nœud le plus proche de la destination) et transmet le paquet à ce nœud intermédiaire. 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. [23]



**Figure II-7 : Illustration du protocole FBR.**

La procédure d'acheminement de paquets d'un nœud vers le nœud suivant est montrée. En supposant que, il y a une ligne imaginaire entre les nœuds A et B. Tous les nœuds qui reçoivent A la multidiffusion de RTS, d'abord ils calculent leur emplacement par rapport à la ligne AB. L'objectif ce faisant est de déterminer qu'elles sont des candidats pour relayer. Les candidats sont ceux qui se trouvent dans un cône d'angle  $\pm \theta / 2$  émanant de l'émetteur vers la destination finale. Si un nœud détermine qu'il est dans le cône de l'émetteur, il répondra à la RTS. Ces nœuds qui sont en dehors du cône ne répondront pas.

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

La consommation d'énergie moyenne par bits prend en compte l'énergie investie dans la transmission, l'écoute et la réception active des paquets de commande et de données, ainsi que leurs retransmissions possibles. [36]

#### **II.5.4 Routage fiable**

Dans cette sous-section, une présentation sur les principaux protocoles de routage, en se concentrant sur la fiabilité ont été proposée. La fiabilité de routage pour les réseaux de capteurs sous-marins est généralement obtenue en maintenant les différentes copies des paquets envoyés par des chemins différents vers la destination. Une technique gourmande et simple à mettre en œuvre c'est l'inondation de paquet. [32]



### II.5.4.1 Le protocole de Routage Directionnel à Base d'Inondation « DFR »

Pour les réseaux de capteurs sous-marins, l'établissement du chemin nécessite beaucoup de charges sous la forme de messages de contrôle. En outre, des conditions dynamiques et des grandes pertes de paquets dégradent la fiabilité, ce qui conduit à plusieurs retransmissions. Le protocole de routage existant proposé pour améliorer la fiabilité ne considère pas la qualité du lien. Voilà pourquoi il n'y a aucune garantie sur la livraison de données, en particulier quand un lien est sujette aux erreurs. Afin d'augmenter la fiabilité, Daeyoup et Dongkyun (2008) ont proposé le protocole (DFR) directional flooding-Based Routing.

Fondamentalement, le protocole DFR, est une technique d'inondation de paquet, ce qui permet d'augmenter la fiabilité. On suppose que chaque nœud connaît son emplacement, l'emplacement d'un-saut des voisins, et la destination finale. En outre, DFR aborde le problème de vide en laissant au moins un nœud pour participer au processus de transfert de données.

Comme on le voit sur la Figure II-8, la zone d'inondation est décidée par l'angle entre FS et FD, où F est le paquet de nœud de réception, tandis que S et D présentent respectivement la source et la destination. Après avoir reçu un paquet de données, F détermine de manière dynamique l'acheminement de paquets en comparant SFD avec l'angle de critère d'inondation, appelé `BASE_ANGLE`, qui est inclus dans le paquet reçu. Afin de gérer le taux d'erreur élevé et dynamique de paquets, `BASE_ANGLE` est ajustée de façon saut par saut en fonction de la qualité de la liaison, ce qui aide à trouver une zone d'inondation dynamique, qui est la meilleure qualité de liaison et la plus petite zone d'inondation.

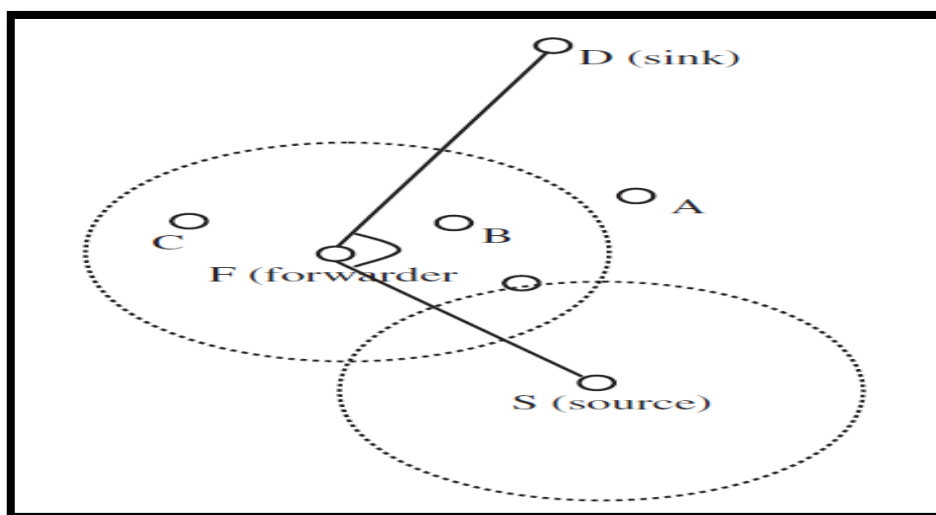


Figure II-8 : Exemple de transmission de paquets dans DFR.

---

La performance du protocole DFR dépend du nombre de nœuds choisis comme le prochain saut après l'inondation du paquet de données. Bien que le problème de la région vide est adressée en s'assurant qu'au moins un nœud doit participer à ce processus, tandis que dans les zones où la qualité du lien est pas bon, plusieurs nœuds peuvent transmettre le même paquet de données; donc plus de nœuds se joindront à l'inondation du même paquet de données, ce qui augmente la consommation des ressources de réseau. Deuxièmement, ils ont contrôlé le problème de vide en sélectionnant au moins un nœud pour transmettre le paquet de données vers le sink. Toutefois, lorsque le nœud émetteur ne peut pas trouver un saut suivant plus proche de sink, le problème de vide serait encore rencontré comme aucun mécanisme n'est disponible pour envoyer le paquet de données dans le sens inverse. [37]

### II.5.5 Efficacité énergétique

Dans cette sous-section, les protocoles de routage qui mettent l'accent sur l'efficacité énergétique sont présentés. L'énergie est un aspect fondamental dans le type de réseau déployé; par conséquent, il est généralement le principal sujet dans la littérature de recherche plus le délai et le débit. [32]

#### II.5.5.1 Le protocole de routage de regroupement des coûts minimum « MCCP »

Le protocole MCCP (minimum cost clustering protocol) est un protocole qui se base sur le « clustering » où les clusters sont formés sur la base d'une métrique de coût. Le coût d'un cluster est calculé sur la base de trois paramètres: la quantité d'énergie requise par les membres du cluster pour atteindre le cluster-Head, la position relative de cluster-Head et la station de base (sink), et l'énergie résiduelle du cluster-Head et les membres du cluster.

Dans l'approche proposée, un algorithme MCCA (algorithme de clustering de coût minimum) est proposé, où le cluster est sélectionné par une approche centralisée. Une unité de commande centralisée (un nœud sink ayant des connaissances complètes sur le réseau) effectue la formation des clusters. Dans le protocole MCCA, les ensembles potentiels de nœuds (clusters) sont sélectionnés en fonction des paramètres mentionnés précédemment. L'algorithme MCCA est étendu à une approche distribuée où MCCP est proposé.

Dans MCCP, la formation des clusters est réalisée d'une manière distribuée. Dans un premier temps, tous les nœuds peuvent être un cluster-Head et des nœuds 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 précédemment. Le coût

de cluster calculé est ensuite diffusé par le nœud cluster-Head en direction de ses voisins de deux sauts.

Après la réception du coût calculé, d'autres nœuds cluster-Heads comparent leurs propres coûts du cluster avec le coût du cluster reçu. Dans le cas où le nœud émetteur a un meilleur coût, ces nœuds de réception vont 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 coûts reçus des autres nœuds cluster-Heads, ce nœud diffuse un message d'invitation à ses voisins. De cette façon, tous les nœuds sont sélectionnés soit en tant que nœuds cluster-Head ou nœuds membres du cluster. Ensuite, chaque cluster-Head génère un ordonnancement TDMA (Times Division Multiple Access) et le transmet à ses membres du cluster.

Dans le protocole proposé, afin d'éviter le problème des hot-spots à proximité du nœud récepteur (sink), plusieurs cluster sont formés (les nœuds près d'une station de base, ont une forte probabilité de transmettre une grande quantité de paquets et meurent hâtivement). Dans ce protocole les clusters près de la station de base contiennent moins de membres par rapport aux clusters éloignés du nœud sink.

En outre, afin d'équilibrer la charge de trafic entre les cluster-Head et les nœuds membres du cluster, un regroupement périodique est effectué. Ainsi que le calcul du coût d'un cluster prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds, les rôles du cluster-Head et les nœuds membres du cluster sont modifiées au cours de la formation des nouveaux clusters. [38]

La Figure II.9 illustre l'idée de base de protocole MCCP.

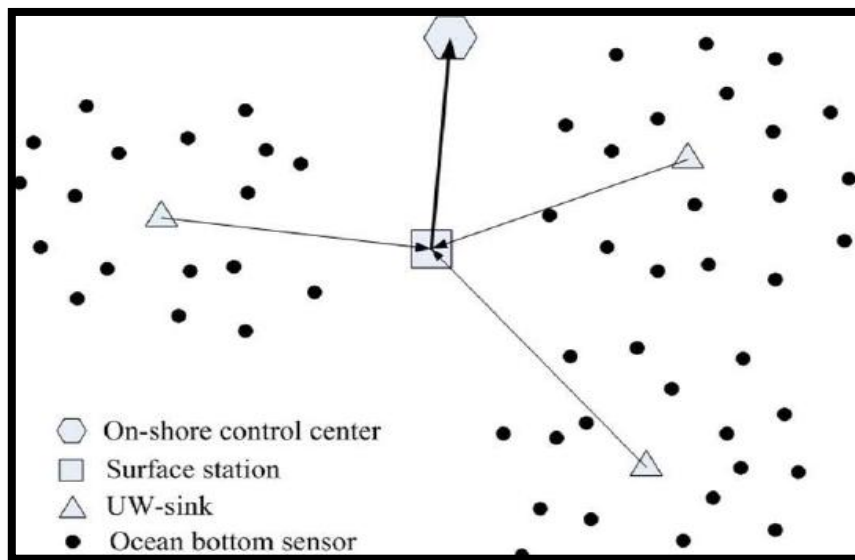


Figure II.9 Architecture de réseau utilisé dans les protocoles de routage MCCP. [23]

## II.5.6 Mécanismes spéciaux

Dans cette sous-section, une présentation est montrée sur les protocoles de routage qui utilisent des mécanismes ou des dispositifs physiques spéciaux pour fonctionner de manière efficace. Ces mécanismes physiques spécifiques peuvent inclure, par exemple, des modules mécaniques qui régulent la profondeur du capteur, des systèmes en réveil de faible puissance, ou des véhicules sous-marins autonomes (AUV) qui doivent récolter les données de nœuds capteurs réels. [32]

### II.5.6.1 le protocole de routage Délai d'une approche tolérante mobile « DDD »

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

---

Dans leur architecture, les nœuds capteurs fixes sont déployés au fond de la mer dans toute la zone d'intérêt. Ces nœuds collectent l'information de l'environnement et les données détectées sont stockés localement après le traitement. Ces capteurs se réveillent périodiquement pour la détection et la génération d'événements. Le modem acoustique est basé sur deux composants. Le premier composant est utilisé pour la communication acoustique avec le dauphin proche, et l'autre est l'émetteur-récepteur à faible puissance utilisée pour déterminer la présence de nœuds dauphins (par un signal spécial transmis depuis le dauphin) et pour déclencher le premier composant. Outre, un certain nombre de nœuds dauphins sont utilisés pour collecter les paquets de données quand ils se déplacent dans le porté à un saut de nœuds capteurs dispersés. Les dauphins peuvent se déplacer soit avec mobilité aléatoire ou contrôlée selon l'état du réseau. Un nœud dauphin diffuse des balises pour annoncer leur présence. Les balises sont transmises à de telles fréquences acoustiques, celles qui sont compatibles avec le modem de capteur de faible puissance. La période de publicité  $t$  est ajustée en fonction du déploiement et la portée de communication  $r$  des nœuds capteurs, et à la vitesse de dauphin  $v$ . Enfin, les dauphins transmettent les paquets de données collectés dès qu'ils atteignent une station de base à la surface.

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

## II.6 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 livraison, efficacité de Délai, efficacité énergétique, efficacité de la bande passante, Fiabilité, Saut par saut/ bout en bout, Performance.

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

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

## II.7 Conclusion

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

Le routage pour les capteurs sous-marins est une thématique importante, qui attire beaucoup d'attention des chercheurs. La conception de tout protocole de routage dépend des objectifs et des besoins de l'application, ainsi que la pertinence, qui dépendent de la disponibilité des ressources du réseau. Les descriptions détaillées des protocoles sélectionnés contribuent à comprendre le sens de la recherche actuelle sur la couche de routage dans les réseaux de capteurs sous-marins. Après avoir présenté les principaux protocoles de routage et les comparaisons disponibles entre eux ; on conclue que la comparaison est nécessaire afin de souligner que le protocole de routage est préférable selon l'utilisation souhaitable. il est impossible de dire que toute technique de routage particulier est le meilleur pour tous les scénarios que chacun d'eux a des forces précises et des faiblesses, et d'aptitude à situations spécifiques.

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

A decorative floral wreath border in a light gray color, featuring intricate scrollwork, leaves, and diamond-shaped accents at the top and bottom. The wreath frames the central text.

# *Chapitre III*

*Evaluation des  
performances  
du routage  
dans les  
(UWSNs)*



### III.1 Introduction

Afin de faciliter la recherche dans les réseaux de capteurs sous-marins « UWSNs », il est souhaitable d'avoir une plate-forme de simulation standard pour comparer et évaluer les protocoles, les algorithmes et les conceptions de différents réseaux.

Dans la littérature, il y a quelques efforts pour développer des simulateurs des réseaux de capteurs sous-marins. Cependant, au meilleur de notre connaissance, le simulateur de réseau de capteurs sous-marins le plus efficace est l'Aqua-Sim qui est basé sur NS2.

Dans ce chapitre, on va décrire les outils de simulation qu'on va utiliser dans notre projet qui sont l'Aqua-Sim et le NS2. Notre étude concerne l'évaluation des performances du protocole VBF et les comparer avec HH-VBF selon plusieurs métriques.

### III.2 Outil de simulation

La simulation est l'imitation de quelque chose de réel, utilisé pour tester et étudier la vie réelle ou de pratiquer des compétences ou des tâches lorsque la pratique dans le monde réel ne serait pas viable en raison de problèmes de coût ou de sécurité. Les simulateurs sont utilisés pour tester de nouveaux protocoles, étudier la performance des différents protocoles. [40]

Certains simulateurs sont plus performants que d'autres dans les résultats d'une simulation car ils permettent d'étudier le comportement d'un réseau ayant une topologie et des caractéristiques précises. [41]

Il y a beaucoup de simulateurs de réseaux disponibles aujourd'hui pour les réseaux de capteurs terrestres, mais pour les réseaux de capteurs sous-marins il existe un nombre de simulateur limité. Parmi ces simulateurs, on peut citer:

- ❖ **NS-MIRACLE** est un ensemble de bibliothèques conçues pour améliorer les fonctionnalités offertes par le simulateur de réseau NS2. Il fournit un moteur efficace et intégré pour la gestion des messages inter-couches et en même temps permet la coexistence de plusieurs modules au sein de chaque couche de la pile de protocoles. Par exemple, plusieurs IP, des couches de liaison, MACs ou des couches physiques peut être spécifié et utilisé dans le même nœud. Le simulateur NS-MIRACLE facilite la mise en œuvre et la simulation des systèmes de communication modernes dans NS2. En outre, en raison de sa modularité, le code sera portable, réutilisable et extensible. [42]

- ❖ **DESERT Underwater** est un ensemble complet de bibliothèques C / C ++ pour soutenir la conception et la mise en œuvre des protocoles d'un réseau sous-marins. Sa création découle de la volonté de pousser les études des simulations sur les réseaux sous-marins. La mise en œuvre des solutions de recherche sur les appareils réels est d'une importance capitale pour réaliser une architecture de communication et de mise en réseau qui permet aux nœuds hétérogènes de communiquer de manière fiable dans l'environnement sous-marins. [43]
- ❖ **Aqua-Sim** est un simulateur pour les réseaux de capteurs sous-marins. Il a été développé sous NS2. Il est destiné à être exécuté en parallèle avec le paquet sans fil CMU. Aqua-Sim est le meilleur simulateur qui est conçu pour les réseaux de capteurs aquatique. Il met en œuvre le canal acoustique, la manipulation et l'atténuation des collisions pour des conditions sous-marines. Les tests sur l'Aqua-Sim montrent qu'il peut simuler de façon fiable le monde réel. [40]

### III.3 Choix du simulateur NS2

NS2 est un simulateur gratuit disponible sur Internet, il est exécutable tant sous Unix que sous Windows. NS2 permet de simuler différents types de réseaux sans fil. Il permet de simuler la couche MAC 802.11 et plusieurs autres extensions. Contrairement aux autres simulateurs, NS2 implémente plusieurs protocoles de routage. Il tient compte de la consommation électrique, et contient plusieurs modèles d'énergie.

Pour notre application, nous avons choisi d'utiliser NS2 comme simulateur pour des raisons de disponibilité du simulateur. Aussi, nous avons choisi NS2 puisqu'il contient des bibliothèques pour la génération de différentes fonctions (topologie, trafic, routage, MAC, LLC,...) et des outils graphiques pour faciliter l'interprétation (Xgraph) et la visualisation des résultats (network animator NAM). [44]

### III.4 Simulateur NS2

NS « Network Simulator » est un outil de simulation de réseaux informatiques, très largement utilisé dans la recherche académique et dans l'industrie [45]. Il est aujourd'hui un standard de référence en ce domaine, plusieurs laboratoires de recherche recommandent son utilisation pour tester les nouveaux protocoles.

Le simulateur NS actuel est particulièrement bien adapté aux réseaux à commutation de paquets et à la réalisation de simulations de grande taille (le test du passage à l'échelle). Il contient les fonctionnalités nécessaires à l'étude des algorithmes de routage unicast ou multicast, des protocoles de transport, de session, de réservation, des services intégrés, des protocoles d'application comme FTP [46]. A titre d'exemple, le tableau III.1 présente les possibilités de simulation disponibles pour chaque couche :

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

**Tableau III.1 : principaux protocoles et modèles disponibles sous NS2. [45]**

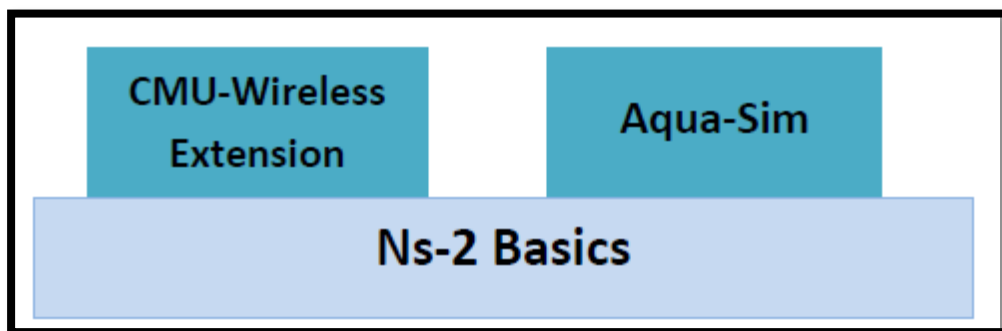
NS2 ne permet pas de visualiser le résultat des expérimentations. Il permet uniquement de stocker une trace de la simulation, de sorte qu'elle puisse être exploitée par un autre logiciel, comme NAM.

NAM est un outil de visualisation qui présente deux intérêts principaux : représenter la topologie d'un réseau décrit avec NS2, et afficher temporellement les résultats d'une trace d'exécution NS2. Par exemple, il est capable de représenter des paquets TCP ou UDP, la rupture d'un lien entre nœuds, ou encore de représenter les paquets rejetés d'une file d'attente pleine. Ce logiciel est souvent appelé directement depuis les scripts TCL pour NS2, pour visualiser directement le résultat de la simulation.

Le logiciel NS2 et l'outil de visualisation NAM sont particulièrement adaptés à l'étude de réseaux complexes (filaires, sans fils) mettant en œuvre de nombreux types de files d'attente, protocoles de routage, de couches transport (UDP, TCP), et couches application. [46]

### III.5 Aqua-Sim

Aqua-Sim est un simulateur développé pour les réseaux de capteurs sous-marins, basé sur le simulateur de réseau NS2. Aqua-Sim est en parallèle avec le logiciel de simulation sans fil de CMU. Comme illustré dans la figure III-1, Aqua-Sim est indépendant du paquet de simulation sans fil et n'est pas affecté par toute modification de paquet sans fil. En revanche, toute modification apportée à l'Aqua-Sim est également limitée à elle-même et n'a aucune incidence sur d'autres paquets en NS2. De cette façon, Aqua-Sim peut évoluer indépendamment.



**Figure III.1 : Relation entre Aqua-Sim et NS2**

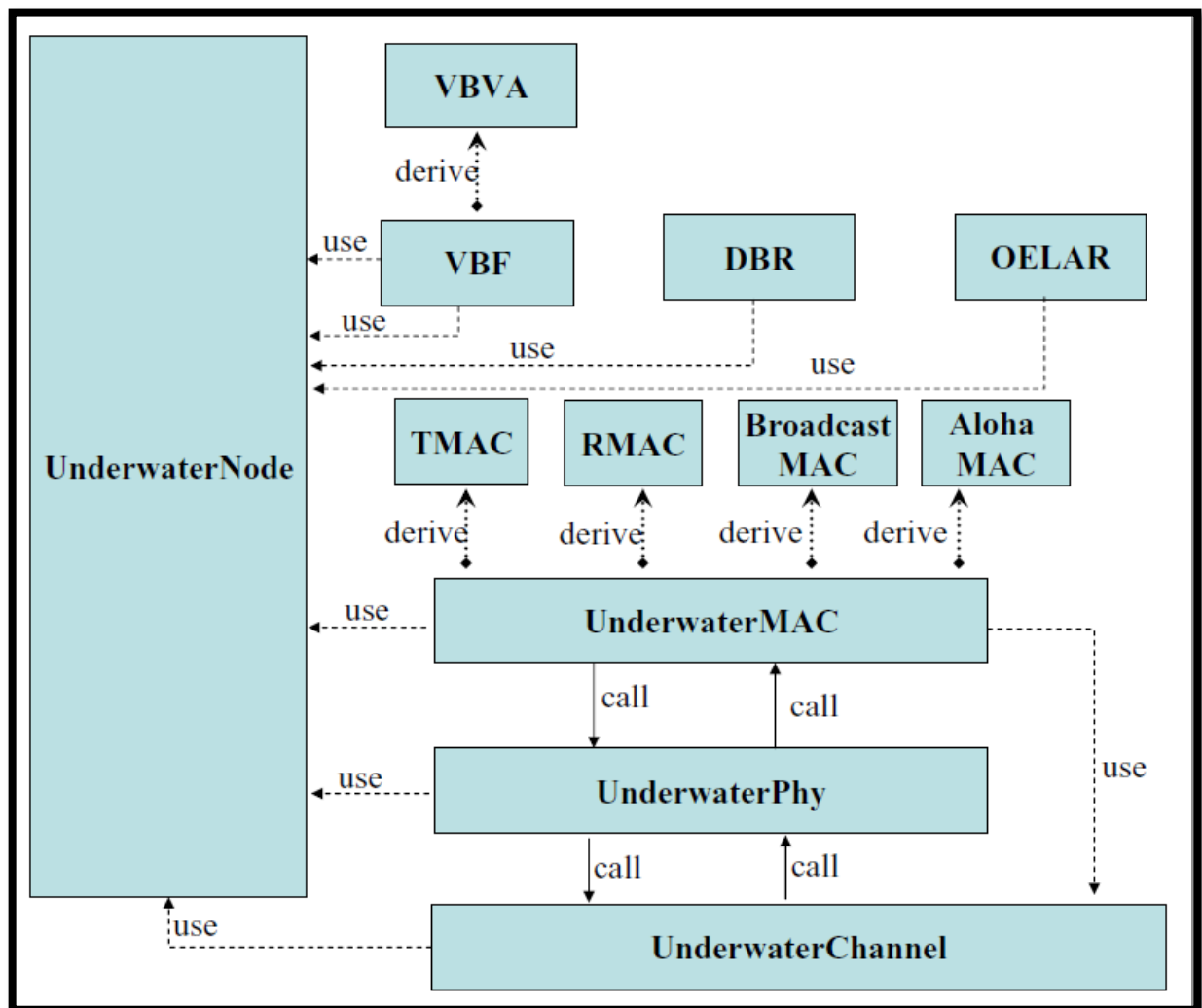
Aqua-Sim suit le style de conception orientée objet de NS2, et toutes les entités du réseau sont implémentées sous forme de classes en C++. Actuellement, Aqua-Sim est organisé en quatre dossiers, uw-common, uw-mac, uw-routage et uw-tcl. Les codes de simulation des nœuds capteurs sous-marins et de la circulation sont regroupés dans le dossier uw-common ; les codes simulant des canaux acoustiques et protocoles MAC sont placés dans le dossier d'uw-mac. Le dossier uw-routage contient tous les protocoles de routage. Le dossier uw-tcl comprend tous les exemples de scripts OTcl pour valider les Aqua-Sim [47]. En général, Aqua-Sim a trois types de classes :

- Réseau des Classes d'entité : ce type de classes représente des entités réseau concrètes. Par exemple, la couche physique d'un nœud est représentée par un objet « Underwater Phy » et son protocole MAC diffusion est représentée par un objet « Broadcast - MAC ». Ces objets sont requis pour remplir leurs propres fonctionnalités et fournir des interfaces standard pour les entités du réseau couche supérieure/inférieure.

- Les Classes d'interface pures : ce type de classes est purement virtuel et ne peut pas être instancié à tous. Cependant, elles spécifient les interfaces courantes et servent les classes de base pour d'autres. Par exemple, la classe « Underwater MAC » en Aqua-Sim fournit une interface commune pour les entités de couche MAC comme « Broadcast MAC » et « RMAC ». Bien que la mise en œuvre de « Broadcast MAC » est tout à fait différente de

celle des « RMAC », elles partagent la même interface à la couche physique et la couche de liaison logique, qui est spécifiée par leur classe de base « Underwater MAC ».

- Classes de fonctions courantes : ce type de classes fournit quelques fonctions communes aux autres classes et peuvent être incluses dans toutes les classes dans Aqua-Sim. Bien que ces classes n'aient aucune instantiation dans le nœud de réseau correspondant, elles sont assez importantes pour Aqua-Sim. Par exemple, « UW-hash-table » implémente une table de hachage très efficace qui peut être utilisée par le routage et les protocoles MAC. [48]



**Figure III.2 : Architecture du simulateur Aqua-Sim**

La figure III.2 trace le diagramme de classes d'Aqua-Sim. Dans cette figure, l'objet de « Underwater Node » est l'abstraction du nœud capteur sous l'eau. Il encapsule beaucoup d'informations utiles du nœud tels que sa position et sa vitesse de déplacement. C'est un objet global et peut être consulté par n'importe quel objet en Aqua-Sim. L'objet « Underwater Channel » représente le canal acoustique sous-marin. Il y a un seul objet « Underwater

---

Channel » dans le réseau et tous les paquets sont ici mis en fil d'attente avant d'être livrés. L'objet « Underwater Channel » fournit également l'interface publique vers les couches supérieures et donc l'objet dans la couche supérieure, tel qu'un objet de couche routage, peut facilement connaître les propriétés de canal. [47]

### III.6 Objectifs de la simulation

L'objectif ultime dans ce mémoire est d'étudier quelques propriétés des protocoles de routage conçu pour les réseaux de capteurs sous-marins. Notre travail est composé de deux parties :

- La première partie : est une analyse de performance de protocole de routage d'un réseau de capteurs aquatiques « VBF », la simulation est faite en fonction de la densité du réseau (changement du nombre de nœud dans le réseau) et en fonction du rayon, les métriques utilisées pour évaluer cette simulation sont :
  - l'énergie consommée.
  - le délai de transfert de paquet de donnée.
- La deuxième partie : est une comparaison entre les performances des protocoles de routage « VBF » et « HH-VBF ». Nous avons utilisé les mêmes métriques précédentes et la simulation est faite en fonction de densité du nœud avec les mêmes paramètres de simulation.

### III.7 Métriques d'évaluation

Dans notre étude, nous focalisons surtout à la consommation d'énergie des capteurs qui prend un rôle primordial dans la durée de vie du réseau qui est devenue une métrique de performance indispensable dans cet axe ainsi que le délai de transfert pour que les paquets peuvent atteindre leurs destination, dans le but de savoir la rapidité d'envoi des paquets de données et leur réactivité dans un protocole de routage.

✓ **La métrique de l'énergie consommée :**

C'est l'énergie consommée dans tout le réseau, en d'autre terme c'est la différence entre l'énergie initiale (à l'émission) et l'énergie résiduelle (à la réception) dans tous les nœuds.

✓ **La métrique du délai :**

C'est le délai de transfert de bout-en-bout pour que chaque paquet atteigne sa destination (le sink).

### III.8 Méthodologie expérimentale

Les simulations de notre projet sont faites par l'environnement présenté dans le tableau III.2 :

<b>Simulation</b>	
Machine	Acer I5
Système d'exploitation	Ubuntu LTS 14.04
simulateur	Aqua-sim

**Tableau III.2: environnement de la simulation**

#### III.8.1 Création du modèle de simulation

Dans notre expérimentation, nous voulons savoir l'influence de la densité du nombre des nœuds et l'influence du rayon de la pipe sur la consommation d'énergie et le délai de transfert des paquets de données dans le protocole « VBF ». Pour cela, nous changeons le nombre des nœuds puis le rayon de la pipe avec fixation des autres paramètres, nous faisons aussi une comparaison entre les performances du « VBF » et « HH-VBF » ; le tableau III.3 montre les paramètres utilisés dans cette expérimentation :

<b>Paramètres du contexte de la simulation</b>	
Nombre des nœuds	2, 3, 4, 100, 200, 400, 600, 800, 1000.
Temps de simulation	200s.
Energie Initiale	10000 joules.
Topologie du réseau	200x200x200m
Les coordonnées de la source	100x300x0m
Les coordonnées du sink	170x170x200m
La portée de transmission	90 m
Rayon de la pipe	50, 90, 100, 150, 200, 250, 300 m

**Tableau III.3: Paramètres du contexte de simulation**

### III.8.2 L'influence de la densité des nœuds

Nous avons examiné l'influence de densité du nombre des nœuds sur le délai et l'énergie.

Les résultats du tableau III.4 et III.5 sont obtenue par une moyenne de cinq essais par chaque nombre de nœuds.

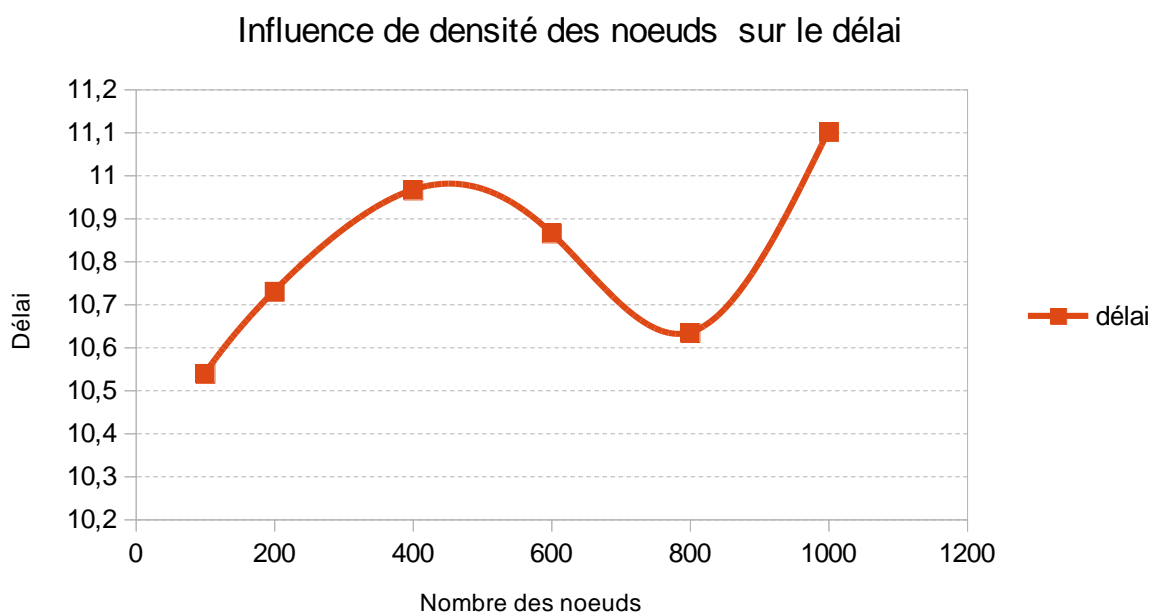
#### III.8.2.1 Etude du délai de transmission

Le tableau suivant représente le délai de transfert (ms) en fonction du nombre des nœuds :

Nœuds	100	200	400	600	800	1000
Délai	10.5394398	10.7302572	10.9660378	10.8659106	10.6341558	11.1018278

**Tableau III.4: les résultats de l'influence de densité des nœuds sur le délai (ms).**

D'après les résultats du tableau III.4, nous avons tracé la courbe suivante (Figure III.3) qui représente le délai de transfert des paquets en fonction de la taille du réseau.



**Figure III.3: Le délai de transmission vs le nombre des nœuds.**

#### ➔ Interprétation :

Nous observons dans la figure III.3, qui représente le délai de transfert des paquets en fonction de la densité des nœuds que le délai de transmission est variable en changeant le nombre des nœuds dans le réseau et cela du aux nœuds qui sont tout le temps en mouvement.



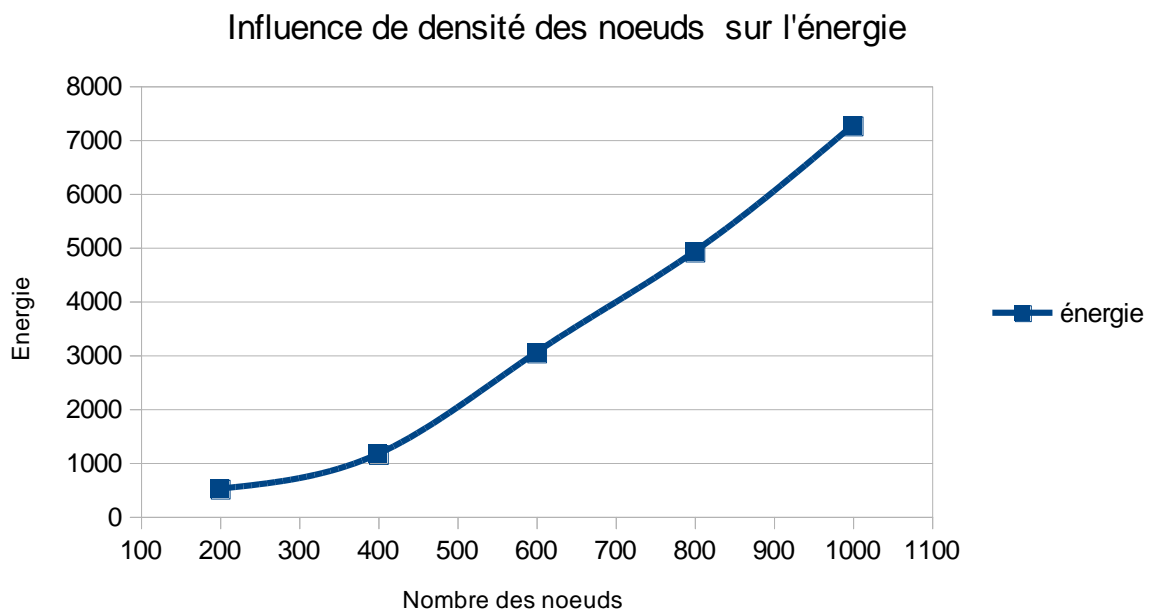
### III.8.2.2 Etude de l'énergie consommée

Le tableau ci-dessous représente l'énergie consommée (joule) en fonction du nombre des nœuds :

Nœuds	100	200	400	600	800	1000
Energie	514.5276566	1158.8036072	3045.0623716	4919.7154282	7263.3694096	9969.9107964

**Tableau III.5: les résultats de l'influence de densité des nœuds sur l'énergie (joule).**

Selon les résultats du tableau III.5, nous avons tracé aussi la courbe suivante (Figure III.4) qui représente l'énergie consommée en fonction de la taille du réseau.



**Figure III.4 : la courbe de l'énergie consommée vs le nombre de nœuds.**

#### ➤ Interprétation :

La figure III.4 illustre l'effet de la densité des nœuds sur la consommation totale de l'énergie dans le réseau. On remarque que l'énergie consommée croît proportionnellement avec le nombre de nœuds, cela est dû aux nouveaux nœuds qui sont impliqués par la transmission des données et qui consomment plus d'énergie.

### III.8.3 Etude de l'influence du rayon de la pipe

Dans notre simulation, nous avons testé aussi l'influence du rayon de la pipe sur le délai de transmission et l'énergie consommée.

Les résultats des tableaux III.6 et III.7 sont obtenus par une moyenne de cinq essais par chaque largeur du rayon.

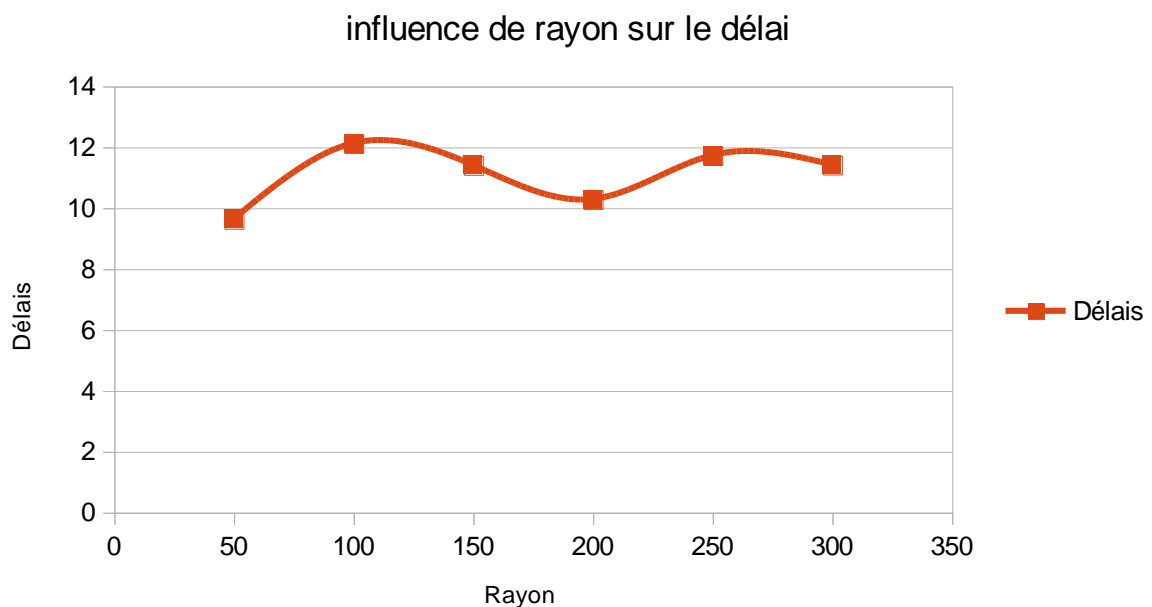
#### III.8.3.1 Etude du délai de transmission

Les résultats de l'influence du rayon sur le délai sont affichés dans le tableau ci-dessous :

Rayon	50	100	150	200	250	300
Délais	9.6365346	12.1268106	11.410091	10.2903702	11.7324282	11.4195288

**Tableau III.6 : les résultats de l'influence du rayon (m) sur le délai (ms).**

Les résultats du tableau ci-dessus nous ont permis de tracer la courbe suivante (Figure III.5) qui représente le délai de transfert des paquets en fonction du rayon de la pipe.



**Figure III.5: Le délai de transmission vs le rayon.**

#### ➤ Interprétation :

La Figure III.5 illustre l'impact du rayon de la pipe sur le délai de transfert des données, on remarque que cette courbe n'est pas stable, en raison de la mobilité des

nœuds. Ces derniers changent leur emplacement tout le temps, pour cela l'émetteur quand il envoie des paquets vers le sink tient en compte la position des nœuds intermédiaire qui sont impliqués dans cette transmission (s'ils sont près ou loin du vecteur virtuel de la pipe) et pour cette raison, le délai de transmission est variable.

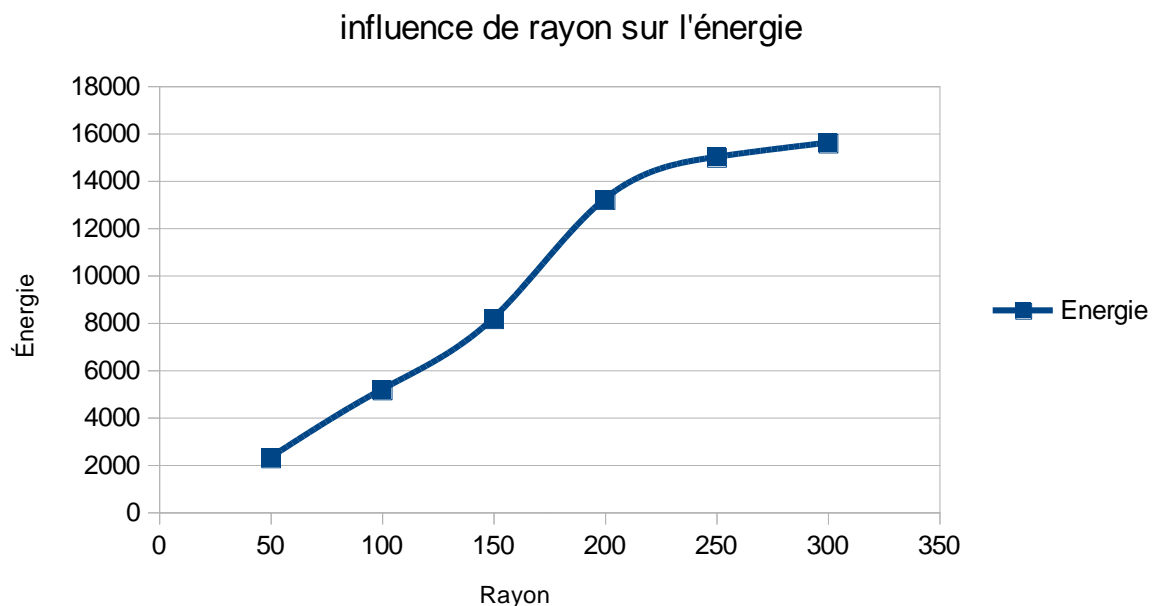
### III.8.3.2 Etude de l'énergie consommée

Le tableau III.7 montre l'impact du rayon sur l'énergie consommée :

Rayon	50	100	150	200	250	300
Energie	2297	5168.154894	8177.7080382	13212.87075	14991.27328	15592.127416

**Tableau III.7 : les résultats de l'influence du rayon(m) sur l'énergie (joule).**

La courbe suivante (Figure III.6) représente l'énergie consommée dans le réseau en fonction du rayon de la pipe.



**Figure III.6: L'énergie consommée vs le rayon.**

#### ➤ Interprétation :

La figure III.6 illustre l'impact du rayon de la pipe sur l'énergie consommée dans tout le réseau. On observe qu'elle augmente avec la croissance du rayon et cela revient à l'agrandissement du nombre des nœuds impliqués par la transmission en augmentant la surface du réseau (i.e élargissement du rayon de la pipe).

### III.8.4 Comparaison entre les performances du « VBF » et « HH-VBF »

Dans cette partie, nous avons fait une comparaison du délai et de l'énergie consommée dans le réseau en fonction de la densité du nombre des nœuds entre les protocoles « VBF » et « HH-VBF ». Pour cette simulation, nous avons adopté les mêmes paramètres pour les deux protocoles.

#### III.8.4.1 Etude du délai de transmission

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau III.8 et ils sont obtenus par une moyenne de cinq essais pour chaque nombre de nœuds. Ces résultats nous ont permis de tracer la courbe de la figure III.7.

Comparaison du délai			
Nœuds	2	3	4
VBF	4.044672044	4.6510266	4.703788
HH-VBF	46.8902638	70.6860558	111.5163586

Tableau III.8 : le délai de VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds

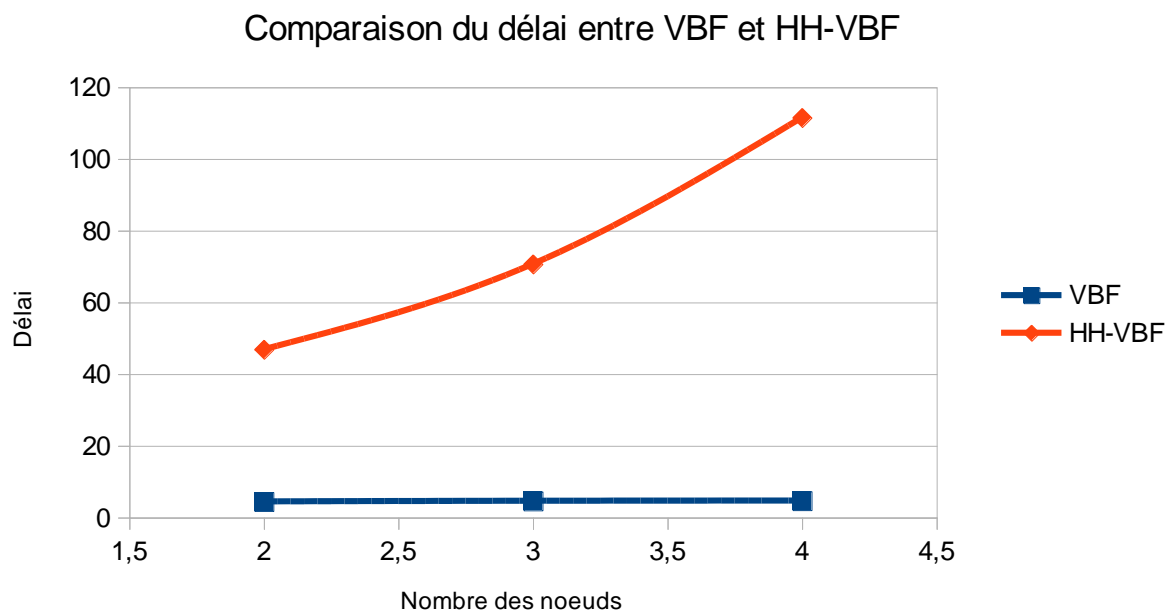


Figure III.7 : Le délai vs le nombre des nœuds en VBF et HH-VBF.

➔ **Interprétation :**

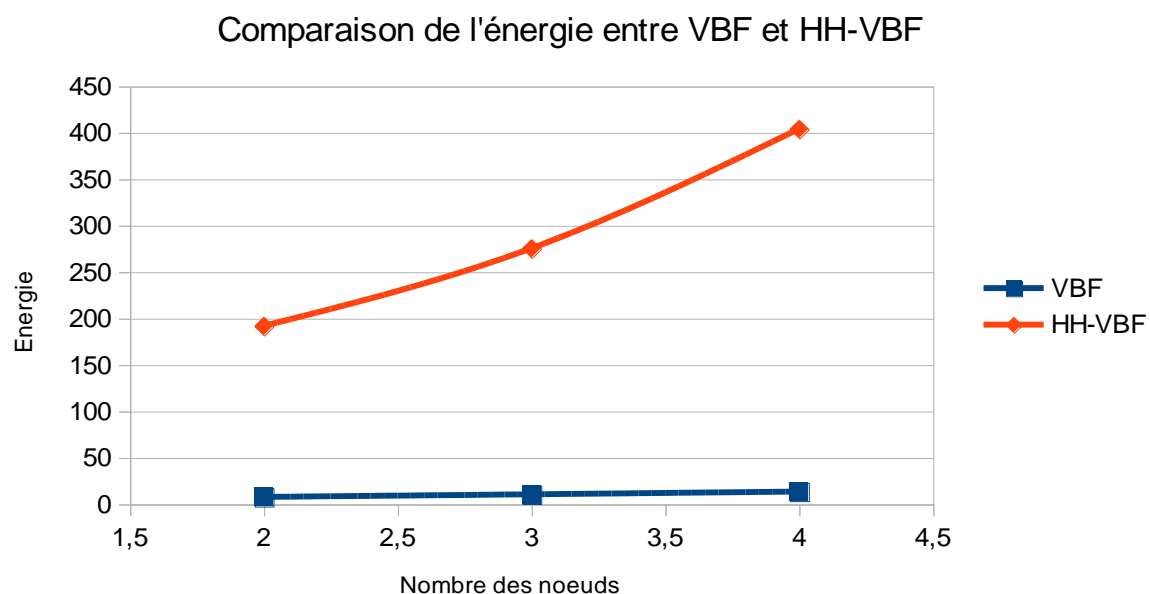
La figure III.7 représente une comparaison du délai de transfert des protocoles VBF et HH-VBF en fonction du nombre des nœuds dans le réseau. Nous remarquons que le délai de bout en bout réalisé dans VBF est nettement meilleur et court que celui réalisé dans HH-VBF. Cela est dû à l'utilisation d'une pipe unique dans VBF par contre le protocole HH-VBF utilise plusieurs pipe virtuelles avec un routage saut par saut.

### III.8.4.2 Etude de l'énergie consommée

Le tableau III.9 présente l'énergie consommée dans le réseau par les nœuds dans les protocoles VBF et HH-VBF, dans le but de tracer une courbe (figure III.8) comparative entre les deux protocoles.

Comparaison de l'énergie			
Nœuds	2	3	4
VBF	7.6064	10.4096	13.38152
HH-VBF	191.729839	275.3038622	403.8956878

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



**Figure III.8 : l'énergie consommée vs le nombre de nœuds en VBF et HH-VBF.**

**➔ Interprétation :**

La figure III.8 nous montre que la consommation énergétique de HH-VBF est supérieure à celle de VBF. L'écart devient plus significatif quand le réseau devient plus dense. Ce qui est raisonnable car plus la densité des nœuds est élevée, plus HH-VBF peut trouver plus de chemins.

**III.9 Conclusion**

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

Dans la partie expérimentale, nous avons testé l'impact de densité des nœuds capteurs et le rayon de la pipe sur le délai de transmission et l'énergie consommée en VBF. Nous avons aussi fait une comparaison entre VBF et HH-VBF pour savoir l'influence de la densité des nœuds sur le délai et l'énergie.

Les résultats de notre simulation montrent que :

- le délai varie tout le temps soit par l'influence de la densité des nœuds ou la largeur du rayon en raison de la mobilité permanente des nœuds.
- pour l'énergie, on remarque qu'il y a une proportion directe entre l'énergie et la densité des nœuds et même avec le rayon de la pipe.
- dans la comparaison, on observe que le délai est court pour VBF et la consommation énergétique supérieure en HH-VBF, l'écart devient plus significatif quand le réseau devient plus grand.



*Conclusion  
Générale*

### *Conclusion générale*

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins font partie des nouveaux thèmes de recherche depuis ces dernières années en raison de leur large éventail d'applications dans les milieux aquatiques. Le routage dans ce réseau est une thématique complexe, étant donné les propriétés particulières de ce type de réseaux et représente un problème majeur pour les capteurs sous-marins, en raison de l'absence d'infrastructure. L'objectif principal d'un protocole de routage est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds afin que l'information puisse être acheminée.

Dans ce travail, nous avons présenté d'abord un état de l'art sur les réseaux de capteurs sous-marins à savoir son principe de fonctionnement, ses caractéristiques uniques et ses applications dans différents domaines. Après avoir répertorié les principales techniques de transmission en milieu marin tout en indiquant leurs limites, nous avons montré qu'il est possible de transmettre et de localiser en milieu aquatique en utilisant les ondes acoustiques.

Nous avons, par la suite mené une étude et une analyse de plusieurs protocoles de routage, ces protocoles ont été classifiés en six classes.

Afin d'évaluer les performances de protocole de routage VBF et les comparer avec les performances du protocole HH-VBF. Les simulations sont faites sous Aqua-Sim, c'est un simulateur basé sur NS2 et développé pour les réseaux de capteurs sous marin.

En suite, nous avons étudié l'influence de densité des nœuds et le rayon de la pipe sur le protocole VBF, et nous remarquons son impact sur le délai de transmission et l'énergie consommée.

Nos résultats de simulations montrent que le délai de transmission n'est pas stable en fonction de la densité du réseau et le rayon de la pipe à cause de la mobilité permanente des nœuds et que l'énergie consommée augmente avec l'agrandissement de la taille du réseau et aussi avec l'expansion du rayon de la pipe.

Puis, nous avons fait une comparaison entre les performances de VBF et HH-VBF, en utilisant les mêmes deux métriques précédentes, en fonction de l'influence de densité des nœuds.

Dans cette simulation les résultats illustrent que le délai de transfert des données est court pour VBF par rapport à HH-VBF et la consommation énergétique en HH-VBF est importante



à celle de VBF, nous remarquons aussi que l'écart entre VBF et HH-VBF devient plus significatif quand le réseau devient plus dense.

Ces simulations ont également montré le bon comportement du protocole VBF dans les réseaux de capteurs sous-marins.

Mais, on conclue que le protocole de routage est préférable selon l'utilisation souhaitable et il est impossible de dire que toute technique de routage particulier est le meilleur pour tous les scénarios, que chacun d'eux a des forces précises et des faiblesses, et d'aptitude à situations spécifiques.

## *Perspectives*

Ce travail ouvre de nombreuses et nouvelles perspectives dans le domaine des communications dans les milieux aquatiques :

- Etudier l'influence de la vitesse sur la performance de différent protocole.
- Etudier l'influence de changement de position de source et de sink.
- Prendre en compte d'autres métriques comme l'étude de transfert fiable des données, le taux de perte...
- Chercher d'autres techniques de routage pour minimiser la consommation d'énergie et maximiser la durée de vie des nœuds.



# Références bibliographiques

- [1] Mr. SELATNA Abbes, «Implémentation D'une Application Orientée Surveillance Pour Les Réseaux De Capteurs », Mémoire De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme De Master En Informatique, 2011-2012.
- [2] Mohammed El Mehdi DIOURI, «Réseaux De Capteurs Sans Fil: Routage Et Sécurité », Rapport De Projet De Fin d'Etudes En Vue D'obtention Du Diplôme D'ingénieur En Informatique De L'insa De Lyon, 2009-2010.
- [3] YACINE CHALLAL, «Réseaux De Capteurs Sans Fils», 17/11/2008
- [4] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, And V.Z. Groza, «Sensor-Based Information Appliances », IEEE Instrumentation Measurement Magazine. December 2000.
- [5] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal; «Wireless Sensor Network Survey»; Department Of Computer Science, University Of California, Davis, CA 95616, United States Available Online 14 April 2008.
- [6] HADJILA Mourad ; « Protocoles De Routage Economes En Energie Pour Les Réseaux De Capteurs Sans Fil » ; Thèse Doctorat ; Université De Tlemcen ; 2014.
- [7] Jaydip M. Kavar, Dr.K.H Wandra, «Survey Paper on Underwater Wireless Sensor Network », International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, (An ISO 3297: 2007 Certified Organization), Vol. 3, Issue 2, February 2014
- [8] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia, «Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges »; Broadband And Wireless Networking Laboratory, School Of Electrical And Computer Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, GA 30332, USA, 21 January 2005.
- [9] Lanbo Liu, Shengli Zhou, Jun-Hong Cui, «Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks» .
- [10] T. Shelley, «Radio Waves Transmit Information Underwater», an Article in Eureka Magazine, Nov. 14, 2005.
- [11] C. Balanis, « Advanced Engineering Electromagnetic », John Wiley & Sons, New York, NY, 1989.
- [12] A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw,S. Saman, « Propagation Of Electromagnetic Waves At Mhz Frequencies Through Seawater » ,IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 52, No. 11, Pp. 2843–2849, Nov. 2004.

- [13] J. Lucas, A. Al-Shamma'a, J. Seim, W. Loehr, G. Puchbauer, D. Mcgregor, « Underwater Communications Using Electromagnetic Waves (EMCOMMS) »; In Proc. Of European Conference On Marine Science And Ocean Technology, Galway, Ireland, May 10–13, 2004.
- [14] Davide Anguita, Davide Brizzolara, Giancarlo Parodi; « Prospects and Problems of Optical Diffuse Wireless Communication For Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) »; University Of Genoa Italy
- [15] N. Farr, A. Chave, L. Freitag, J. Preisig, S. White, D. Yoerger, «Optical Modem Technology For Seafloor Observatories» In Proc Of Oceans, 2005.
- [16] M. Kerker, « The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation», 3rd Ed. Academic Press, New York, NY, 1973.
- [17] M. A. Ainslie and J. G.Mccolm; « A Simplified Formula for Viscous and Chemical Absorption in Sea Water »; Journal Of The Acoustical Society Of America, Vol. 103, No. 3, Pp. 1671–1672, 1998.
- [18] D. B. Kilfoyle And A. B. Baggeroer, «The State Of The Art In Underwater Acoustic Telemetry»; IEEE Journal Of Oceanic Engineering, Vol. 25, No. 1, Pp. 4–27, Jan. 2000.
- [19] R. Urick, « Principles Of Underwater Sound»; 3rd Ed. New York: Mcgraw-Hill, 1983.
- [20] J. Preisig, «Acoustic Propagation Considerations for Underwater Acoustic Communications Network Development»; In Proceedings of First ACM International Workshop on Underwater Networks (Wuwnet), Los Angeles, CA, Sep. 2006.
- [21] National Research Council (NRC), Ocean Noise and Marine Mammals. National Academies Press, 2003.
- [22] G. M. Wenz, «Low-Frequency Deep Water Ambient Noise along the Pacific Coast of the United States», U.S. Navy J. Underwater Acoustics, Vol. 19, Pp. 423–444, 1969.
- [23] Benabdallah Souad, Hammad kelthoum, «Routage Dans Les Réseaux De Capteur Sous Marin», Projet de Fin d'Etudes, Master : Télécommunications, 2012-2013.
- [24] 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.
- [25] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia; «Challenges For Efficient Communication In Underwater Acoustic Sensor Networks»; Broadband & Wireless Networking Laboratory School Of Electrical & Computer Engineering Georgia Institute Of Technology, Atlanta.
- [26] Thumpi.R, Manjula R.B, Sunilkumar S.Manvi; « A Survey on Routing Protocols For Underwater Acoustic Sensor Networks »; International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-2, Issue-2, May 2013.

- [27] Emad Felemban, Faisal Karim Shaikh, Umair Mujtaba Qureshi, Adil A. Sheikh, Saad Bin Qaisar, Article « Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey» 10 August 2015; International Journal Of Distributed Sensor Networks.
- [28] J.-H. Cui, J. Kong, M. Gerla, And S. Zhou, «The Challenges Of Building Mobile Underwater Wireless Networks For Aquatic Applications», IEEE Network, Vol. 20, No. 3, Pp. 12–18, 2006.
- [29] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili, Tommaso Melodia; «State Of The Art In Protocol Research For Underwater Acoustic Sensor Networks»; Broadband & Wireless Networking Laboratory School Of Electrical And Computer Engineering Georgia Institute Of Technology Atlanta, GA 30332, USA
- [30] Kamel Beydoun ; « Conception D'un Protocole De Routage Hiérarchique Pour Les Réseaux De Capteurs »; Thèse ; Présentée A L'u.F.R Des Sciences Et Techniques De L'université De Franche-Comté ; 2009.
- [31] Yonca Bayrakdar, Nirvana Meratnia, Aylin Kantarci ; Article « A Comparative View Of Routing Protocols For Underwater Wireless Sensor Networks »; IEEE 2011.
- [32] Salvador Climent, Antonio Sanchez, Juan Vicente Capella, Nirvana Meratnia And Juan Jose Serrano; Article « Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks: Advances And Future Trends In Physical, MAC And Routing Layers»; Sensors 2014.
- [33] Hai Yan, Zhijie Jerry Shi, Jun-Hong Cui; « DBR: Depth-Based Routing For Underwater Sensor Networks »; University Of Connecticut, Storrs, CT 06269-2155.
- [34] Peng Xie, Ph.D; «Underwater Acoustic Sensor Networks: Medium Access Control, Routing and Reliable Transfer»; University Of Connecticut, 2007
- [35] Zheng Guo, Gioele Colombiy, Bing Wang, Jun-Hong Cui, Dario Maggioriniy, Gian Paolo Rossiy ; « Adaptive Routing In Underwater Delay/Disruption Tolerant Sensor Networks» ; University Of Connecticut, Storrs, CT, 06269, USA, University Of Milano, 20135 Milano, Italy.
- [36] Giantsis Christos; «Comparison of Routing Protocols for Underwater Sensor Networks »; University Of Macedonia Master in Information Systems.
- [37] Muhammad Ayaz , Imran Baig, Azween Abdullah, Ibrahim Faye ; « A Survey On Routing Techniques In Underwater Wireless Sensor Networks»; University Technology Petronas, Malaysia; 2011.
- [38] Abdul Wahid, Kim Dongkyun ; « Analyzing Routing Protocols For Underwater Wireless Sensor Networks » ; Kyungpook National University, Korea, 2010.
- [39] SOUIKI Sihem ; «Protocoles De Routage Performants Dédies Aux Réseaux De Capteurs Sans Fil Sous L'eau»; Thèse Doctorat ; Présentée A L'université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Télécommunications; 2015.

- [40] Tamara King; « A Simulator For Marine Wireless Sensor Networks»; Master Of Science In Computer Science ; Faculty Of The Department Of Computing Sciences Texas A&M University - Corpus Christi Corpus Christi, Texas; 2011.
- [41] M. Jamont ; «Étude Des Simulateurs De Routage Pour Réseaux Sans Fil » ; IUT De Valence ; Juin 2008.
- [42] Mano ; «Nsmiracle 1.2.2 Installation Steps» ; 9/10/2010.
- [43] «Network Simulator (NS2) »; [Http://Telecom.Dei.Unipd.It/Pages/Read/58/](http://Telecom.Dei.Unipd.It/Pages/Read/58/).
- [44] Nejeh NASRI ; «Étude Simulation Et Caractérisation Electronique Et Protocolaire De Modules RFID Dédiés A Une Communication En Milieu Aquatique »; Thèse Doctorat De L'université De Toulouse II Ecole Doctorale 'Génie Electrique, Electronique Et Télécommunication; 2010.
- [45] Amel Guetarni, Raja Yahyaoui, Imad ALLAMA; «VANET : Clustering Dans Les Réseaux De Véhicules» ; Université D'avignon; 2010.
- [46] Youssef Baddi ; «Introduction Au Simulateur Réseau NS2 » ; Publié Le 21 Mars 2011.
- [47] PDF; «User Tutorial for Aqua-Sim».
- [48] Peng Xie; «Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks »; Underwater Sensor Networks Lab; University Of Connecticut, Storrs; 2009.



# Annexe A

Installation de AquaSim

AquaSim: Version 1.0

**Voila les étapes d'installation :**

```
zerouali@localhost $] sudo apt-get update
```

**1. Après le téléchargement créé un dossier Aqua-Sim**

```
zerouali@localhost $] mkdir aquasim
```

```
zerouali@localhost $] cd aquasim/
```

**2. copier Aquasim-1.0.tgz dans le dossier aquasim et extraire pour l'utiliser**

```
zerouali@localhost $] tar zxvf Aquasim-1.0.tgz
```

```
zerouali@localhost $] ./install
```

**3. ajoutez ses étape si l'installation ne réussite pas**

-Ouvrir le repertoire (~aquasim/ns-2.30/linkstate/ls.h) , utilisé gedit

-Dans la ligne numéro 137, on fait les changements suivants :

```
void eraseAll() { erase(baseMap::begin(), baseMap::end()); }
```

par:

```
void eraseAll() { this->erase(baseMap::begin(), baseMap::end()); }
```

-On refaire l'installation : ./install . Après le succès de l'installation, ces chemins doivent les changer. il est nécessaire de passé ces chemins dans /home/zerouali/.profile or .bashrc (/home/zerouali/ c'est mon bureau)

Export

```
PATH=$PATH:/home/zerouali/aquasim/bin:/home/zerouali/aquasim/tcl8.4.13/unix:/home/zerouali/aquasim/tk8.4.13/unix
```

```
export LD_LIBRARY_PATH=/home/zerouali/aquasim/otcl1.12:/home/zerouali/aquasim/lib
```

```
export TCL_LIBRARY=/home/zerouali/aquasim/tcl8.4.13/library
```

-Si cet indice % est présenté dans le terminale, donc l'installation est réussite.

**4. Maintenant essayé d'exécuter cette expression :**



```
zerouali@localhost $] /home/zerouali/aquasim/ns-2.30/underwatersensor/ uw_tcl/ ns  
vbf_example_5.tcl
```

**5. Si ne sa marche pas ajouter les commandes suivantes:**

```
$ cd ns-2.30/ && sudo make install
```

```
$ cp ns ns-aqua
```

```
$ sudo cp ns-aqua /usr/local/bin/
```

```
$ cd underwaterSensor/uw_tcl/
```

```
$ ns-aqua vbf_example_5.tcl
```

```
zerouali@localhost $] /home/zerouali/aquasim/ns-2.30/underwatersensor/ uw_tcl/ ns-aqua  
vbf_example_5.tcl
```

# Annexe B

## Exemple de script TCL (influence de densité des nœuds dans VBF)

```
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)  50 ;#50 bytes
set opt(routing_control_packet_size) 20 ;#bytes
set opt(ifqlen)       50  ;# max queue length in if
set opt(nn)           50  ;# 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_example_6.tr" ;# trace file
set opt(datafile)     "vbf_example_6.data"
set opt(nam)          "vbf_example_6.nam" ;# nam file
set opt(adhocRouting) Vectorbasedforward
set opt(width)        90
set opt(interval)     2.0
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_ 1.0e4 ;#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]
set topo [new Topography]
$topo load_cubicgrid $opt(x) $opt(y) $opt(z)
$ns_ use-newtrace
set tracefd [open $opt(tr) w]
$ns_ trace-all $tracefd
set nf [open $opt(nam) w]
$ns_ namtrace-all-wireless $nf $opt(x) $opt(y)
set data [open $opt(datafile) a]
set total_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)]
global defaultRNG
$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_ 170
$node_(0) set Y_ 170
$node_(0) set Z_ 200
$node_(0) set passive 1
set rt [$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 30

```

```

$a_(0) cmd set-target-y 30
$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)
set yrand_ [new RandomVariable/Uniform]
$yrand_ set min_ 0
$yrand_ set max_ $opt(y)
set zrand_ [new RandomVariable/Uniform]
$zrand_ set min_ 0
$zrand_ set max_ $opt(z)
for {set i 2} { $i < $opt(nn) } { incr i } {
    set node_($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
    set rt [$node_($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 250
    $a_($i) cmd set-target-y 200
    $a_($i) cmd set-target-z 10
    $a_($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)
$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_ 100
$node_(1) set Y_ 300
$node_(1) set Z_ $opt(z)
$node_(1) set-cx 100
$node_(1) set-cy 300
$node_(1) set-cz $opt(z)
set rt [$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 250
$a_(1) cmd set-target-y 200
$a_(1) cmd set-target-z 10
$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
set node_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)+2]
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

```

## Résumé

Durant la dernière décennie, un nouveau type de réseau sans fil a suscité un grand intérêt auprès de la communauté scientifique, il s'agit des réseaux de capteurs sans fil sous marin(UWSN). Les réseaux de capteurs sous marin sont un type particulier de réseaux de capteurs sans fil dédiés aux applications spécifiques au milieu marin. Ils constituent un nouveau domaine de recherche qui s'est créé pour offrir des communications sous-marine efficaces et des applications civiles et militaires tel que la surveillance de l'environnement, l'exploration sous-marines, la prévention des catastrophes ou bien encore la navigation assistée. L'onde acoustique représente le médium de transmission de l'information dans un réseau de capteurs sans fil sous l'eau, ce dernier est confronté par de nombreux problèmes liés aux exigences des applications tels que la bande passante limitée, batterie faible, le canal sous-marin défectueux, et le délai de propagation élevé, pour cela de nouveaux protocoles de routage doivent être conçus à cet environnement. Le sujet de ce projet consiste à l'évaluation des performances en terme d'énergie et de délai 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 et les comparer avec le protocole HH-VBF (hop-by-hop VBF) qui vient de pallier les lacunes de VBF.

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

## Abstract

During the last decade, a new type of wireless network has aroused great interest among the scientific community, these underwater wireless sensor networks (UWSN). Underwater sensor networks are a special type of wireless sensor networks dedicated to specific applications in the marine environment. They constitute a new area of research that has developed to provide effective underwater communications and civil and military applications such as environmental monitoring, exploration submarine disaster reduction or even the assisted navigation. The acoustic wave is the medium of transmission of information in a wireless sensor network under water; it is confronted by many problems related to application requirements such as limited bandwidth, low battery, the channel faulty submarine, and high propagation delay. For this, new routing protocols must be designed for this environment. The subject of this project is the evaluation of performance in terms of energy and a routing protocol called time VBF (Vector Based forwarding) which is the first routing protocol designed for mobile underwater sensor networks and compare with the HH-VBF protocol (hop-by-hop VBF) who has overcome the shortcomings of VBF.

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

## ملخص

خلال العقد الماضي ، نوع جديد من الشبكات اللاسلكية حظي باهتمام كبير في الأوساط العلمية، تمثل في شبكات الاستشعار اللاسلكية تحت الماء. شبكات الاستشعار المائية تعتبر نوعا خاصا من شبكات الاستشعار اللاسلكية مخصصة للتطبيقات الخاصة بالمناطق المائية. وهي تشكل مجال جديد للبحث و التي وضعت لتوفير اتصالات فعالة تحت المياه و تطبيقات مدنية و عسكرية تتمثل في: الرصد البيئي، التنقيب تحت الماء، الوقاية من الكوارث، الملاحة، المراقبة التكتيكية و الكشف عن الألغام. و تمثل الموجة الصوتية التكنولوجيا النموذجية لتحقيق التواصل الفعال بين أجهزة الاستشعار البحرية، حيث تواجه هذه الأخيرة عدة مشاكل مرتبطة بالتطبيقات المائية التي تتمثل في النطاق الترددي المحدود، ضعف البطارية ... و لهذا العديد من بروتوكولات التوجيه التي صممت لهذه البيئة. بحثنا يتعلق بتقييم مدى فعالية بروتوكول التوجيه (VBF) من حيث الطاقة المستهلكة و مدة إرسال المعلومات و مقارنتها مع البروتوكول(HH-VBF)

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