

Université Abou Bekr Belkaid  
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



# THESE

Présentée  
A L'UNIVERSITE DE TLEMCCEN  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE TELECOMMUNICATIONS

Pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Spécialité : "Systèmes et Réseaux de Télécommunications"

Par

*SOUIKI Sihem*

---

*PROTOCOLES DE ROUTAGE PERFORMANTS DEDIES AUX RESEAUX DE CAPTEURS  
SANS FIL SOUS L'EAU*

---

Soutenue le 28 Novembre 2015 devant le Jury:

LEHSAINI Mohamed	MCA, Université de Tlemcen	Président
HAFFAF Hafid	Pr, Université d'Oran	Examineur
SEKHRI Larbi	Pr, Université d'Oran	Examineur
FEHAM Mohammed	Pr, Université de Tlemcen	Directeur de Thèse
HADJILA Mourad	MCB, Université de Tlemcen	Invité

## *Remerciements*

Tout d'abord et avant tout, je remercie vivement ALLAH le tout puissant de m'avoir permis d'emprunter ce chemin et de m'avoir donné suffisamment de courage et de patience pour accomplir ce travail, qui au début paraissait une mission difficile.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur professeur FEHAM Mohammed pour son encouragement, son expérience, ses conseils et sa rigueur qui m'ont permis de mener à bien cette thèse.

Je remercie tout particulièrement Mr. LEHSAINI Mohammed pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse, je tiens à remercier aussi les membres du jury, Mr. HAFFAF Hafid, Mr. SEKHRI Larbi, Mr. Hadjila Mourad pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Mes grands remerciements et ma profonde gratitude à Mr. HADJILA Mourad à qui je dois beaucoup pour son aide constante à tous les niveaux, sa qualité scientifique et humaine, son encouragement et ses remarques qui ont largement contribué à l'aboutissement de cette thèse. Ce fut un grand honneur pour moi de travailler à ses côtés.

Je remercie chaleureusement Mr. ZAOUI Abdelhalim pour tous ses encouragements, ses conseils et pour m'avoir soigneusement corrigé cette thèse ... un grand merci pour vous.

Je tiens particulièrement à remercier tous les membres du laboratoire STIC, doctorants, enseignants et secrétaire pour leur sympathie et leur encouragement.

Bien sûr, je ne peux terminer sans remercier mes proches de tout cœur et surtout mes parents qui, au cours de ces années de thèse, m'ont toujours aidé et encouragé.

*A ma mère et mon père,*

*A ma sœur et mes frères,*

*A tous ceux que j'aime et je respecte.*

# Table des matières

<b>Liste des figures .....</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abréviations .....</b>	<b>x</b>
<b>Chapitre I. Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<i>I Contexte général.....</i>	<i>1</i>
<i>II Problématiques et motivations.....</i>	<i>1</i>
<i>III Contribution et organisation du manuscrit.....</i>	<i>3</i>
<b>Chapitre II. Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil sous-marins.....</b>	<b>6</b>
<i>I Introduction .....</i>	<i>7</i>
<i>II Les réseaux de capteurs sans fil.....</i>	<i>7</i>
II.1 Définition.....	7
II.2 Types des réseaux de capteurs sans fil.....	8
II.2.1 Les réseaux de capteurs terrestres.....	9
II.2.2 Les réseaux de capteurs souterrains .....	9
II.2.3 Les réseaux de capteurs sous-marins .....	9
II.2.4 Les réseaux de capteurs multimédias.....	10
II.2.5 Les réseaux de capteurs mobiles.....	11
II.3 Domaines d'applications des réseaux de capteurs .....	11
II.4 Contraintes des RCSFs .....	12
II.4.1 Passage à l'échelle .....	12
II.4.2 Tolérance aux pannes.....	13
II.4.3 Contraintes matérielles.....	13
II.4.4 Coût de production.....	13
II.4.5 Topologie du réseau.....	13
II.4.6 Environnement.....	13
II.4.7 Media de transport .....	14
II.4.8 Consommation d'énergie .....	14
<i>III Vers les réseaux de capteurs sans fil sous-marins.....</i>	<i>14</i>

III.1	Définition d'un réseau de capteurs sous-marin.....	14
III.2	Architecture d'un capteur sous-marin.....	15
IV	<i>Différentes techniques de communication sans fil aquatique</i> .....	17
IV.1	Communication par l'onde radio.....	17
IV.2	Communication par l'onde optique.....	18
IV.3	Communication par l'onde acoustique.....	18
IV.4	Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique.....	18
V	<i>Propagation sonore en milieu marin</i> .....	21
V.1	Principe de propagation du son.....	21
V.2	Caractéristiques de l'onde acoustique sous-marine.....	22
VI	<i>Différence entre RCSF et RCSF-SM</i> .....	24
VII	<i>Contraintes des RCSF-SMs</i> .....	25
VII.1	Pertes et limitation de la bande passante.....	25
VII.2	Phénomène de multi trajets.....	27
VII.3	Bruit acoustique.....	28
VII.4	Effet Doppler.....	29
VII.5	Consommation d'énergie.....	30
VII.6	Coût d'un capteur sous-marin.....	30
VIII	<i>Applications des RCSF-SMs</i> .....	30
IX	<i>Différentes architectures de communication dans les RCSF-SMs</i> .....	32
IX.1	Les réseaux de capteur sous-marins à deux dimensions (2D).....	33
IX.2	Les réseaux de capteur sous-marins en trois dimensions (3D).....	34
IX.3	Les réseaux de capteurs avec véhicules sous-marins autonomes.....	35
X	<i>Différentes problématiques de recherche dans les RCSF-SMs</i> .....	36
X.1	Routage efficace dans les RCSF-SMs.....	36
X.2	Sécurité et robustesse des RCSF-SMs.....	37
X.3	Localisation dans les RCSF-SMs.....	37
XI	<i>Conclusion</i> .....	38
<b>Chapitre III. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins.....</b>		<b>39</b>
I	<i>Introduction</i> .....	40
II	<i>Architectures de communication dans les RCSF-SMs</i> .....	40
III	<i>Problèmes de conception d'un protocole de routage pour les RCSF-SMs</i> .....	41
III.1	La mobilité du nœud.....	41
III.2	Consommation d'énergie.....	42
III.3	Déploiement des nœuds.....	42
III.4	L'erreur du canal sous-marin acoustique.....	42
III.5	Délai de propagation élevé et faible bande passante.....	42

III.6	La taille du réseau .....	43
III.7	Tolérance aux pannes.....	43
III.8	Qualité de service.....	43
IV	<i>Sources de perte d'énergie d'un RCSF-SM</i> .....	44
IV.1	Énergie de communication .....	44
IV.2	Énergie de traitement.....	44
IV.3	Accès au médium de transmission.....	44
V	<i>Critères de performances d'un protocole de routage</i> .....	45
VI	<i>Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sous-marins</i> .....	46
VII	<i>Exemples de protocoles de routage dans les RCSF-SMs</i> .....	49
VII.1	Le protocole de routage « VBF ».....	49
VII.2	Le protocole de routage « HH-VBF ».....	51
VII.3	Le protocole de routage « FBR ».....	52
VII.4	Le protocole de routage « DBR ».....	53
VII.5	Le protocole de routage « ICRP ».....	55
VII.6	Le protocole de routage « Adaptative ».....	56
VII.7	Le protocole de routage « DUCS ».....	57
VII.8	Le protocole de routage « MCCP ».....	59
VII.9	Le protocole de routage « Pack clonning ».....	60
VII.10	Le protocole de routage « LCAD ».....	61
VIII	<i>Conclusion</i> .....	63
<b>Chapitre IV. Le routage basé sur le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins .....</b>		<b>64</b>
I	<i>Introduction</i> .....	66
II	<i>Algorithme FCM (Fuzzy C-Means)</i> .....	67
III	<i>Contribution</i> .....	68
III.1	Le premier algorithme proposé: SH-FEER.....	68
III.2	Le deuxième algorithme proposé: MH-FEER .....	70
IV	<i>Évaluation</i> .....	70
IV.1	Hypothèses.....	71
IV.2	Modèle d'énergie utilisé .....	71
IV.3	Résultats de simulation et analyse .....	72
IV.3.1	Simulation I: topologie Statique .....	73
IV.3.2	Simulation II : la topologie Dynamique.....	75
IV.3.3	Impact de la densité des nœuds.....	77
IV.3.4	Impact de la mobilité des nœuds.....	78
V	<i>Conclusion</i> .....	79

<b>Chapitre V. Routage hybride basé sur les métaheuristiques dans les RCSF-SMs.....</b>	<b>82</b>
I Introduction .....	83
II Routage basé sur les chaînes dans les réseaux de capteurs .....	84
III Notions fondamentales sur les métaheuristiques .....	84
III.1 Heuristiques et métaheuristiques .....	85
III.2 Classification .....	85
III.2.1 Les métaheuristiques à solution unique .....	85
III.2.2 Les métaheuristiques à population de solutions.....	86
IV Les stratégies d'optimisations inspirées de la nature utilisée dans les RCSFs.....	87
IV.1 Caractéristiques des systèmes biologiques .....	87
IV.2 Avantages et limites.....	88
IV.3 L'algorithme de colonie de fourmis.....	89
IV.3.1 Construction de la solution .....	91
IV.3.2 Mise à jour de phéromones.....	91
IV.4 Algorithme ACO pour le problème de voyageur de commerce.....	92
V Contribution.....	95
V.1 Phase 01: formation des clusters et des chaînes.....	95
V.2 Phase 02: sélection du nœud Leader.....	97
V.3 Phase 03: transmission des données.....	98
VI Évaluation.....	98
VI.1 L'efficacité énergétique.....	98
VI.2 La durée de vie du réseau.....	99
VI.3 Impact de la mobilité .....	101
VII Conclusion.....	102
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>103</b>
I Principales contributions.....	104
II Perspectives et nouveaux défis.....	105
<b>Références.....</b>	<b>107</b>

# Liste des figures

Figure II-1 Exemple de réseau de capteurs.....	8
Figure II-2 Un réseau de capteurs sous-marins .....	15
Figure II-3 Anatomie du capteur sous-marin.....	16
Figure II-4 Exemples des capteurs sous-marins .....	17
Figure II-5 Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique .....	19
Figure II-6 Caractéristiques Variation de la répartition des molécules à la présence d'une onde sonore.....	21
Figure II-7 Évolution de la vitesse de propagation de l'onde acoustique en milieu marin en fonction de la profondeur (a), de la température (b) et de la salinité(c).....	24
Figure II-8 Atténuation en fonction de la fréquence d'émission du signal pour différente portée de transmission .....	27
Figure II-9 Diagramme typique montrant les multi trajets d'une onde acoustique .....	28
Figure II-10 Types de bruits acoustiques en milieu marin .....	29
Figure II-11 Effet Doppler sur un signal transmis .....	29
Figure II-12 Station de surveillance climatique (ARC CLIMATE) .....	31
Figure II-13 Exploration des fonds marins avec l'AUV Cyclops.....	31
Figure II-14 Système australien d'alerte au tsunami .....	32
Figure II-15 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D.....	33
Figure II-16 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 3D.....	35
Figure II-17 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins.....	36
Figure III-1 Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins.....	48
Figure III-2 Topologie du protocole VBF pour les RCSF-SMs. ....	50
Figure III-3 Principe du protocole HH-VBF pour les RCSF-SMs. ....	51
Figure III-4 L'architecture du protocole FBR.....	53
Figure III-5 Sélection du nœud qualifié pour la transmission dans le protocole DBR.....	54
Figure III-6 Protocole de routage adaptative .....	57
Figure III-7 Exemple de réseau avec DUCS.....	58
Figure III-8 Architecture de réseau utilisé dans le protocole de routage LCAD .....	62
Figure IV-1 Energie totale consommée vs. Nombre d'itérations (topologie statique).....	73
Figure IV-2 Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations (topologie statique).....	74
Figure IV-3 Durée de vie du premier et dernier nœud dans le réseau (topologie statique).....	74



Figure IV-4 Énergie totale consommée vs. Nombre d'itérations (topologie dynamique).....	75
Figure IV-5 Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations (topologie dynamique).....	76
Figure IV-6 Durée de vie des premier et dernier nœuds dans le réseau (topologie dynamique).....	76
Figure IV-7 Impact de la densité des nœuds sur l'énergie totale consommée (topologie dynamique) .....	77
Figure IV-8 Impact de la densité des nœuds sur le nombre des nœuds vivants (topologie dynamique).....	78
Figure IV-9 Impact de la mobilité des nœuds sur l'énergie totale consommée.....	78
Figure IV-10 Impact de la mobilité des nœuds sur le nombre des nœuds vivants .....	79
Figure V-1 Classification des métaheuristiques.....	86
Figure V-2 Auto-organisation dans les systèmes biologiques : (a) un vol groupé d'oiseaux (b) un essaim de poissons (c) Une colonie de fourmis (d) un essaim d'abeilles .....	87
Figure V-3 Description du comportement des fourmis en présence d'un obstacle dans l'environnement : (a) situation initiale, (b) un obstacle s'interpose et les fourmis choisissent d'aller d'un côté ou de l'autre avec la même probabilité, (c) l'axe BCD étant plus court, les fourmis arrivent plus vite de l'autre côté de l'obstacle, (d) le nombre croissant de phéromones fait émerger le chemin BCD. ....	90
Figure V-4 Construction de la chaîne fermée .....	96
Figure V-5 Construction de la chaîne ouverte .....	96
Figure V-6 Formation des chaînes inférieures dans chaque cluster.....	97
Figure V-7 Formation de la chaîne globale .....	97
Figure V-8 Énergie totale consommée vs. Nombre d'itérations.....	99
Figure V-9 Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations .....	100
Figure V-10 Durée de vie du premier et dernier nœud dans le réseau.....	100
Figure V-11 Consommation totale d'énergie vs. Nombre d'itérations.....	101
Figure V-12 Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations .....	101

# Liste des tableaux

Tableau II-1 Comparaison entre les systèmes de communication sans fil dans l'air et dans le milieu marin. ....	20
Tableau II-2 Propriétés physiques d'une onde acoustique.....	22
Tableau III-1 La bande passante disponible pour différentes portées dans le canal acoustique.....	43
Tableau IV-1 Paramètres de simulation.....	72

## Liste des acronymes

ACK	Acknowledgment
ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony System
ALS	Area Localization Scheme
AoA	Angle of Arrival
AS	Ant System
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
BAN	Body Area Network
CCRA	Clustered Chain based Routing Algorithm
CH	Cluster Head
CPU	Central Processing Unit
CTS	Clear To Send
DBR	Depth Based Routing
DUCS	Distributed Underwater Clustering Scheme
EEPB	Energy-Efficient Pegasus-Based protocol
FBR	Focused Beam Routing
FCM	Fuzzy C-Means
GPS	Global Positioning System
GRASP	Greedy randomized adaptive search procedure
HH-VBF	Hop-by-Hop VBF
ICRP	Information Carrying based Routing Protocol
LCAD	Location-Based Clustering Algorithm for Data Gathering
LDB	Localization with Directional Beacon
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Media Access Control
MCCA	Minimum Cost Clustering Algorithm
MCCP	Minimum Cost Clustering Protocol
MH-FEER	Multi-Hop Fuzzy based Energy Efficient Routing algorithm
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QoS	Quality of Service
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RCSF-SM	Réseau de Capteurs Sans Fil Sous-Marins
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency IDentification

RREQ	Route Request
RTS	Request To Send
SB	Station de Base
SH-FEER	Single-Hop Fuzzy based Energy Efficient Routing algorithm
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDMA	Time-Division Multiple Access
ToA	Time of Arrival
TSP	Travelling Salesman Problem
UWSN	Underwater Wireless Sensor Network
VBF	Vector Based Forwarding
VLF	Very Low Frequency

# **Chapitre I. Introduction générale**

## I Contexte général

La Terre est une planète d'eau, environ 70% de la surface planétaire est recouverte d'eau. Récemment, cette grande partie inexplorée a fasciné les chercheurs. Les catastrophes dues à la nature ou d'origine humaine qui ont eu lieu au cours des dernières années ont suscité un important intérêt dans la surveillance des milieux océaniques à des fins scientifiques, environnementales, commerciales, etc. Les industries de l'ingénierie navale sont également de plus en plus intéressées par la technologie des réseaux de communication sans fil.

La transmission d'information sans fil via l'océan est l'une des technologies habilitantes pour le développement de futurs systèmes d'observation de l'océan et des réseaux de capteurs. Ces derniers ont révolutionné notre mode de vie et notre interaction avec le monde qui nous entoure. Ces réseaux sont constitués d'un ensemble de capteurs qui collectent et transmettent des données environnementales vers un point centralisé. Récemment, l'application de réseaux de capteurs dans les milieux aquatiques (c-à-d construction des réseaux de capteurs sans fil sous-marins (RCSF-SMs)) a reçu un intérêt croissant.

Les nœuds capteurs collaborent et s'auto-organisent pour former un réseau de capteur sans fil (RCSF) capable de superviser son environnement de déploiement souvent hostile, inaccessible et sans aucune intervention humaine, ce qui peut s'avérer très utile pour de nombreuses applications militaires, civiles, environnementales, industrielles ...etc.

Afin d'explorer et collecter des données à partir d'un environnement sous-marin (température, salinité, données sismiques, etc.), différentes applications ont conduit également l'évolution rapide des systèmes de communication acoustiques aquatiques à travers des réseaux de capteurs sans fil statiques et dynamiques.

L'exploration des ressources naturelles et des données scientifiques des océans, le rassemblement des données océanographiques, la surveillance de la pollution, la détection de bancs de poissons, la télé-localisation sous-marine, l'industrie pétrolière en mer, la surveillance côtière et la communication entre véhicules sous-marins, la télémessure et téléalarme pour prévenir des mouvements sismiques, la navigation assistée représentent une série d'applications et des problèmes socio-économiques associés à un réseau sans fil dédié au milieu aquatique.

Les systèmes de communication sous-marins actuels impliquent la transmission de l'information sous la forme d'une onde acoustique, électromagnétique (EM), ou optique.

Chacune de ces techniques a des avantages et des inconvénients. La communication acoustique est la technique la plus polyvalente, elle est largement utilisée dans des environnements sous-marins en raison de la faible atténuation du son dans l'eau, ainsi l'eau se comporte comme un très bon guide d'onde où l'énergie sonore est quasi parfaitement réfléchi lors des interactions avec les frontières du guide : surface et fonds marins. De plus, les ondes acoustiques, contrairement aux ondes électromagnétiques et optiques peuvent atteindre des distances de l'ordre de quelques centaines ou de milliers de kilomètres sans être affectées par les particules en suspension dans l'eau. D'autre part, l'utilisation d'ondes acoustiques dans l'eau peu profonde peut être perturbée par des changements de température, bruit ambiant de surface et la propagation par trajets multiples en raison de la réflexion et de la réfraction. Néanmoins, la technologie actuellement favorable à la communication sous-marine est l'acoustique.

Un autre type de support de transmission qui consiste l'utilisation d'onde électromagnétique, mais cette technique ne fonctionne pas bien dans un environnement sous l'eau en raison de la nature conductrice du support, en particulier dans le cas de l'eau de mer. Toutefois, les ondes très longues, appelées VLF (Very Low Frequency), de l'ordre de quelques dizaines de Hertz, peuvent être transmises pratiquement sans atténuation sous l'eau. L'inconvénient de ces longueurs d'onde est que le taux de transfert d'information qu'elles permettent est très faible (de l'ordre de quelques bits par seconde seulement), ce qui est insuffisant même avec une compression très élevée de l'information.

Pour les ondes optiques, le problème d'atténuation du signal n'est pas posé, mais sont généralement limitées par le phénomène de dispersion qui constitue le principal handicap de la propagation des faisceaux laser dans l'eau ; ce qui exige une précision d'émission élevée.

## **II Problématiques et motivations**

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins sont généralement caractérisés par un déploiement moins dense dans des environnements limités en termes de ressources. Cela est dû aux défis impliqués dans le déploiement lui-même dans l'environnement sous-marin et aussi le coût impliqué des capteurs. Toute fois ce type de réseaux est limité en termes de bande passante, délai de propagation, perturbation du canal de transmission et surtout d'énergie. Remplacer ou recharger l'énergie d'un capteur sous-marin est presque impossible en raison de la difficulté imposée par l'environnement aquatique en outre, on ne peut pas profiter de l'énergie solaire pour recharger les batteries. En fait, la consommation d'énergie

des capteurs prend un rôle primordial dans la durée de vie du réseau qui est devenue une métrique de performance indispensable dans cet axe.

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour un objectif d'optimiser la consommation d'énergie des nœuds via l'introduction des techniques de conservation d'énergie efficaces afin d'améliorer les performances du réseau, particulièrement la maximisation de sa durée de vie.

De ce fait, plusieurs chercheurs ont travaillé sur cette problématique en proposant une architecture réseau basée sur l'approche de clustering adaptée aux nœuds de capteurs. Cette architecture consiste en la construction d'un ou de plusieurs groupes (clusters) de nœuds, dans chacun d'eux dispose d'un chef de groupe (Cluster Head ; CH) élu pour la collecte des données émises par les membres de son groupe, puis l'agrégation et par la suite la transmission des données à la station de base. Cette architecture vise à minimiser la consommation d'énergie des nœuds et par conséquent le prolongement de la durée de vie du réseau. Un des enjeux principaux est donc de pouvoir trouver des solutions optimales en termes de consommation énergétique pour les réseaux de capteurs sous-marins adaptées à leurs caractéristiques spécifiques.

### **III Contribution et organisation du manuscrit**

Dans ce mémoire de thèse, notre contribution se concentre sur la proposition d'algorithmes de routage dont l'objectif est de traiter le problème de gestion de ressources afin de maximiser la durée de vie du réseau. Pour cela, nous avons proposé des algorithmes basés sur plusieurs aspects :

- le routage basé sur le clustering avec la technique FCM (Fuzzy C-Means),
- la combinaison du routage à base de clusters et le routage basé sur les chaînes.

Au début, dans la première contribution nous avons proposé deux algorithmes de routage énergétiquement efficaces, basés sur le clustering par la méthode FCM, permettant l'extension de la durée de vie d'un RCSF-SM. Le deuxième algorithme proposé est une amélioration du premier, par l'utilisation d'un mode de transmission efficace entre les CHs et la station de base. Notre deuxième contribution consiste à l'intégration d'un autre concept de routage basé sur les chaînes en utilisant l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis dans le but de trouver le chemin le plus court vers la destination.



Ce manuscrit est organisé en deux parties. La première partie présente un état de l'art et la deuxième partie décrit nos contributions théoriques ainsi que leurs implémentations sous Matlab. Nous détaillons dans la suite le contenu des chapitres.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des concepts fondamentaux sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons d'abord par la description de l'architecture de fonctionnement, les différents types, les applications et les contraintes de ce type de réseaux. Par la suite, une attention particulière est portée aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins (RCSF-SMs). Nous présentons le principe de fonctionnement ainsi la structure interne d'un capteur sous-marin. Nous enchaînons par une étude sur les trois techniques de communication aquatique (électromagnétique, optique, acoustique), en mettant le point sur les ondes acoustiques qui représente le meilleur médium de transmission sous l'eau. Ensuite nous passons en revue les points qui diffèrent les réseaux de capteurs sous-marins des RCSFs ainsi que leurs caractéristiques uniques, leurs contraintes, leurs applications. Nous enchaînons par l'étude des différentes architectures de communications des RCSF-SMs, et enfin nous présentons les différentes problématiques de recherche dans les RCSF-SMs.

Dans le troisième chapitre, nous poursuivons notre étude bibliographique en nous intéressant plus particulièrement aux problèmes du routage et les contraintes liées aux environnements aquatiques. Nous décrivons par la suite les principaux protocoles proposés et leur classification.

La deuxième partie de cette thèse présente nos contributions et se compose de deux chapitres. Dans cette partie nous détaillons nos propositions, tout en appuyant nos propos par les mesures et résultats réalisés.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons notre première contribution, liée à la proposition de deux algorithmes de routage économe en énergie basés sur une technique de clustering appelée FCM (Fuzzy C-Means). Nous décrivons le détail des deux algorithmes proposés appelés SH-FEER et MH-FEER, et nous effectuons par la suite une évaluation des performances en terme de consommation d'énergie totale et de durée de vie ainsi qu'une comparaison par rapport à la transmission directe.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons notre deuxième contribution liée à la combinaison entre l'approche de clustering et des chaînes. L'algorithme proposé « CCRA » est caractérisé par le regroupement des nœuds en un nombre de clusters en utilisant l'algorithme FCM et la formation de chaînes locales dans chaque cluster. La communication

inter-cluster est effectuée par l'approche basée sur les chaînes en utilisant l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis pour trouver la chaîne la plus courte qui relie tous les nœuds du cluster. Par la suite une chaîne globale est formée afin d'acheminer les données vers la station de base.

Nous finalisons ce manuscrit par une conclusion générale où nous résumons l'apport de cette thèse. Nous proposons ensuite plusieurs perspectives visant l'optimisation d'énergie du processus de routage dans les environnements sous-marins.

## **Chapitre II. Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil sous-marins**

## I Introduction

Les développements innovants dans les technologies des communications sans fil et de la microélectronique ont donné naissance aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces derniers sont constitués d'un ensemble de dispositifs miniaturisés, peu coûteux, de faible puissance, et qui peuvent communiquer entre eux via un lien radio, appelés capteurs. Chaque nœud capteur possède différents composants : de captage pour capter des grandeurs physiques telles que (la température, la pression, etc), de traitement et de communication pour effectuer des calculs simples sur les données et communiquer avec les nœuds voisins. Les données collectées par ces capteurs sont acheminées directement ou via un lien multi-sauts vers un "point de collecte", appelé station de base.

Ce type de réseau peut être déployé dans différents environnements (terre, sous-terre, océans), chaque environnement a une influence particulière sur le fonctionnement et les performances des RCSFs. Dans cette thèse, nous focalisons notre étude de façon générale sur les réseaux de capteurs sans fil sous l'eau (aquatique) et particulièrement sur les réseaux de capteurs sans fil sous-marins (RCSF-SM).

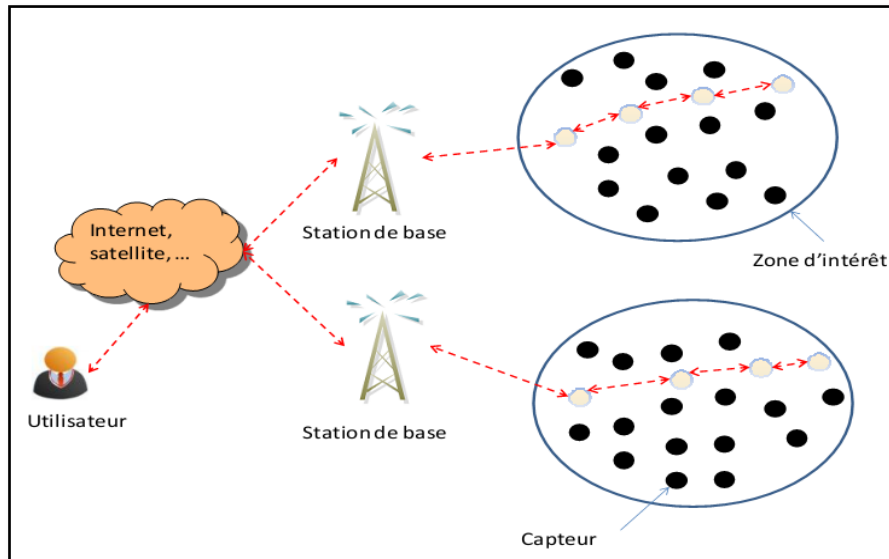
Dans un premier temps, nous commençons par donner une brève description des RCSFs (leurs types, domaines d'application et contraintes). Dans un deuxième temps, nous présenterons le principe de fonctionnement des RCSF-SMs, l'anatomie d'un capteur sous-marin. Par la suite, nous exposerons une étude sur les techniques de communication aquatiques, les caractéristiques uniques des RCSF-SMs ainsi que leurs différences avec les RCSFs. Nous nous attarderons dans un dernier temps sur les applications et les différentes problématiques des réseaux de capteurs sans fil sous-marins.

## II Les réseaux de capteurs sans fil

### II.1 Définition

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont un type spécifique de réseau Ad-hoc, dans lesquels les nœuds sont des « capteurs intelligents ». Ils se composent généralement d'un grand nombre d'entités communicantes entre elles 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 (nœud-puits 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 [1].



**Figure II-1** Exemple de réseau de capteurs

Un exemple de réseaux de capteurs est fourni dans la figure II-1 ; les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt. 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. Les réseaux de capteurs viennent en soutien de l'environnement et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés dans le domaine des techniques sans fils. Depuis quelques décennies, le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques.

## II.2 Types des réseaux de capteurs sans fil

Selon l'environnement de déploiement des nœuds capteurs, on peut distinguer différents types de réseaux confrontés à différents défis et limites, tels que les réseaux de capteurs terrestre, sous-marin, souterrain, multimédia et mobile [2].

### ***II.2.1 Les réseaux de capteurs terrestres***

Les nœuds capteurs terrestres sont déployés dans un environnement dense pour communiquer efficacement les données collectées vers la station de base. La fiabilité de cette communication représente un enjeu très important pour ce type de réseau. Ainsi la limitation en termes d'énergie de capteur est un autre défi, lorsque sa batterie ne peut être rechargeable. Cependant, pour certaines applications, les nœuds capteurs terrestres peuvent être équipés d'une source d'alimentation alternative telle que l'énergie solaire. Dans tous les cas, il est important de minimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs. Pour un réseau de capteurs terrestre, l'énergie peut être conservée à travers un acheminement optimal multi-saut des données, une agrégation des données du réseau, en éliminant la redondance des données, en réduisant les délais de transmission et en utilisant les opérations à faible rapport cyclique.

### ***II.2.2 Les réseaux de capteurs souterrains***

Les réseaux de capteurs souterrains [3, 4] sont formés d'un ensemble de nœuds capteurs enterrés sous sol ou dans une grotte ou une mine utilisés pour observer et contrôler les conditions souterraines. Le coût d'un réseau de capteurs souterrain est plus cher qu'un réseau de capteurs terrestre et cela est dû aux équipements et aux difficultés de déploiement et de maintenance. Les nœuds capteurs souterrains sont coûteux parce que les pièces d'équipements appropriés doivent être bien choisies pour garantir une communication fiable à travers le sol, les roches, l'eau et autres contenus minéraux. Le milieu souterrain rend la communication sans fil conflictuelle en raison des pertes du signal et des niveaux élevés d'atténuation. Contrairement aux réseaux de capteurs terrestres, le déploiement d'un réseau de capteurs souterrain nécessite une planification minutieuse et une considération d'énergie et de coût. L'énergie est un facteur important dans les réseaux de capteurs souterrains. Comme dans un réseau de capteurs terrestre, les nœuds capteurs souterrains sont équipés d'une source d'alimentation limitée, une fois déployée sous terre il est difficile de la recharger ou de la remplacer. Comme préalable, l'objectif essentiel est de conserver l'énergie afin d'augmenter la durée de vie d'un réseau qui peut être atteint par l'implémentation d'un protocole de routage efficace.

### ***II.2.3 Les réseaux de capteurs sous-marins***

Les réseaux de capteurs sous-marins [5, 6] sont constitués des nœuds ancrés dans le fond marin ou amarrés aux véhicules autonomes mobiles déployés sous l'eau. A la différence des réseaux de capteurs terrestres, les nœuds capteurs sous-marins sont plus chers et leur déploiement est moins dense. 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. Les communications sans fil sous-marines sont établies par transmission d'ondes acoustiques. Ce moyen de transmission est confronté à plusieurs défis tels que la bande passante limitée, le temps de propagation très élevée. Un autre défi est la défaillance du nœud capteur en raison des conditions environnementales. Les nœuds capteurs sous-marins doivent être capables de s'auto-configurer et de s'adapter à l'environnement dur de l'océan. Les nœuds capteurs sous-marins sont équipés d'une batterie limitée qui ne peut être remplacée ou rechargée. La conservation de l'énergie pour les réseaux de capteurs sous-marins consiste à développer des techniques efficaces de routage et de communication sous-marine.

#### ***II.2.4 Les réseaux de capteurs multimédias***

Les réseaux de capteurs multimédias [7] ont été proposés pour permettre la surveillance et le suivi des événements du type multimédia comme la vidéo, l'audio et l'image. Les réseaux de capteurs multimédias se composent d'un certain nombre de nœuds capteurs à faible coût équipés de caméras et de microphones. Ces nœuds capteurs interconnectent les uns avec les autres via une connexion sans fil pour la restitution, le traitement, la corrélation et la compression de données. Les nœuds capteurs multimédias sont déployés de manière pré-planifiée dans l'environnement pour garantir une large couverture. Les défis dans les réseaux de capteurs multimédias comprennent une forte demande de bande passante, une forte consommation d'énergie, une qualité de service (QoS), des techniques de traitement et de compression de données et une conception inter-couche (cross-layer design). Le contenu multimédia comme un flux vidéo nécessite une bande passante élevée afin que le contenu puisse être délivré. En conséquence, un débit élevé de données entraîne une consommation d'énergie élevée. Les techniques de transmission qui prennent en charge une bande passante élevée et une faible consommation d'énergie doivent être développées. L'approvisionnement de la qualité de service est une tâche difficile dans un réseau de capteurs multimédias en raison des deux paramètres, le retard et la capacité du canal. Il est important qu'un certain niveau de qualité de service doit être atteint pour une livraison fiable de contenu. En réseau, le traitement, le filtrage et la compression peuvent améliorer considérablement les performances du réseau en termes de réduction des bruits et d'extraction d'informations redondantes et les contenus qui fusionnent. De même, l'interaction cross-layer entre les couches peut améliorer le processus de traitement et de livraison.

### **II.2.5 Les réseaux de capteurs mobiles**

Les réseaux de capteurs mobiles se composent d'un nombre de nœuds capteurs qui peuvent se déplacer par leurs propres moyens et d'interagir avec l'environnement physique. Comme le cas des nœuds statiques, les nœuds mobiles ont la capacité de collecter, calculer et communiquer. Une différence clé est que les nœuds mobiles ont la possibilité de repositionner et de s'organiser en réseau. Un réseau de capteurs mobiles peut commencer avec un déploiement initial et les nœuds peuvent alors s'étaler pour recueillir des informations. L'information recueillie par un nœud mobile peut être communiquée à un autre nœud mobile se trouvant dans sa couverture radio. Une autre différence essentielle est la distribution des données. Dans un réseau de capteurs statique, les données peuvent être distribuées à l'aide de routage ou par inondation alors que le routage dynamique est utilisé dans un réseau de capteurs mobiles. Les challenges dans un réseau de capteurs mobiles comprennent le déploiement, la localisation, l'auto-organisation, la navigation et le contrôle, la couverture, l'énergie, l'entretien et le traitement des données. Les applications des réseaux de capteurs mobiles incluent la surveillance de l'environnement, le suivi de cible, la recherche, le sauvetage et la surveillance en temps réel des matières dangereuses. Pour la surveillance de l'environnement dans les zones sinistrées, le déploiement manuel pourrait ne pas être possible. Avec les nœuds capteurs mobiles, ils peuvent se déplacer dans les zones d'événements après le déploiement pour fournir la couverture nécessaire. Dans la surveillance et le suivi militaire, les nœuds capteurs mobiles peuvent collaborer et prendre des décisions fondées sur la cible. Les nœuds capteurs mobiles peuvent atteindre un degré de couverture et une connectivité plus élevés par rapport aux nœuds capteurs statiques. En présence d'obstacles sur le terrain, les nœuds capteurs mobiles peuvent être planifiés à l'avance et déplacés de manière appropriée aux régions obstruées pour augmenter l'exposition de la cible.

### **II.3 Domaines d'applications des réseaux de capteurs**

Les RCSFs disposent d'un ensemble très vaste d'applications dans multiples domaines, parmi lesquels, on peut noter les applications militaires, environnementales, médicales et industrielles.

- **Le domaine militaire :**

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des RCSFs permettant la détection et la collection d'informations sur la position de l'ennemi, la surveillance des zones hostiles (contaminées) et la détection d'agents chimiques et bactériologiques dans l'air.



- **La surveillance environnementale :**

La taille miniaturisée et les capacités relativement pertinentes en termes de calcul et de communication des nœuds capteurs permettent de les placer à des endroits très dangereux ou voir impossible d'être accédés par l'être humain, par exemple les volcans, les profondeurs des océans, les régions polaires, ou encore d'autres planètes que la terre [8]. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance [9].

- **Le domaine industriel :**

Les industriels s'intéressent aux potentialités des capteurs pour diminuer les coûts du contrôle et de la maintenance des produits, de la gestion de l'inventaire, de la télésurveillance après vente, ...etc [10]. En particulier, l'intégration de la technologie RFID (Radio Frequency Identification) aux réseaux de capteurs, constitue une direction prometteuse de recherche dans l'industrie.

- **Les domaines urbains et domotiques :**

Les capteurs entrent de plus en plus dans nos vies quotidiennes. Dans le milieu urbain, les capteurs sont déjà utilisés pour la localisation des bus, pour des tickets électroniques et pour la sécurité. Une des applications est la surveillance du trafic routier avec les réseaux de capteurs déployés sur les autoroutes [11]. De plus, les maisons, les bâtiments, les bureaux équipés de capteurs intelligents permettent de construire des systèmes pervasifs [12], où l'information est omniprésente.

- **Le domaine médical :**

La recherche sur l'usage des capteurs intelligents dans le domaine médical inclut les moyens d'hospitalisation à domicile, l'intégration des micro-capteurs "sur ou dans" le corps (BAN : Body Area Network) et la gestion des urgences [13]. Parmi les applications les plus utiles, on cite la télésurveillance des signes vitaux et des niveaux d'activité à domicile des personnes âgées ou handicapées ainsi que le contrôle à distance des données physiologiques.

## **II.4 Contraintes des RCSFs**

### **II.4.1 Passage à l'échelle**

Le nombre de nœuds capteurs déployés dans un réseau peut être à l'ordre des centaines voire des milliers. Pour certaines applications, il peut atteindre quelques millions. Afin de garantir le bon fonctionnement du réseau, les nouveaux schémas de déploiement doivent être

capables de travailler avec ce grand nombre de nœuds. Par ailleurs, ils doivent utiliser la propriété de haute densité dans les réseaux de capteurs et donc pouvoir déployer un grand nombre de nœuds dans une petite surface.

#### **II.4.2 Tolérance aux pannes**

Certains nœuds capteurs peuvent être bloqués ou peuvent tomber en panne à cause d'un manque d'énergie, d'un dégât matériel ou d'une interférence environnementale. La panne d'un nœud capteur ne doit pas affecter le fonctionnement global de son réseau. C'est le problème de fiabilité ou de tolérance aux pannes. La tolérance aux pannes est donc la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruption due à une panne d'un ou plusieurs nœuds capteurs.

#### **II.4.3 Contraintes matérielles**

Un nœud doit être placé dans un petit volume n'excédant pas, généralement, un centimètre cube ( $1\text{cm}^3$ ). En outre de cette contrainte de surface, un ensemble de conditions doit être satisfait. Un nœud capteur doit :

- ✓ Consommer le strict minimum d'énergie,
- ✓ Fonctionner dans de fortes densités,
- ✓ Avoir un faible coût de fabrication,
- ✓ Être autonome,
- ✓ S'adapter à l'environnement.

#### **II.4.4 Coût de production**

Comme les RCSFs consistent en un grand nombre de nœuds capteurs, le coût d'un seul capteur est très important pour définir le coût total de son réseau. Si ce dernier est plus cher que le déploiement d'un ensemble de capteurs ordinaires, alors le coût d'un RCSF n'est pas justifié. L'état de l'art définit le coût d'un réseau Bluetooth à 10\$, et un nœud capteur à 1\$.

#### **II.4.5 Topologie du réseau**

La disparition d'un nombre de capteurs dans le réseau, ainsi que le déploiement de nouveaux capteurs, rend la topologie du réseau fréquemment instable. La maintenance d'un réseau est d'autant importante que le changement de sa topologie.

#### **II.4.6 Environnement**

Les nœuds capteurs sont souvent déployés dans une région géographique distante et sans surveillance. Ils sont soumis à différentes conditions d'environnement, ils peuvent fonctionner

sous haute pression au fond de l'océan, dans un environnement dur tel que les champs de bataille ou même dans des milieux extrêmement froids.

#### **II.4.7 Media de transport**

Dans un réseau de capteurs, la communication à multi-sauts entre les nœuds est réalisée avec des liens sans fil à l'aide de media optique, infrarouge ou radio. La plupart des réseaux de capteurs utilisent des circuits de communication radio fréquence à cause de leur faible coût et leur facilité d'installation.

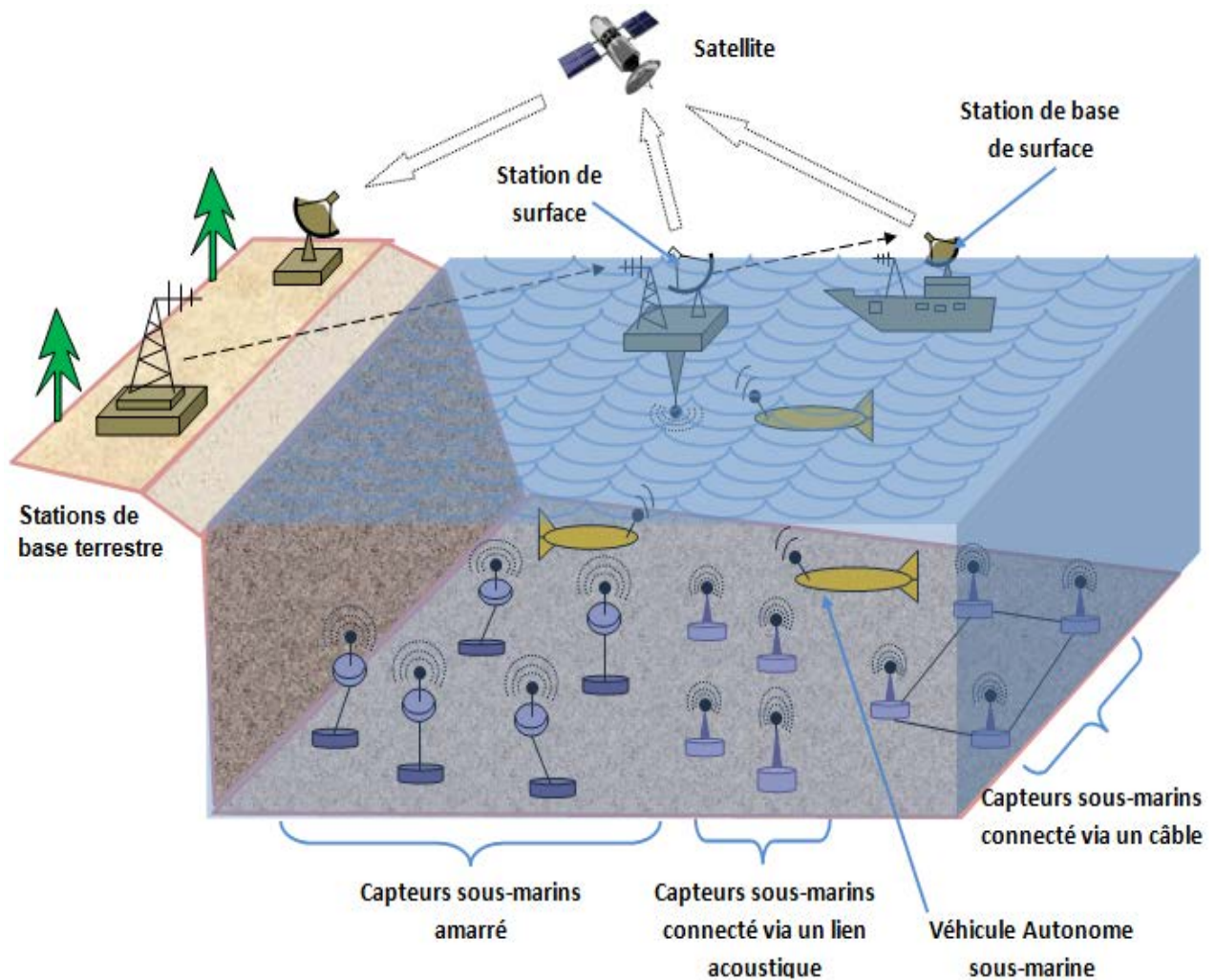
#### **II.4.8 Consommation d'énergie**

Les nœuds capteurs, étant des dispositifs microélectroniques, peuvent être équipés seulement d'une source d'énergie limitée (<0.5 Ah, 1.2 V). Dans certains scénarios d'application, il est impossible de réapprovisionner de l'énergie. La durée de vie d'un capteur est donc dépendante de la durée de vie de sa batterie. D'autre part, la retransmission des données, la réorganisation du réseau ainsi que le changement de sa topologie rendent la gestion et la conservation d'énergie d'une haute importance. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de réaliser les tâches de captage, traitement de données et communication. Cette dernière est l'opération qui consomme le plus d'énergie.

### **III Vers les réseaux de capteurs sans fil sous-marins**

#### **III.1 Définition d'un réseau de capteurs sous-marin**

Un réseau de capteurs sans fil sous-marin ou UWSN (Underwater Wireless Sensor Network) est formé par la coopération entre plusieurs nœuds établissant des liens bidirectionnels acoustiques entre eux [14]. 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. Chaque nœud peut être doté d'un ou plusieurs capteurs qui enregistrent des données environnementales à transmettre généralement vers des plateformes ou des bouées à la surface (Station de base) (figure II-2). Ainsi, le RCSF-SM est utilisé dans un environnement interactif où les scientifiques peuvent extraire des données en temps réel provenant de plusieurs capteurs distants sous-marins. Après évaluation des données reçues, des messages de contrôle peuvent être envoyés aux nœuds du réseau, afin d'adapter le réseau à des situations changeantes.

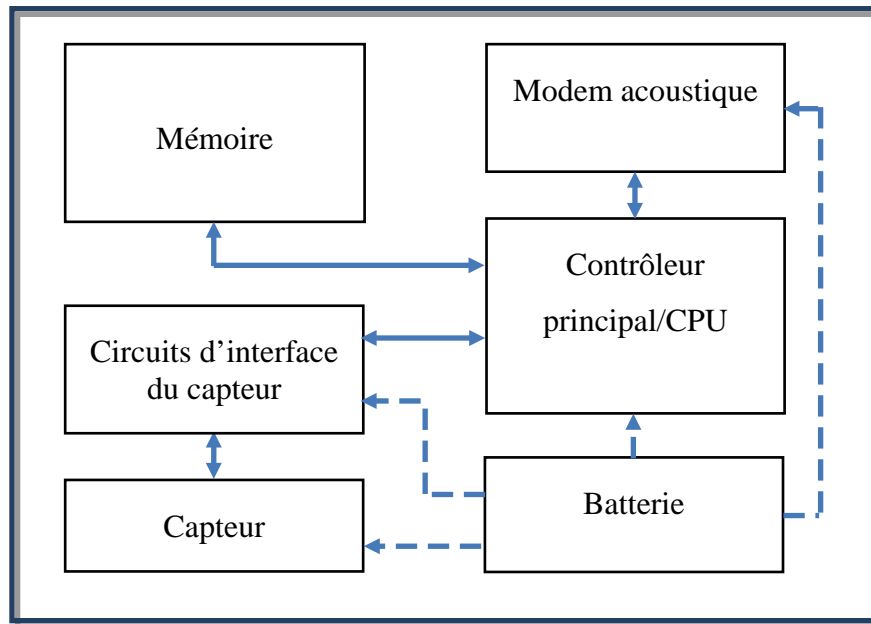


**Figure II-2** Un réseau de capteurs sous-marins.

### III.2 Architecture 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. L'architecture interne typique d'un capteur sous-marin est montrée dans la figure II-3. Il se compose d'un contrôleur principal/CPU qui est interfacé avec un instrument océanographique ou un capteur à travers un circuit d'interface.

Le contrôleur reçoit les données du capteur et il peut les stocker dans la mémoire embarquée, les traiter et les envoyer à d'autres périphériques réseau en contrôlant le modem acoustique. Les circuits électroniques sont généralement montés sur un châssis protégé par un boîtier en PVC. Parfois, tous les composants du capteur sont protégés de l'impact potentiel des engins de chalutage, en particulier dans les zones soumises à des activités de pêche.



**Figure II-3** Anatomie du capteur sous-marin

Les capteurs sous-marins peuvent mesurer différentes grandeurs telles que la qualité d'eau et étudier ses caractéristiques, la température, la densité, la salinité (capteurs interférométriques et réfractométriques), l'acidité, les produits chimiques, la conductivité, le pH (capteurs magnéto élastiques), l'oxygène (électrode de type Clark), l'hydrogène, le méthane dissous (METS) et la turbidité. Des puces à ADN peuvent être utilisées pour contrôler à la fois l'abondance et les variations du niveau d'activité des populations microbiennes naturelles. 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)... [15]. La figure II-4 illustre quelques exemples de capteur sous-marins: un capteur statique (Aquaflecks), un capteur mobile (Amour AUV) et un capteur mobile (Starbug AUV) [16].



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



b) Nœud mobile (Starbug AUV)

**Figure II-4** Exemples des capteurs sous-marins [16]

## IV Différentes techniques de communication sans fil aquatique

La demande de disposer des systèmes de communications sans fil aquatique pour des applications scientifique, industrielle et militaire se révèle sans cesse croissante. Pour répondre à cette demande, trois techniques de transmission radio, optique et acoustique, sont mises en œuvre.

### IV.1 Communication par onde radio

Les normes de transmission sans fil dans le milieu aérien, utilisent des ondes électromagnétiques qui atteignent le domaine des gigahertz (GHz), citons l'exemple des normes: Wi-Fi, Bluetooth, Home RF qui opèrent dans la bande ISM (2.4 GHz et 5 GHz). Cependant, ces normes utilisées dans l'air libre sont inutilisables sous l'eau. L'atténuation dans l'eau pour les hautes fréquences s'avère extrêmement élevée. Par exemple, l'atténuation dans le cas de la norme Bluetooth (de 2.4 GHz) arrive à 1695 dB/mètre dans la mer et à 189 dB/mètre dans l'eau fraîche. Cette atténuation dépend fortement de la conductivité électrique du milieu, qui est de  $4 \Omega^{-1}/m$  dans l'eau de mer et de  $0.05 \Omega^{-1}/m$  dans l'eau fraîche [17]. Ainsi, les rayonnements électromagnétiques ne pénètrent pas le milieu marin au-delà de quelques dizaines de mètres dans le meilleur des cas. L'utilisation de haute fréquence dans le domaine des télécommunications est justifiée par deux avantages principaux à savoir l'augmentations du débit et la réduction des antennes d'émission/réception (la taille des antennes est proportionnelle à la longueur d'onde  $\lambda$  et donc inversement proportionnelle à la fréquence,  $\lambda = c/f$ ). Pour les très basses fréquences (30 à 300 Hz), l'atténuation est réduite,

mais la propagation de l'onde électromagnétique sur de longues distances nécessite alors des antennes d'émission-réception de grande taille et des puissances d'émission élevées par rapport à la dimension et au niveau d'énergie d'un nœud capteur [18].

#### **IV.2 Communication par l'onde optique**

Parmi les moyens de communication les plus utilisés on peut trouver les ondes optiques (lumière visible, l'infrarouge et le laser). L'utilisation de ce type d'ondes en milieu marin, ne pose pas le problème d'atténuation du signal, mais c'est le phénomène de la dispersion qui constitue le principal inconvénient de la propagation de la lumière dans l'eau. Ce problème de dispersion exige du nœud en émission une précision élevée de visée [19], ce qui est impossible à garantir, car les capteurs sont souvent mobiles dans l'eau et les positions relatives de l'un par rapport à l'autre ne sont pas figées. D'autre part, l'inhomogénéité du milieu, la variation de l'indice de réfraction et la présence des obstacles et de micro-organismes marins constituent un handicap devant la propagation de l'onde optique [17].

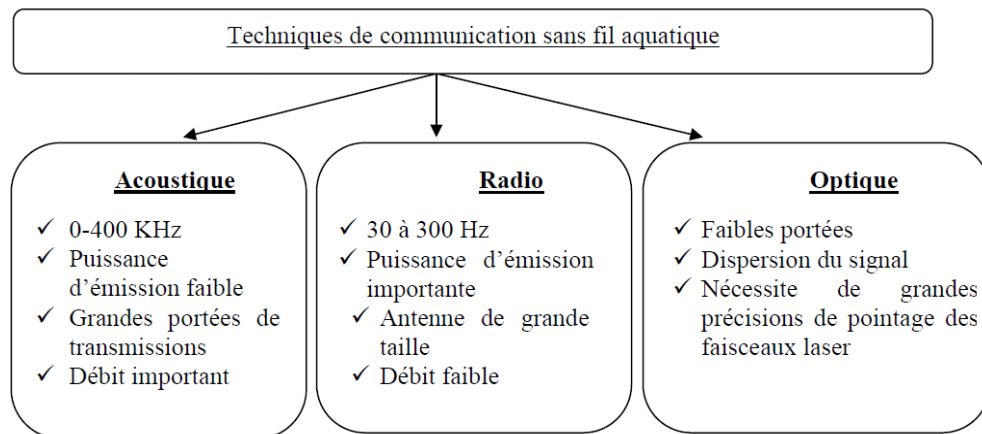
#### **IV.3 Communication par l'onde acoustique**

Les systèmes de communication aquatique sans fil utilisent l'onde acoustique comme principal support physique de transmission de l'information dans l'eau, contrairement à la communication sans fil dans l'espace libre (l'air) qui est basée sur les ondes électromagnétiques. Cela est dû aux meilleures performances que présente l'onde acoustique dans le milieu marin, comparées aux autres types d'ondes (optiques et électromagnétiques) [20,21]. En effet, les océans sont presque opaques à la lumière et aux ondes radioélectriques et transparents aux ondes sonores. Par exemple, pour une longueur d'onde d'un mètre, l'eau est près d'un million de fois plus transparent au son qu'aux ondes radioélectriques. En effet, les ondes acoustiques sont largement utilisées dans les communications sous-marines [22] pour la commande, la poursuite et la localisation des sous-marins, ainsi que la communication avec les côtes. La technologie employée consiste à délivrer les données numériques via un modem utilisant les ondes acoustiques.

#### **IV.4 Comparaison des techniques de communication sans fil aquatique**

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 [23]. 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. La figure II-5 récapitule les caractéristiques de chacune de ces techniques de communication sans fil pour des applications aquatiques.



**Figure II-5** Caractéristiques des techniques de communication sans fil aquatique

Le coût d'intervention pour remplacement et recharge des batteries en milieu marin est très élevé. Cette contrainte nous amène à donner une grande considération aux problèmes d'autonomie énergétique et à la durée de vie des batteries des nœuds communicants. L'autonomie énergétique ne peut pas être assurée à 100%, car 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. Les architectures à faible consommation d'énergie restent le moyen efficace pour l'autonomie de tout système de communication sans fil acoustique en milieu marin.

Le spectre fréquentiel ou la bande passante disponible pour le canal acoustique aquatique est très limitée par rapport au canal radio. La fréquence et la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau ont une grande influence sur la portée de transmission. Dans le canal aquatique, la vitesse de propagation est cinq fois plus petite qu'en milieu aérien. Aussi. La vitesse de propagation dépend de plusieurs paramètres du milieu marin (la pression, la composition de l'eau et la température) [24].

La communication acoustique sous-marine est caractérisée par :



- un délai de propagation élevé,
- une mobilité importante des nœuds flottants,
- et une capacité du lien acoustique limitée [25].

Les différences principales entre un système de communication sans fil sous-marin et aérien sont résumées sur le Tableau II-1 [26].

	Aquatique	Dans l'air	
		Radio	optique
Type d'onde	acoustique	électromagnétique	optique
Vitesse de propagation	1500 ms <sup>-1</sup>	3.10 <sup>8</sup> ms <sup>-1</sup>	3.10 <sup>8</sup> ms <sup>-1</sup>
Bande de fréquence	0-400 kHz	20 kHz-300 GHz	193.10 <sup>12</sup> -435. 10 <sup>12</sup> Hz
Coût de récupération des systèmes de communications	importante	faible	
Complexité de récepteur	plus complexe pour limiter l'effet du canal aquatique (effet de multi trajet et évanouissement)	moins complexe que le récepteur aquatique	n'est pas complexe (pas de multi trajet et d'évanouissement)
Type de modulation	M-PSK; M-FSK	M-QAM; M-PSK; M-FSK...	
Débit	faible (capacité de lien acoustique faible)	important (jusqu'à 100 Mbits pour une liaison RF et jusqu'à 10 Gbits pour une liaison optique)	
Délai de propagation	élevé	faible	
Portée de transmission	importante	importante	moyenne
Transducteur	piézoélectrique	électromagnétique	opto-électrique

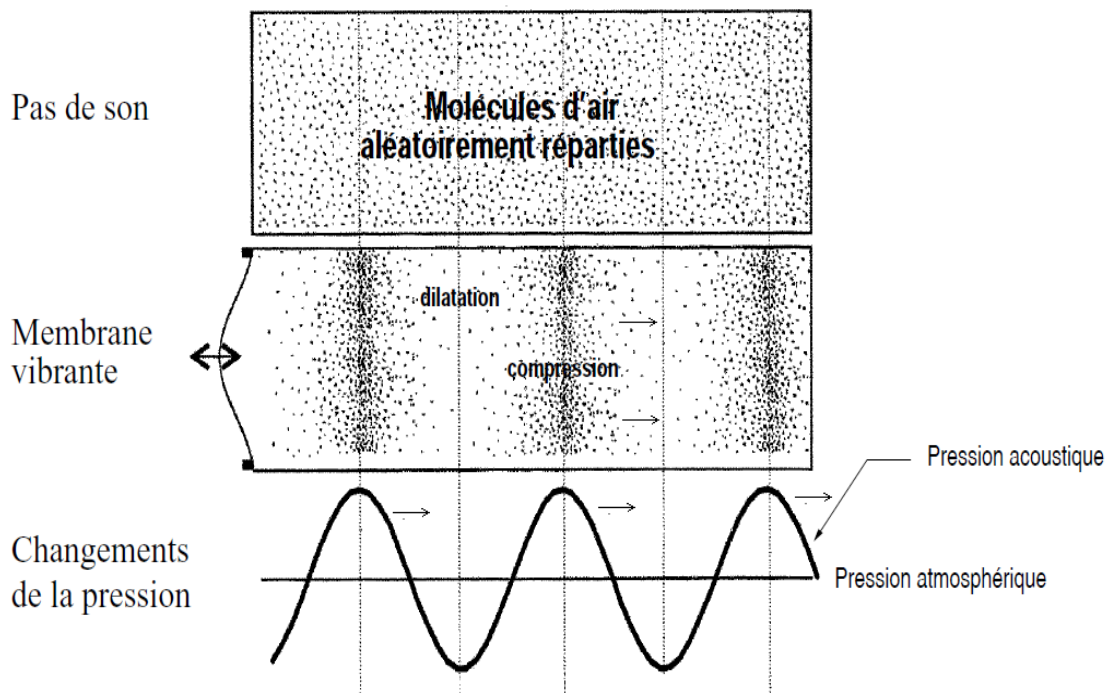
**Tableau II-1** Comparaison entre les systèmes de communication sans fil dans l'air et dans le milieu marin.

Cette étude comparative présentée dans le tableau II-1, montre que pour réaliser un système de communication sans fil fiable et adapté aux contraintes du milieu aquatique, la transmission acoustique est la solution la plus optimale.

## V Propagation sonore en milieu marin

### V.1 Principe de propagation du son

Dans un milieu physique (solide, liquide ou gazeux), le son se propage à l'image de déplacement d'une vague sur la surface de l'eau. Étant donné que tout le milieu physique selon la vision atomiste est constitué par un ensemble de particules (atomes ou molécules). À l'équilibre, ces particules sont uniformément réparties et l'inter distance est élastique. Lorsqu'une perturbation mécanique (source sonore) est produite dans une zone, elle engendre un déséquilibre de pression (ou de répartition). Les particules en contact avec cette perturbation oscillent et transmettent la perturbation à leurs voisines. Ce déséquilibre de pression se propage donc à une certaine vitesse qui dépend des caractéristiques physiques du milieu. À l'opposé des ondes électromagnétiques (lumière, les ondes radio, etc.) qui peuvent se propager dans le vide, l'onde sonore ne se propage que dans un milieu physique (matière). La figure II-6 décrit la répartition des molécules d'air en fonction de la présence d'une onde acoustique.



**Figure II-6** Caractéristiques Variation de la répartition des molécules à la présence d'une onde sonore

La différence entre la pression du milieu au repos et sa pression instantanée est nommée 'la pression acoustique', elle est exprimée en  $N.m^{-2}$ . Cette grandeur est une caractéristique essentielle de l'onde acoustique, car c'est sur sa base qu'on choisit la sensibilité des récepteurs. Le champ sonore est une distribution spatio-temporelle correspondant aux variations de la pression acoustique dans le milieu. Le tableau II-2 décrit les propriétés d'une onde acoustique [27].

Propriétés	
Type	Mécanique
Célérité	$340ms^{-1}$ (air)
	$1500ms^{-1}$ (eau)
	$1000ms^{-1}$ (métal)
Fréquences	0 à 20 Hz (infrasons)
	20 Hz à 20 kHz (Sons audibles)
	20 kHz à 1 GHz (Ultrasons)
	> 1 GHz (Hypersons)

**Tableau II-2** Propriétés physiques d'une onde acoustique

## V.2 Caractéristiques de l'onde acoustique sous-marine

L'onde acoustique sous-marine est caractérisée par plusieurs paramètres, dont les principaux sont:

- sa célérité  $V$  (environ 1500 m/s en surface),
- sa pression  $P$  en pascal ( $N/m^2$ ),
- sa fréquence  $f$ ,
- sa puissance  $P_s$  en (W),
- et en fin, son intensité  $I$  en ( $W/m^2$ ).

La célérité de l'onde acoustique  $V$  est d'environ 1500 m/s à la surface de l'eau et elle représente la vitesse de propagation de la variation de pression dans le milieu. En effet, elle est très faible par rapport à la célérité des ondes électromagnétiques dans les canaux radios (de

l'ordre de  $3.10^8$  m/s). La valeur de la célérité est donnée en fonction des différents paramètres du milieu par la relation simplifiée suivante [28] :

$$V = 1449,2 + 4,6T - 0,55T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016Z \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V : la célérité en m/s.

T : la température en C°.

S : la salinité (en fraction pour 1000 : ‰).

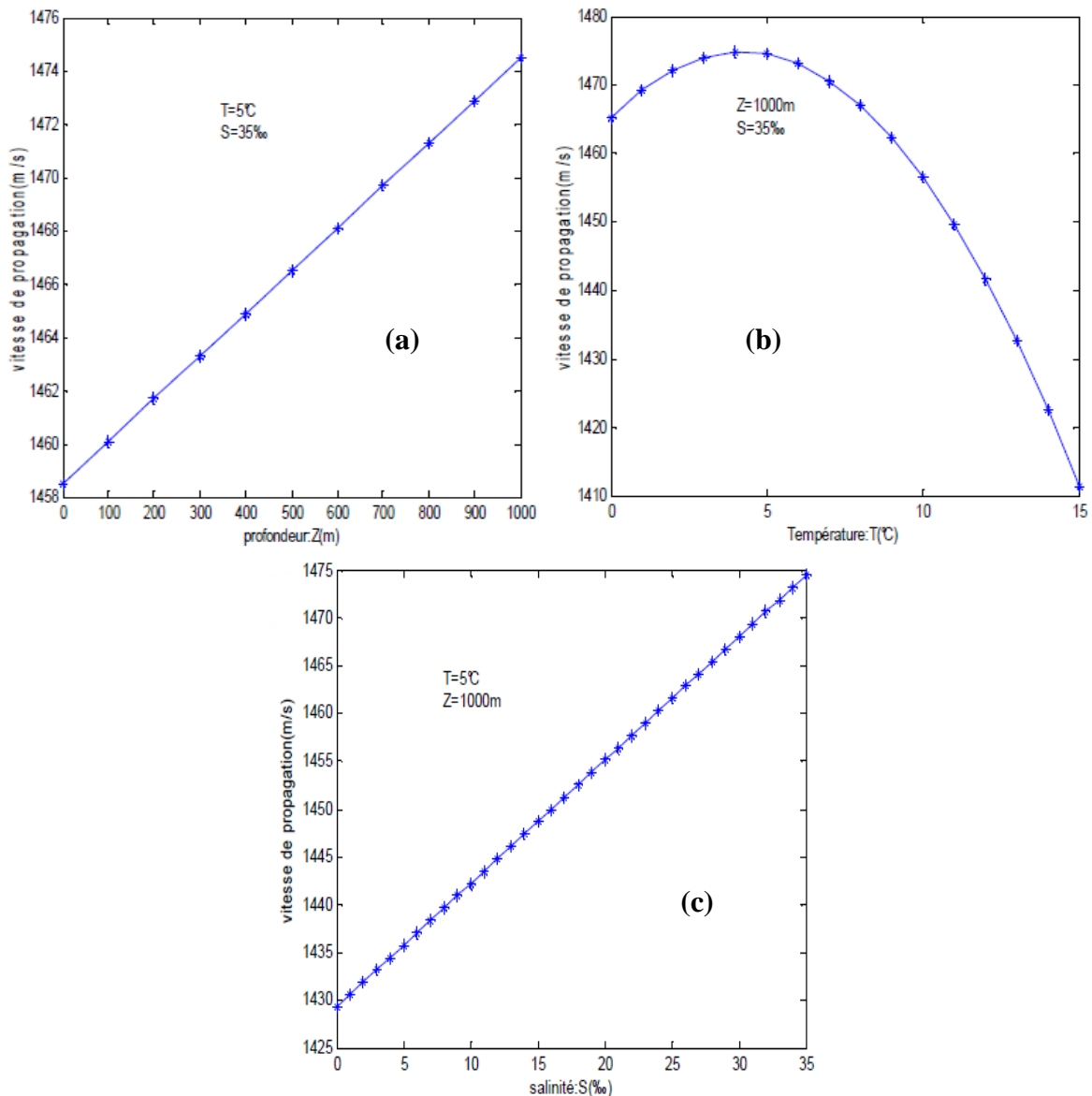
Z : la profondeur en mètre.

Cette relation de célérité est valable pour les conditions suivantes, température  $0 \leq T \leq 35$  °C, salinité  $0 \leq S \leq 45$  ‰ et profondeur  $0 \leq Z \leq 1000$  m.

Ces paramètres cités précédemment influent d'une manière locale et simultanée sur la célérité en un point donné. La relation (II.1) montre la faible influence des variations de salinité, de la température dans la couche supérieure ainsi que de la pression en profondeur. La variation de la célérité dans le plan horizontal n'est pas toujours négligeable, car les paramètres ne sont pas tous dépendants de la profondeur.

A partir de la relation (II.1), si on choisit de fixer deux paramètres et de varier le troisième, on déduira que la célérité de l'onde acoustique est une fonction linéaire de la profondeur (jusqu'à 1000 m) et donc de la pression, on déduira également qu'elle est linéaire en fonction de la salinité. Elle atteint un maximum pour une température qui frôle les 5°C. Ces trois paramètres (température, salinité, pression) varient en fonction de la profondeur. Dans plusieurs applications pratiques, il est plus adéquat d'utiliser la vitesse maximale 1500 m/s [29] ce qui correspond à une profondeur de 1000 et une température de l'ordre de 5°C.

La figure II-7 montre les variations de la célérité du son en fonction respectivement de la profondeur, de la température et de la salinité.



**Figure II-7** Évolution de la vitesse de propagation de l'onde acoustique en milieu marin en fonction de la profondeur (a), de la température (b) et de la salinité(c)

## VI Différence entre RCSF et RCSF-SM

Un réseau de capteurs sans fil sous-marin est un réseau de capteurs particulier, il existe plusieurs points de divergences entre ce type de réseaux et les réseaux de capteurs terrestres [30]. Les différences entre eux 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 les 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 à l'utilisation des émetteurs-récepteurs plus complexes.
- **Déploiement:** Les réseaux terrestres sont densément déployés, alors que dans les réseaux sous-marins le déploiement est moins dense en raison des défis impliqués dans le déploiement lui-même et le coût aussi impliqué des équipements.
- **Puissance:** Dans les réseaux terrestres, en raison des longues distances de communication, le type de support utilisé pour la communication, les techniques de traitement du signal impliquées dans les émetteurs-récepteurs, la puissance nécessaire est de plus en plus complexe par rapport aux réseaux de capteurs terrestres.
- **Mobilité du Nœud:** La mobilité des nœuds de réseaux terrestre peut être prédite alors que dans les réseaux sous-marins la prédiction de la mobilité du nœud est difficile, en raison de la densité et la variation de débit de l'eau.
- **Mémoire :** Les capteurs sous-marins ont besoin d'avoir une grande capacité de stockage par rapport aux capteurs terrestres comme le canal sous-marin est intermittent.
- **Corrélation spatiale:** Les lectures prises par les réseaux des capteurs terrestres sont souvent corrélées, mais ce n'est pas le cas dans les réseaux sous-marins puisque la distance est plus grande entre les capteurs.

## VII Contraintes des RCSF-SMs

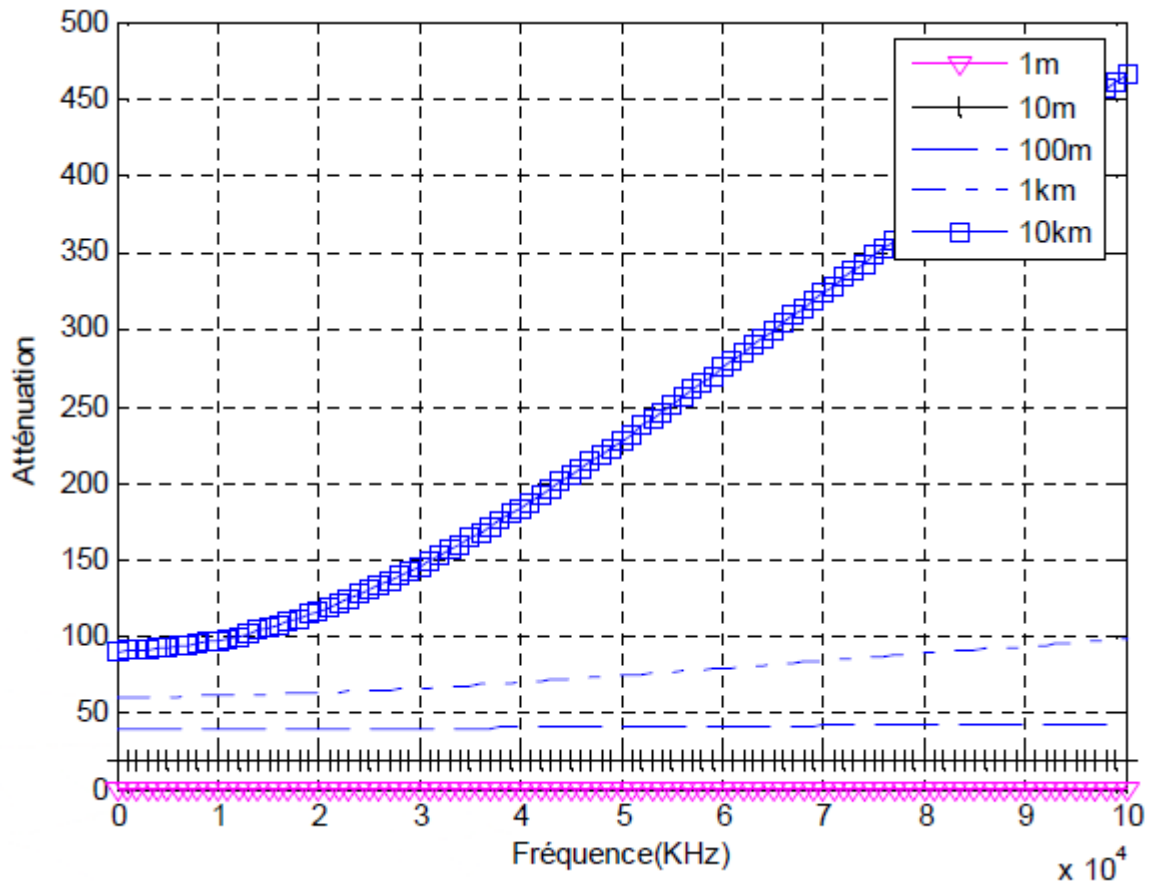
### VII.1 Pertes et limitation de la bande passante

Il existe deux types de pertes qui dégradent la puissance de l'onde acoustique au cours de sa propagation, à savoir les pertes par divergence géométrique et les pertes par absorption [31]. Ces dernières dépendent de la fréquence de transmission et de la salinité du milieu. La présence des sédiments, des bulles d'air, des micro-organismes et d'autres matières mélangées à l'eau participent aussi dans l'augmentation des pertes par absorption. Dans ces conditions, la portée de transmission peut être réduite à quelques mètres. Le canal aquatique a une bande

passante qui dépend de la fréquence et de la portée de transmission. Un signal acoustique de courte portée (quelques dizaines de mètres) peut atteindre quelques dizaines de kilobits par seconde, alors qu'un signal acoustique de longue portée (quelques dizaines de kilomètres) ne peut avoir qu'un débit de quelques dizaines de bits par seconde. La fréquence utilisée dans la plupart des systèmes acoustiques est choisie dans la gamme où on a le minimum de pertes par absorption. Dans les applications pratiques, les systèmes acoustiques opèrent à des fréquences inférieures à 30 kHz, car au-delà de cette limite l'effet de l'absorption devient extrêmement excessif [32] [29]. La figure II-8, montre qu'à distance fixe, le choix de la fréquence d'émission du signal influe fortement sur les pertes de transmission en milieu aquatique. Selon la loi de Shannon pour les transmissions sans fil, une variation de la fréquence d'émission se traduit par une variation du débit binaire sur le canal. Pour le cas des systèmes de communications sans fil aquatiques, cette loi est confirmée par Proakis et Baldo [33] [34] et elle est exprimée par la relation suivante :

$$C = \int_{f_l}^{f_r} \log_2 \left( 1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df \quad (\text{II.2})$$

Où C est le débit maximal possible sur le canal, appelé la capacité maximale du canal et exprimé en bit/s.  $f_r$  et  $f_l$  (en Hz) sont les deux bornes de fréquences inférieure et supérieure de la bande passante du canal aquatique. S représente la puissance du signal et N représente la puissance du bruit acoustique aquatique. Cette relation montre le lien qui existe entre le débit possible sur un canal, la bande de fréquences allouée à ce canal et le rapport signal sur bruit SNR. Les courbes de la figure II-8 montrent la variation de l'atténuation en fonction de la fréquence et la distance de communication.

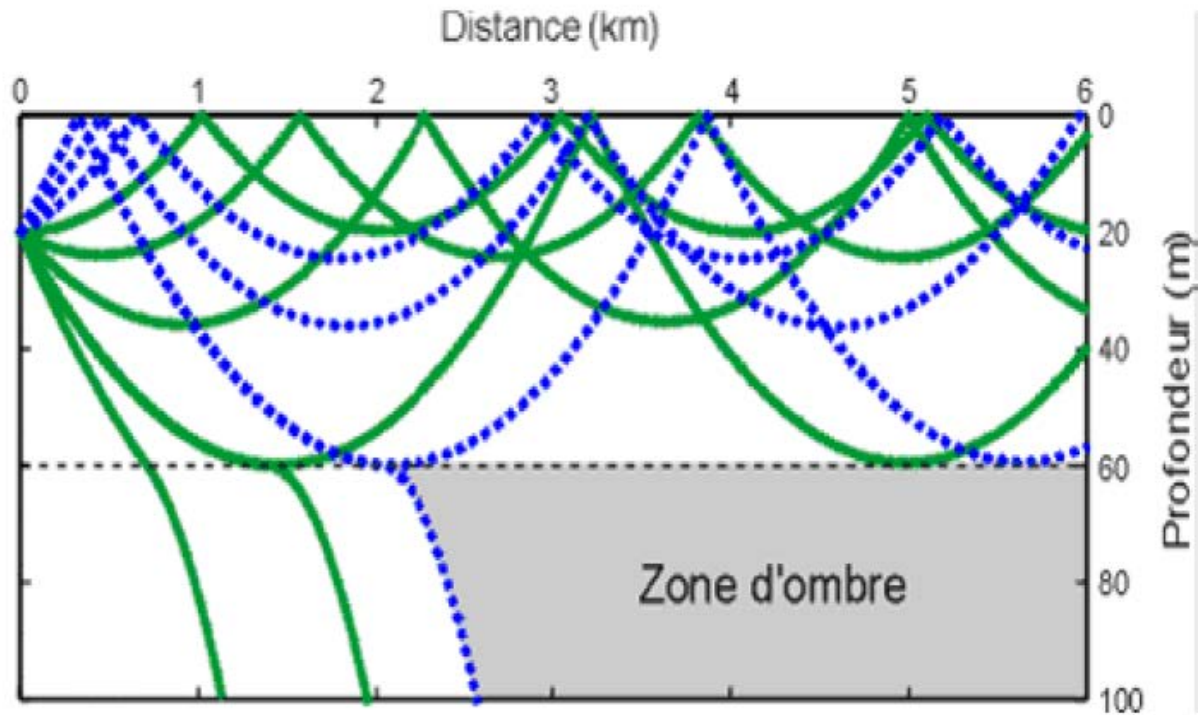


**Figure II-8** Atténuation en fonction de la fréquence d'émission du signal pour différente portée de transmission

## VII.2 Phénomène de multi trajets

Dans les systèmes de communication sans fil aquatique, la vitesse de propagation est en fonction des caractéristiques du canal, du temps et de la position de l'émetteur et du récepteur ; ce qui engendre une variation du chemin de propagation. Il en résulte alors une multitude de signaux à la réception via des trajets multiples (figure II-9). La propagation multi-trajets peut être responsable d'une importante dégradation du signal de communication acoustique puisqu'elle cause d'énorme interférence inter- symboles à la réception [29].





**Figure II-9** Diagramme typique montrant les multi trajets d'une onde acoustique [35]

### VII.3 Bruit acoustique

La capacité de détection d'un signal ne dépend pas uniquement de l'amplitude du signal, mais aussi du bruit qui le perturbe. Par conséquent, les sources de bruit doivent être connues. Les bruits acoustiques dans l'océan sont très divers, du bruit ambiant lié à l'hydrodynamique (mouvement de l'eau y compris les marées, le déferlement des vagues, les courants d'eau, les tempêtes, le vent, les pluies...) aux bruits des phénomènes sismiques et biologiques, jusqu'aux bruits d'origine humaine. À basses fréquences (0.1-10 Hz), le bruit ambiant est principalement dû aux tremblements de terre, éruptions volcaniques sous-marines, tempêtes, turbulence d'eau et mouvement des vagues. Dans la bande de fréquences (10, 100 Hz), ce bruit est causé par le trafic des navires, alors que pour des fréquences comprises entre 100 Hz et 50 kHz, les sources des bruits sont le vent et les bulles d'air. À hautes fréquences ( $f > 100$  kHz), ce sont les phénomènes d'agitations thermiques moléculaires qui dominent. Ce bruit peut être décrit par un spectre continu, comme étant un bruit gaussien contrairement au bruit d'origine humaine qui est causé par la machinerie (pompes, centrales électriques..) et les activités marines [36]. D'une manière générale, le bruit d'origine humaine, spécialement des activités marines a une grande influence en surface de l'eau [29]. La figure II-10 résume la variation de la puissance spectrale de différents bruits acoustiques en fonction de la fréquence.

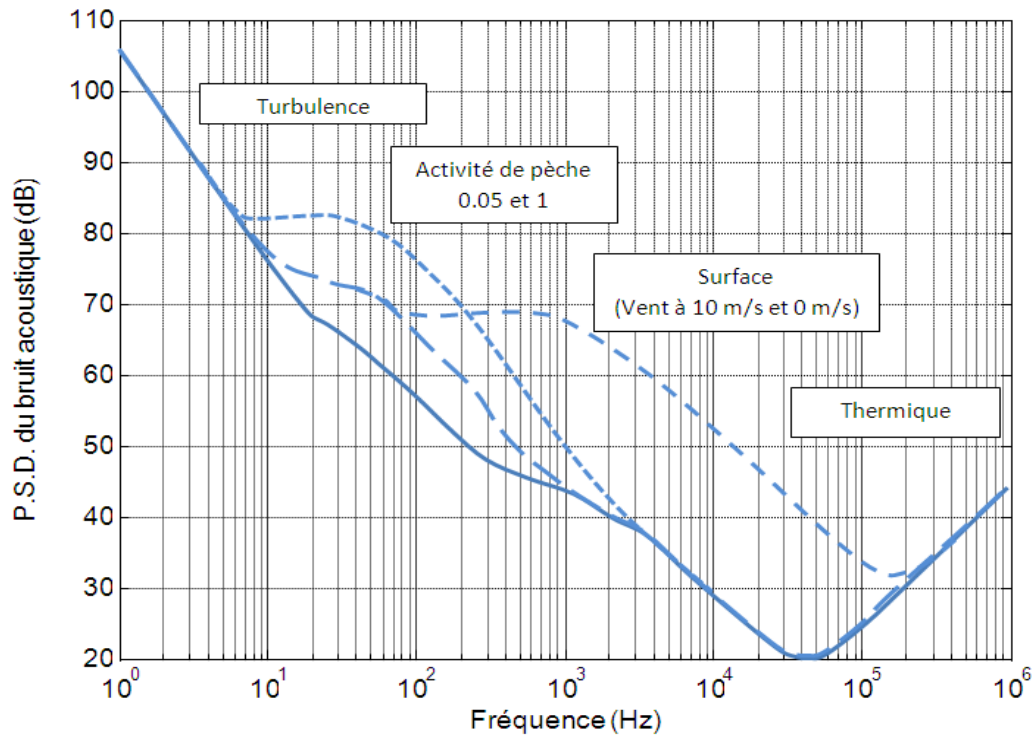


Figure II-10 Types de bruits acoustiques en milieu marin [37]

#### VII.4 Effet Doppler

Dans le cas d'un système sans fil, le mouvement relatif entre le récepteur et l'émetteur peut causer l'effet Doppler qui se traduit par un décalage de la fréquence du signal reçu tel que [38]:

$$\Delta f = \text{Décalage doppler} = f_0 \times \frac{\Delta v}{v} \times \cos \Psi \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$f_0$  : la fréquence du signal transmis.

$\Delta v$  : vitesse relative de l'émetteur par rapport au récepteur.

$\Psi$  : angle entre le signal reçu et la direction du vecteur vitesse.

Ce phénomène affecte le signal pour des émissions à courtes portées et à hautes fréquences ; alors qu'à faibles fréquences, l'effet Doppler est moins intense.

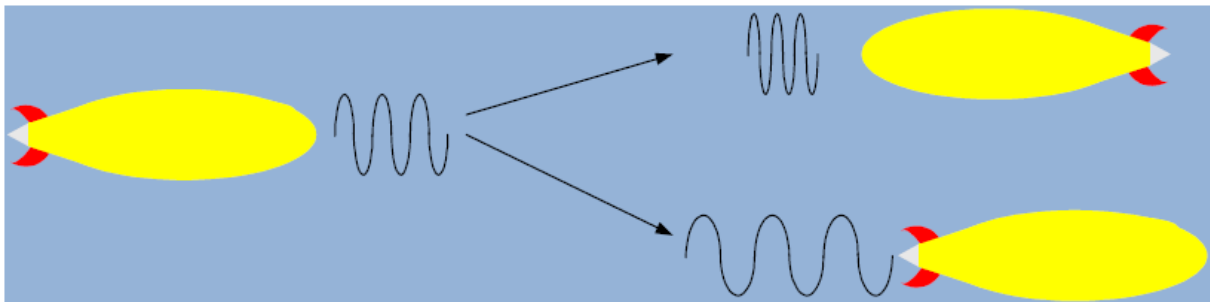


Figure II-11 Effet Doppler sur un signal transmis

La variation de la longueur d'onde est égale à la distance parcourue par la source pendant une période. Comme  $\lambda' = \lambda \pm V / f$  donc  $f' = V / (\lambda \pm V / f)$  donc une diminution de  $\lambda$  se traduit par une augmentation de  $f'$  et inversement. Le véhicule sous-marin en opposition par rapport à la source entend un son plus aigu que le véhicule circulant dans la même direction que le véhicule source (figure II-11).

### VII.5 Consommation d'énergie

La difficulté de profiter de l'énergie solaire en milieu aquatique fait partie des principaux challenges à surmonter. En effet, la limitation en puissance des systèmes aquatiques et les difficultés rencontrées lors du changement des batteries incitent à rechercher des solutions qui réduisent la consommation d'énergie.

### VII.6 Coût d'un capteur sous-marin

Contrairement aux réseaux de capteurs sans fil terrestres, où l'expérimentation est relativement accessible et abordable, le matériel sous-marin est coûteux (un nœud étanche complètement à l'eau peut coûter plus de 1000 \$ US), le déploiement de ses nœuds est de plus en plus coûteux (tests dans une piscine publique peuvent coûter 40 \$ US / heure en raison à la présence obligatoire d'un maître-nageur [14], le déploiement dans des mers profondes peut facilement coûter des dizaines de milliers de dollars par jour), donc des solutions alternatives sont importantes. Il est également nécessaire de faire des essais reproductibles, rapides et contrôlés sur une large gamme de conditions.

## VIII Applications des RCSF-SMs

- **L'échantillonnage dans l'océan**

Les capteurs sous-marins et les AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) ont la capacité synoptique d'effectuer, l'échantillonnage coopératif et adaptatif à l'environnement marin côtier à trois dimensions afin de construire des bases de données géologiques et biologiques [39].

- **Surveillance de l'environnement**

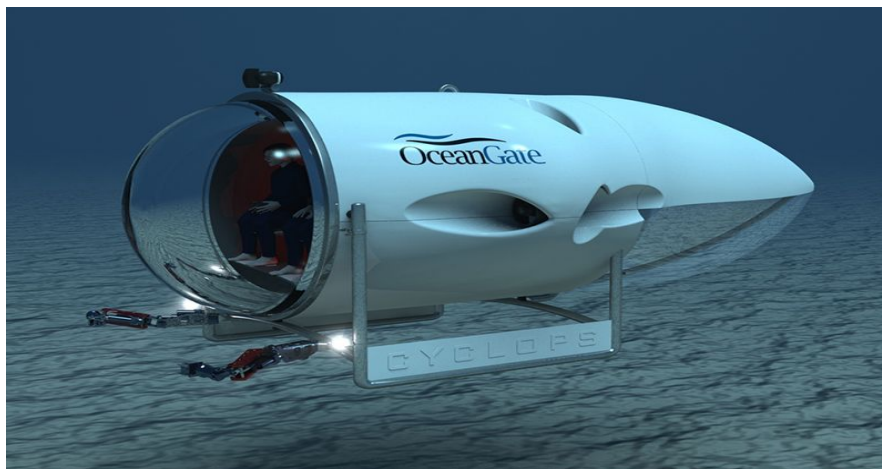
Les réseaux de capteurs sous-marins permettent le suivi de différents types de pollution (chimique, biologique et nucléaire), la surveillance des courants marins et les vents, les prévisions météo, la détection des changements climatiques, la compréhension et la prévision de l'effet des activités humaines sur les écosystèmes marins et la surveillance biologique telles que le suivi de l'activité biologique marine ou l'industrie de l'aquaculture (figure II-12).



**Figure II-12** Station de surveillance climatique (ARC CLIMATE)

- **Explorations sous-marines**

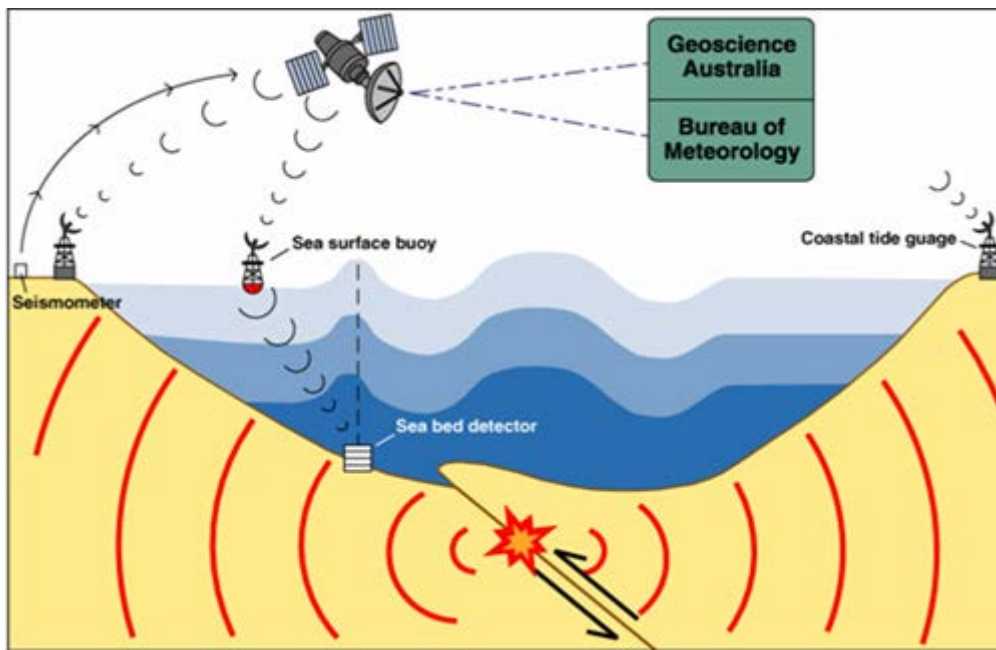
Les réseaux de capteurs sous-marins peuvent aider à détecter les réservoirs de pétrole sous-marins, la détermination des routes pour la pose de câbles sous-marins, et l'exploration des minéraux précieux (figure II-13). En outre, ils peuvent être utilisés pour l'archéologie sous-marine et la recherche des épaves.



**Figure II-13** Exploration des fonds marins avec l'AUV Cyclops.

- **La prévention des catastrophes**

Les réseaux de capteurs sous-marins ont la capacité de mesurer l'activité sismique à distance et cela permet de fournir des alertes au tsunami pour les zones côtières, [40] et aussi d'étudier les effets des tremblements de mer (seaquakes) (figure II-14).



**Figure II-14** Système australien d'alerte au tsunami

- **La navigation assistée**

Les capteurs sous-marins peuvent être utilisés aussi pour identifier les dangers sur le fond marin, localiser les roches dangereuses dans les eaux peu profondes, les positions d'amarrage, la localisation des épaves immergées.

- **La surveillance tactique Distribuée**

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

## **IX Les différentes architectures de communication dans les RCSF-SMs**

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

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

Une architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins bidimensionnels (2D) est montrée dans la figure II-15. On y trouve, des groupes de capteurs (Clusters) ancrés au fond de l'océan, où les nœuds sont reliés à des puits (station de base sous-marine) par l'intermédiaire de liaisons acoustiques sans fil. Les stations de base sous-marines sont des dispositifs permettant de relayer des données en provenance du fond de l'océan à une station de surface.

Pour atteindre cet objectif, les stations de base sous-marines sont équipées de deux émetteurs-récepteurs acoustiques, à savoir un émetteur-récepteur vertical et un autre horizontal. L'émetteur-récepteur horizontal est utilisé par la station de base sous-marine pour communiquer avec les capteurs afin de:

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

Le lien vertical est utilisé par la station de base sous-marine pour transmettre des données à une station de surface. La station de surface est équipée d'un émetteur-récepteur acoustique capable de gérer plusieurs communications en parallèle selon les stations de base sous-marines déployées.

Les capteurs peuvent être connectés aux stations de base sous-marines via des liens directs ou par l'intermédiaire de chemins multi-sauts.

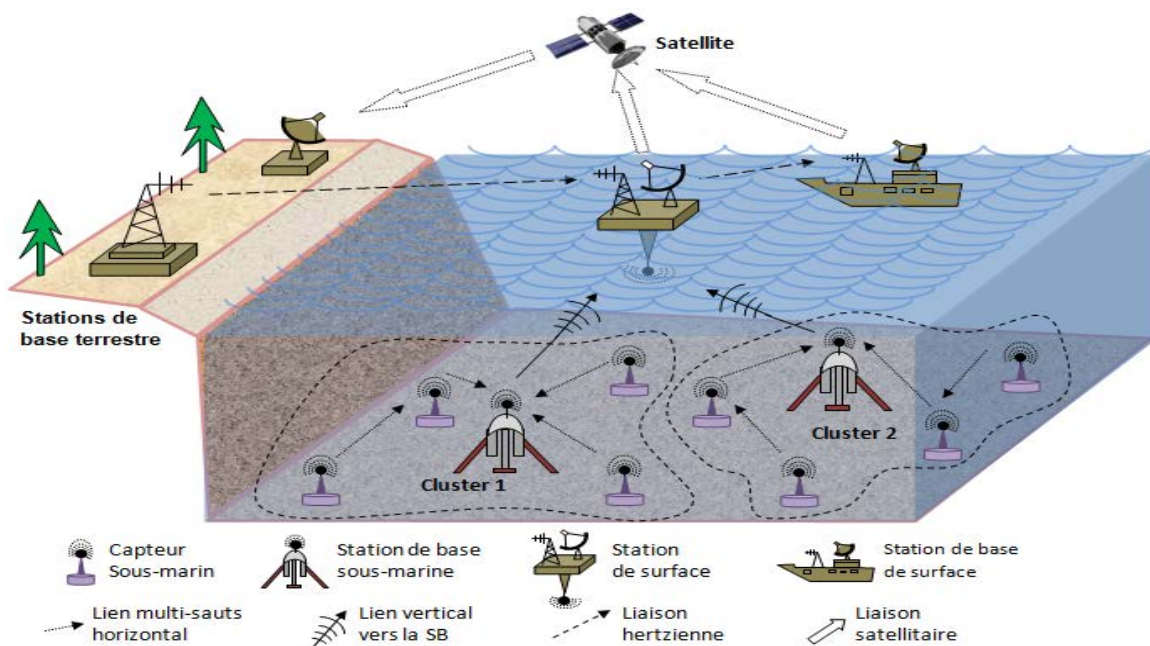


Figure II-15 Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 2D.

## IX.2 Les réseaux de capteur sous-marins en trois dimensions (3D)

Les réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions (3D) sont utilisés pour détecter et observer des phénomènes ne pouvant pas être correctement observés à l'aide des nœuds ancrés sur le fond océanique. Dans ce cas, le prélèvement coopératif de l'environnement marin en 3D est nécessaire. Les réseaux de capteurs sous-marins en trois dimensions, utilisent des capteurs flottants à différentes profondeurs afin d'observer un phénomène donné.

Une solution possible serait de fixer chaque nœud à une bouée de surface, au moyen de fils dont la longueur peut être réglée de façon à ajuster la profondeur de chaque capteur [41]. Cependant, bien que cette solution permette un déploiement facile et rapide du réseau de capteurs, multiples bouées flottantes peuvent entraver les navires qui circulent sur la surface, ou ils peuvent être facilement détectés et désactivés par des ennemis dans le cas des applications militaires. En outre, des bouées flottantes sont vulnérables aux conditions météorologiques et à la falsification. Pour ces raisons, une approche différente est proposée. Dans l'architecture, représentée sur la figure II-16, chaque capteur est ancré au fond de l'océan et équipé d'une bouée flottante qui peut être gonflée par une pompe. La bouée tire le capteur vers la surface de l'océan. La profondeur du capteur peut alors être réglée en ajustant la longueur du fil reliant le capteur à l'ancrage, au moyen d'un moteur à commande électronique qui réside sur le capteur. Un défi à relever dans une telle architecture est l'effet des courants océaniques sur le mécanisme qui régule la profondeur des capteurs.

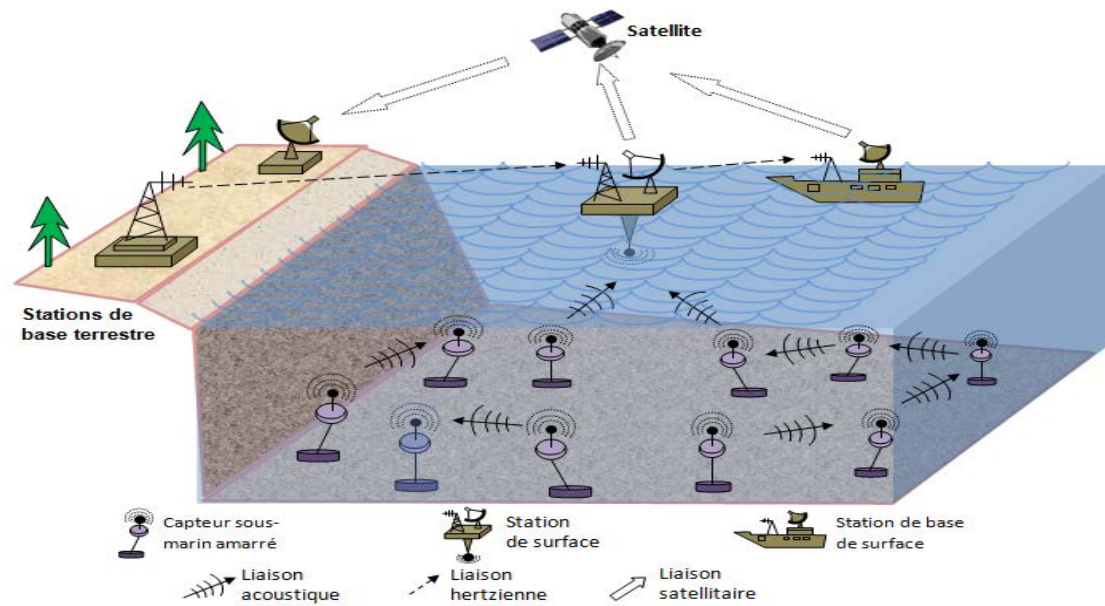
De nombreux défis restent posés avec une telle architecture, et doivent être résolus afin de permettre le suivi 3D, y compris:

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



**Figure II-16** Architecture pour les réseaux de capteurs sous-marins 3D.

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

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. Des travaux expérimentaux ont montré la faisabilité relativement peu coûteuse des AUVs sous-marins (figure II-17) équipés de plusieurs capteurs sous-marins pouvant atteindre n'importe quelle profondeur dans l'océan [42]. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour renforcer les capacités des réseaux de capteurs sous-marins.

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

- **Échantillonnage adaptatif**

Cela inclut les stratégies de contrôle pour commander les véhicules mobiles à des endroits où leurs données seront les plus utiles. Cette approche est également connue sous le nom d'échantillonnage adaptatif et a été proposée à des missions de surveillance innovantes [43]. 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**

Cela comprend les procédures de contrôle pour détecter automatiquement les trous de connectivité en raison de défaillances de nœuds ou l'atténuation du canal et demander



l'intervention d'un AUV. En outre, un AUV peut être utilisé pour l'installation et l'entretien de l'infrastructure de réseau de capteurs ou le déploiement de nouveaux capteurs. Il peut également être utilisé en tant que nœud relais temporaire pour rétablir la connexion.

Les systèmes d'énergie solaire permettront d'augmenter la durée de vie des AUVs, c'est à dire, il n'est pas nécessaire de les récupérer et les recharger sur une base quotidienne. Par conséquent, les AUVs alimentés par l'énergie solaire peuvent obtenir des informations en continu pendant des périodes de temps de l'ordre de plusieurs mois [44].

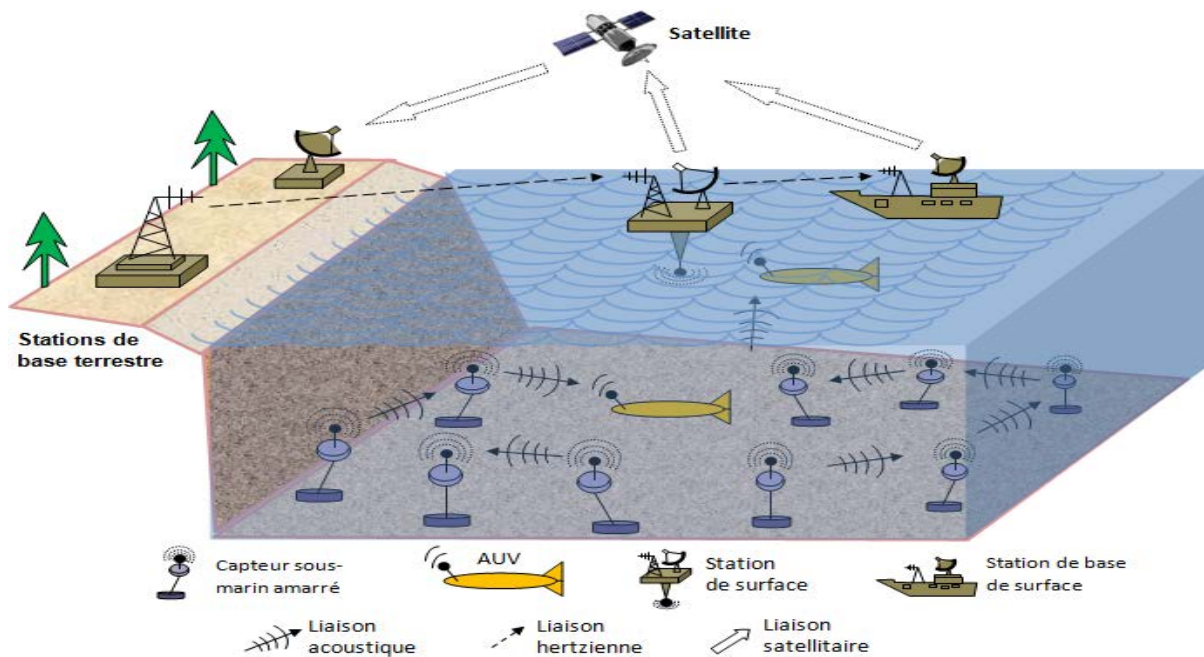


Figure II-17 Les réseaux de capteurs autonomes avec véhicules sous-marins

## X Différentes problématiques de recherche dans les RCSF-SMs

### X.1 Routage efficace dans les RCSF-SMs

La turbulence de l'eau, les courants maritimes et le mouvement des navires peuvent conduire à une discontinuité de connectivité du réseau. Il peut y avoir des circonstances où aucun chemin de connexion n'existe entre la source et la destination. Cette situation conflictuelle peut être résolue grâce à des protocoles de routage robuste.

Il existe de nombreux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs terrestres, conçus principalement pour des réseaux statiques et utilisent généralement des requêtes d'inondations comme une technique puissante pour découvrir les chemins de transmission des données. Dans les réseaux de capteurs sous-marins, les capteurs sont de plus en plus mobiles. Ainsi les protocoles de routage conçus pour les RCSFs sont déployés dans un environnement

à deux dimensions, par contre l'environnement aquatique est à trois dimensions. Par conséquent, les protocoles de routage dédiés aux RCSFs ne peuvent pas être applicables directement aux RCSF-SMs. Une direction de recherche possible est de concevoir un protocole de routage performant en termes de minimisation de la consommation de l'énergie, du choix des routes optimales pour l'acheminement de l'information d'un capteur à la station de base et vice versa, de réduction du délai de délivrance des paquets, ...etc. Ainsi le réseau doit passer à l'échelle sans que ses performances se dégradent.

## **X.2 Sécurité et robustesse des RCSF-SMs**

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, les réseaux de capteurs sans fil sous-marins ont un intérêt particulier pour les applications militaires, environnementales, et bien sûr les applications liées à l'industrie. La conception de ces applications suppose que tous les nœuds engagés sont coopératifs et dignes de confiance. Cependant, ceci n'est pas le cas dans les déploiements du monde réel, où les nœuds sont exposés à différents types d'attaques qui peuvent carrément endommager le bon fonctionnement du réseau. Ces attaques exploitent essentiellement l'incertitude du canal de communication et le déploiement aléatoire des nœuds capteurs dans des zones difficiles à surveiller. Garantir la sécurité de ce type de réseau est une tâche difficile, surtout quand les nœuds sont constitués d'appareils électroniques peu onéreux avec des capacités matérielles limitées. Le cas échéant, utiliser des protections physiques est, dans beaucoup de situations, quasiment impraticable. Capturer des nœuds est alors une possibilité intéressante pour les attaquants.

Les attaques qui menacent les RCSF-SMs sont pratiquement similaires aux réseaux de capteurs terrestres. Cependant, les mêmes contre-mesures ne peuvent être applicables directement aux RCSF-SMs en raison des caractéristiques différentes entre les RCSFs et les RCSF-SMs telles que: le délai de propagation élevée, la faible bande passante, la difficulté de recharger les batteries de capteurs sous-marins, et la grande mobilité des nœuds.

Par conséquent, il est nécessaire de développer de nouvelles techniques contre plusieurs attaques de nœuds malveillants et compromis. En outre, nous devons nous concentrer sur la confidentialité des informations de position qui est l'un des plus grands défis à relever.

## **X.3 Localisation dans les RCSF-SMs**

Il est très important pour chaque nœud sous-marin de connaître sa position actuelle. Le système de positionnement global (GPS) ne fonctionne pas bien sous l'eau due à l'absorption rapide de l'onde radio à haute fréquence. Un positionnement à faible coût avec une grande

précision tout comme le GPS, n'est pas encore disponible pour les capteurs sous-marins. Ainsi, il est prévu que les réseaux de capteurs sous-marins doivent s'appuyer sur la localisation distribuée sans l'utilisation du GPS (GPS-free). Pour réaliser ce type d'approches avec la mobilité des nœuds, le principal problème est le processus de mesure de la portée et la direction de transmission.

Parmi les méthodes de localisation utilisées dans les RCSF-SMs, deux catégories se distinguent: les méthodes dites libres de mesure et celles basées mesures. La première concerne l'ensemble des méthodes qui n'utilisent pas les techniques de mesure Time of Arrival (ToA) , Angle of Arrival (AoA), ...etc. Cependant, la seconde regroupe celles qui les utilisent. Ces familles ont pour références les méthodes ALS (Area Localization Scheme), LDB (Localization with Directional Beacon) [45].

Donc, un système de localisation dédié à un RCSF-SM doit avoir une large couverture, une communication faible, haute précision et un faible coût de déploiement.

## **XI Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'étude d'un type particulier des réseaux de capteurs sans fil, dénommé réseau de capteurs sans fil sous-marin (sous l'eau ou aquatique). Nous avons posé les briques de base et fédéré quelques concepts nécessaires à la compréhension du fonctionnement de ce type de réseau. Nous avons défini et décrit brièvement ce qu'est un réseau de capteurs sous-marins ainsi que le capteur sous-marin, ses fonctionnalités et son architecture. Nous avons présenté les caractéristiques d'un réseau de capteurs sous-marins, les applications, les contraintes et les techniques de communication. Nous avons aussi mis l'accent sur la communication acoustique et ses caractéristiques.

Cependant, la conception d'un réseau de capteurs sous-marins robuste et efficace doit satisfaire certaines exigences liées à la durée de vie et à la consommation énergétique. En effet, une consommation d'énergie acceptable, le respect des limites physiques en calcul et en mémoire et l'adaptation à l'environnement sont des paramètres décisifs avant toute idée de conception d'un RCSF.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons la notion du routage utilisé dans les réseaux de capteurs sous-marins ainsi que leur classification.

## **Chapitre III. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins**

## I Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins, la majorité des problèmes sont impliqués par des conditions environnementales très hostiles, cela affecte principalement l'envoi des données collectées par un capteur à la station de base ou l'envoi d'une requête à tous les capteurs par la station de base. Ainsi, le choix d'une technique de routage est alors primordial pour garantir un bon fonctionnement de ce type de réseaux.

En raison des caractéristiques particulières des RCSF-SMs qui les distinguent des autres réseaux de capteurs sans fil, notamment en médium de communication, coût, déploiement et mobilité des nœuds capteurs, le routage est une tâche ardue et compliquée nécessitant un travail de collaboration de tous les nœuds appartenant au réseau.

De très nombreux états de l'art ont été proposés [46,47], pour étudier et analyser plusieurs approches de routage selon différents critères. Ces approches peuvent être regroupées en trois catégories selon :

- l'architecture du réseau (plat, hiérarchique, géographique...etc.),
- la stratégie de transmission des données (multi-chemins, un seul chemin),
- l'opération du protocole (initié par la source, table driven, agrégation des données).

Nous allons donc retracer dans le présent chapitre le fonctionnement principal de plusieurs protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins, en nous focalisant sur le problème de consommation énergétique en général dans les RCSF-SMs.

## II Architectures de communication dans les RCSF-SMs

Différentes architectures de communication ont été proposées pour les réseaux de capteurs sous-marins, décrites dans le chapitre précédent [48]. Ces architectures dépendent de plusieurs facteurs tels que: la couverture spatiale des nœuds (deux dimensions, trois dimensions), le type de communication (un seul saut, multi-saut), le mouvement des nœuds (mobiles, statiques, hybrides). Plusieurs types de véhicules sous-marins autonomes (AUVs) peuvent être utilisés pour renforcer les capacités des réseaux de capteurs sous-marins. Ces véhicules sont autopropulsés et se déplacent autour du réseau de partage des données. Ces architectures de communication peuvent être regroupées aussi selon le domaine d'application du réseau (les applications à temps critique et à court terme, les applications à temps non-critique et à long terme).

- Dans l'architecture à deux dimensions, les nœuds capteurs sont placés à un même niveau à savoir tous les nœuds capteurs ont la même profondeur, par exemple, des capteurs ancrés au fond de l'océan. Chacun de ces nœuds utilise des émetteurs-récepteurs acoustiques pour communiquer les uns avec les autres, les applications typiques de cette architecture peuvent être dédiées à la surveillance de l'environnement, ou à la surveillance des plaques tectoniques sous-marines.
- Dans l'architecture à trois dimensions, les capteurs flottent à différentes profondeurs. Les deux solutions possibles pour placer des capteurs à des profondeurs intermédiaires dans l'océan sont les suivantes:
  - Attacher des nœuds capteurs à une bouée de surface avec un fil dont la longueur peut être ajustée.
  - Régler la longueur du fil connectant les nœuds ancrés et l'élément d'ancrage.

Cette architecture de communication peut être utilisée pour des applications de surveillance telles que la surveillance des phénomènes océaniques (processus biogéochimiques océaniques, les cours d'eau, pollution).

Bien que les réseaux de capteurs assistés à base d'AUVs soient coûteux, mais ils peuvent fournir une meilleure option pour fonctionner sans attaches, câbles, ou télécommande.

### **III Problèmes de conception d'un protocole de routage pour les RCSF-SMs**

Dans cette section, nous présentons un certain nombre d'enjeux qui peuvent menacer le bon fonctionnement d'un protocole de routage dans les réseaux de capteurs sous-marins. En effet, trouver un chemin entre un nœud source et sa destination se heurte à un certain nombre de difficultés dues à l'obligation d'optimiser l'utilisation des ressources dotées aux capteurs, et assurer une bonne qualité de service. Ces contraintes sont causées par le support de communication acoustique, la taille du réseau, le déploiement, souvent aléatoire des nœuds, la mobilité des nœuds du réseau, le délai de propagation élevé, ...etc.

#### **III.1 La mobilité du nœud**

Contrairement aux réseaux de capteurs terrestres qui déploient généralement des nœuds dans une zone de captage souvent statique et les positions des capteurs sont fixes et invariables, dans les RCSF-SMs des facteurs externes comme les courants maritimes, le mouvement d'eau, et autres conditions climatiques ainsi que le facteur humain (d'une manière accidentelle ou ciblée) et animal peuvent causer la mobilité des nœuds. A partir

d'observations empiriques, les objets sous-marins peuvent se déplacer à la vitesse de 2-3 Knots (ou 3-6 kilomètres par heure) dans une condition sous-marine typique, donc cela peut changer l'emplacement des nœuds et produire l'apparition ou la disparition des liens entre les nœuds, ce qui va altérer le processus de routage.

### III.2 Consommation d'énergie

Comme pour les réseaux de capteurs sans fil terrestres, les capteurs dans les RCSF-SMs sont alimentés par des batteries. En effet, la durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance avec la durée de vie de la batterie. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la diminution totale d'énergie, peut induire des changements topologiques cruciaux et peut causer la défaillance totale du réseau.

### III.3 Déploiement des nœuds

Le déploiement des nœuds est une considération importante. Les réseaux de capteurs peuvent être installés d'une manière déterministe ou auto-organisée. Une fois le déploiement du réseau est déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière prédéterminée. Le routage pourrait suivre les chemins prédéterminés, mais ce n'est pas toujours le cas. Quand le déploiement du réseau est auto-organisé, 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.

### III.4 L'erreur du canal sous-marin acoustique

Les canaux de communication acoustiques sous-marins sont affectés par de nombreux facteurs tels que la perte, le bruit, les multi-trajets, et l'étalement Doppler. Tous ces facteurs provoquent des erreurs binaires élevées et la variance de délai. En conséquence, les liens de communication dans les RCSF-SMs sont sujets de beaucoup d'erreurs. En outre, les nœuds de capteurs sont plus vulnérables dans les environnements sous-marins difficiles. Comparativement à leurs homologues terrestres, les réseaux de capteurs sous-marins ont un taux de pannes des nœuds plus élevé.

### III.5 Délai de propagation élevé et faible bande passante

Les canaux acoustiques sont utilisés (au lieu des canaux RF) comme méthode de communication puisque l'onde radio ne fonctionne pas bien dans l'eau. La vitesse de propagation des signaux acoustiques dans l'eau est d'environ  $1,5 \times 10^3$  m/s, qui est de  $10^5$  inférieure à la vitesse de propagation radio ( $3 \times 10^8$  m / s). De plus, la bande passante

disponible de canaux acoustiques sous-marins est limitée et dépend à la fois de la portée de transmission et de la fréquence.

	Portée [km]	Bande passante [kHz]
Très longue	1000	< 1
Longue	10-100	2-5
Moyenne	1-10	≈ 10
Courte	0.1-1	20-50
Très courte	< 0.1	>100

**Tableau III-1** La bande passante disponible pour différentes portées dans le canal acoustique [49].

### III.6 La taille du réseau

Le nombre de nœuds d'un réseau de capteurs sans fil sous-marins est souvent important et sa topologie change fréquemment. Ce changement de topologie nécessite une maintenance et une mise à jour régulière des chemins; qui sont deux tâches gourmandes en énergie. Parfois le changement de l'approche de routage utilisée selon les nouvelles données, implique la participation d'un grand nombre de nœuds capteurs, ce qui est difficile à gérer par les protocoles de routage.

### III.7 Tolérance aux pannes

Un nœud participant au routage de l'information sur un réseau de capteurs peut tomber en panne à cause du manque d'énergie, de dommage physique ou d'interférences environnementales, etc. ce qui ne doit pas affecter le fonctionnement du protocole de routage. Un mécanisme de gestion et de prise en charge de pannes doit être prévu et mis en place.

### III.8 Qualité de service

Un protocole de routage doit tenir en compte des délais d'acheminement et l'intégrité des données émises, car une donnée ou une information arrivant après un certain délai ne serait plus utile surtout dans des applications à temps critique.



## IV Sources de perte d'énergie d'un RCSF-SM

Les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil sous-marins sont alimentés par des batteries. Par conséquent en milieu aquatique, on ne peut pas profiter de l'énergie solaire pour alimenter ces types de systèmes de communication [50]. Pour ces raisons, il est intéressant d'identifier les sources de pertes d'énergie, afin de prolonger la durée de vie des batteries.

### IV.1 Énergie de communication

Assurer une bonne communication en milieu aquatique requiert par conséquent une puissance d'émission élevée. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée, mais l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication constitue la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud communicant.

Cette demande de puissance abusive revient essentiellement au mauvais choix de la fréquence d'émission, du codage, du choix des types d'onde et de modulation [51, 52].

### IV.2 Énergie de traitement

La consommation d'énergie au niveau d'un capteur revient au processus de traitement de l'information, à savoir l'échantillonnage, la conversion numérique analogique et analogique numérique [53]. En général, l'énergie consommée pour le traitement est faible par rapport à l'énergie totale perdue [54].

### IV.3 Accès au médium de transmission

L'accès au médium de transmission est considéré pour de nombreux chercheurs comme une source importante d'épuisement d'énergie. Ces pertes d'énergies au niveau de la couche MAC peuvent être résumées comme suit [55]:

- Réception passive: C'est le cas où un nœud reçoit les paquets qui sont normalement transmis vers une autre destination, obligeant ainsi chaque nœud à dissiper de l'énergie pour recevoir ces paquets.
- Collision: Dans un réseau une collision aura lieu chaque fois que deux nœuds essayent d'envoyer en même temps leurs paquets de données; ce qui nécessite une retransmission de ces paquets. Par conséquent, les collisions augmentent la consommation d'énergie ainsi que le temps latence du réseau.
- Paquets de contrôle: Les paquets de contrôle (par exemple RTS / CTS / ACK) utilisés par la majorité des protocoles MAC ne contiennent pas de données d'application, elles

sont considérées comme des données supplémentaires, donc une consommation supplémentaire d'énergie.

- L'écoute passive : C'est le cas quand un nœud n'est pas actif. Il écoute le canal pour savoir s'il est le destinataire d'un trafic. Finalement, dans cette situation, l'énergie perdue est égale à l'énergie dissipée par une réception normale.
- Cas de non synchronisation: Ce cas arrive lorsqu'un nœud reçoit des paquets de données au moment où il est en mode inactif. Cette situation oblige l'émetteur d'effectuer des retransmissions.

## V 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 fixe. 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**

L'énergie est considérée comme une ressource précieuse dans les réseaux de capteurs, 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 réceptions redondantes sont réduits.

- **Consommation de la bande passante**

La minimisation du nombre de messages redondants optimise la consommation de la bande passante.

- **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 temps réel.

- **Sécurité des échanges**

Le routage est l'un des mécanismes les plus essentiels dans les réseaux RCSF-SMs. L'insécurité des mécanismes de routage peut non seulement nuire aux performances des RCSF-SMs, 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 RCSF-SMs afin de protéger le fonctionnement du réseau.

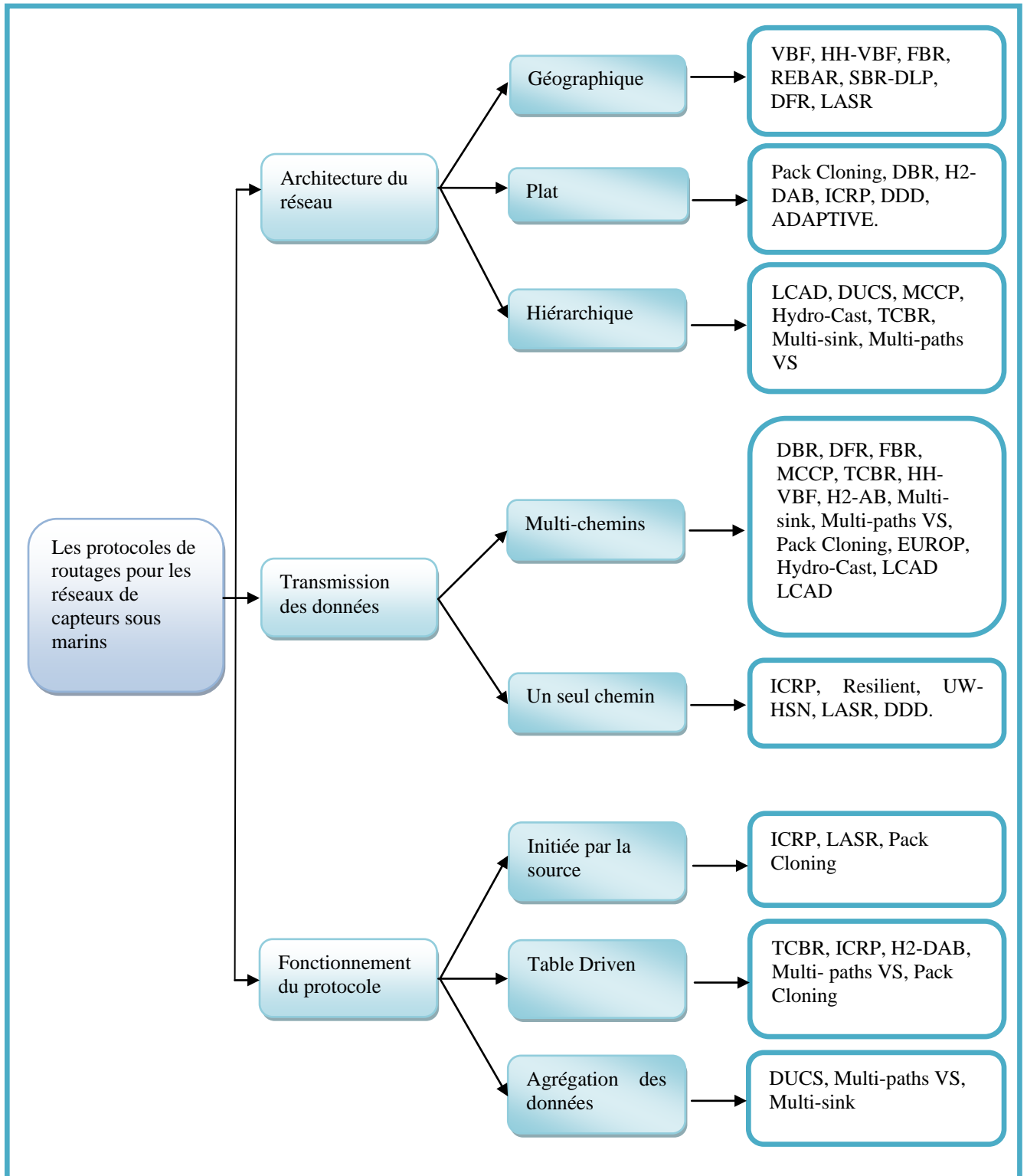
## **VI Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sous-marins**

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.

Les techniques de transmission de données sur un réseau de capteurs sans fil sous-marins diffèrent selon trois critères [46]: i) la structure du réseau : routage plat, hiérarchique ou basé sur la localisation ; ii) la transmission de données : routage basé sur le multi-chemin, sur un seul chemin; iii) le fonctionnement du protocole: initiée par la source, table driven, agrégation des données ; La figure III-1 présente une classification détaillée des protocoles de routage dans les RCSF-SMs.

➤ **Routage à plat** : appelé également routage centré données (data centric) [56] où tous les nœuds ont les mêmes tâches à accomplir. C'est la première approche utilisée dans l'acheminement des données dans les RCSFs. Elle se base sur la collaboration de tous les nœuds du réseau. Les propriétés des données sont spécifiées par un système de dénomination par attribut (attribut, valeur) en raison de la difficulté d'affecter un identificateur global à chaque nœud vu leur nombre important. Parmi leurs avantages, la simplicité d'où la possibilité d'établir des communications sans surcoût où chaque nœud n'aura besoin que des informations de ses voisins directs. L'inconvénient est l'épuisement des ressources en énergie des nœuds proches de la station de base, car tout le trafic vers cette dernière passe obligatoirement par eux.

- **Routage hiérarchique** : cette approche est basée sur la formation de clusters (zones communes). Le principe est d'acheminer les données récoltées par chaque nœud du cluster à son chef de zone (Cluster Head) et qui après des traitements sur leurs parties communes, les transmettra à la prochaine destination (Si le CH ne pourra pas atteindre directement la station de base, les informations seront routées vers le prochain chef de zone). L'avantage est la réduction des coûts en communication et en énergie en minimisant le nombre de messages circulant sur le réseau, étant donné que les CHs appliquent des fonctions d'agrégat sur les données du cluster ce qui permet de les combiner. L'inconvénient concerne la taille du réseau. En outre, quand la taille du réseau augmente, le processus d'élection du Cluster Head devient critique et gourmand en ressources.
- **Routage basé sur la localisation** : l'identification des emplacements géographiques des nœuds capteurs sur la zone de captage est d'une importance fondamentale pour les mécanismes de routage de données dans les RCSFs. Ces informations de localisation permettent le calcul des positions des capteurs et les distances qui les séparent afin de construire les chemins les plus courts entre un nœud source et sa destination. Cette approche de routage est plus économe en énergie car elle dispense les nœuds capteurs d'employer les méthodes aléatoires ou probabilistes pour rechercher les routes. De plus, la localisation des nœuds (et par conséquent de leurs régions) permet de diffuser des requêtes uniquement à ces régions et éviter leur diffusion en mode broadcast (diffusion globale à tous les nœuds) et ainsi réduire le nombre de transmissions d'une manière significative [57, 58]. Le positionnement du nœud peut être obtenu en utilisant un système de géo-positionnement tel que le GPS ou bien via des algorithmes de positionnement relatif [59], l'inconvénient est la nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS qui ne fonctionne pas bien sous l'eau due à l'absorption rapide de l'onde radio à haute fréquence. Un positionnement à faible coût avec une grande précision tout comme le GPS, n'est pas encore disponible pour les capteurs sous-marins.
- **Routage multi-chemins** : Ce type de routage utilise des chemins multiples afin d'augmenter les performances du réseau en maintenant des chemins alternatifs.
- **Routage à un seul chemin** : Le routage à voie unique consiste à découvrir les routes par la suite un seul meilleur chemin sera sélectionné pour chaque destination.



**Figure III-1** Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins [46].

- **Routage initié par la source** : Un protocole de routage initié par la source définit les chemins de transmission à la demande du nœud source, et à partir du nœud source. Lorsque les données sont disponibles, la source annonce et initie la transmission des données.
- **Routage table-driven** : Dans cette approche les tables de routage sont maintenues au niveau de chaque nœud, ces tables sont mise à jour périodiquement, et la procédure d'acheminement de l'information est basé sur ces données.
- **Routage basé sur l'agrégation des données** : Le routage basé sur l'agrégation des données consiste à remplacer les lectures individuelles de chaque capteur par une vue globale, collaborative sur une zone donnée.

## VII Exemples de protocoles de routage dans les RCSF-SMs

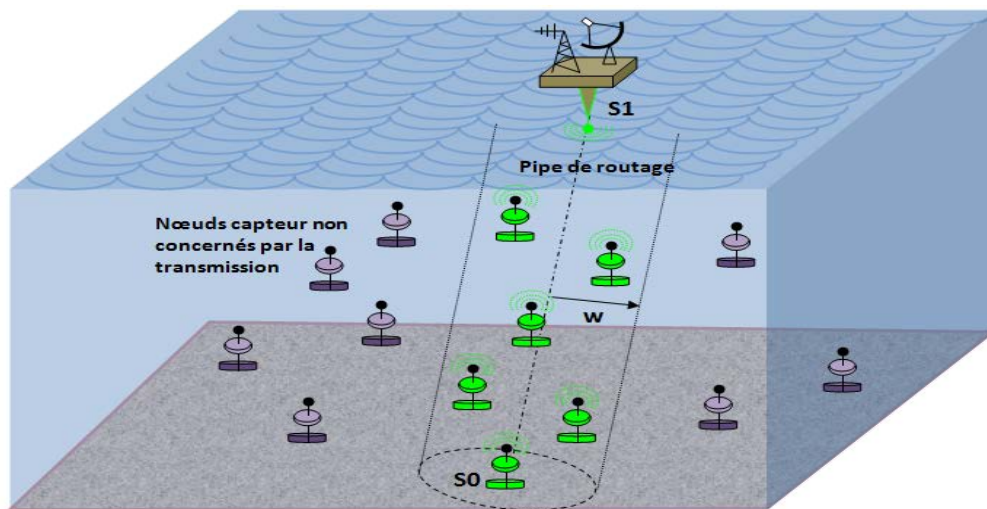
### VII.1 Le protocole de routage « VBF »

Le mouvement des nœuds continus causés par la nature aquatique nécessite la maintenance fréquente et le rétablissement des chemins de routage, qui peuvent être encore plus coûteux dans des réseaux en trois dimensions. Afin de traiter cette issue, une approche de routage appelé VBF (Vector Based Forwarding) a été proposée dans [60].

VBF a été le premier protocole de routage conçu pour les réseaux de capteurs sous-marins mobiles. Ce protocole suppose que chaque nœud connaît ses informations de positions, qui peuvent être obtenues par des algorithmes de localisation [61-65]. S'il n'y a pas de service de localisation disponible, les capteurs peuvent toujours estimer leurs positions par rapport au transmetteur en mesurant l'angle d'arrivée (AoA) et la force du signal à travers le dispositif matériel. Cette hypothèse est justifiée par le fait que les antennes acoustiques directionnelles sont de taille plus petite que les antennes directionnelles RF en raison de la très faible longueur d'onde du son. Par ailleurs, les capteurs sous-marins sont généralement plus grands que les capteurs terrestres.

Dans VBF, chaque paquet comporte les informations de position de l'émetteur, la cible et le nœud intermédiaire (le nœud qui retransmet ce paquet). Le chemin de transmission est défini par un vecteur de routage à partir de la source vers la cible. Lors de la réception d'un paquet, le nœud calcule sa position par rapport au nœud intermédiaire. Récursivement, tous les nœuds recevant le paquet calculent leurs positions. Si un nœud détermine qu'il est assez-proche au vecteur de routage (inférieure à un seuil de distance prédéfinie), il met sa propre

position calculée dans le paquet et continue la transmission, sinon, le paquet est rejeté. De cette façon, tous les nœuds intermédiaires dans le réseau forment un canal virtuel de routage appelé « pipe de routage »: les capteurs dans cette pipe sont tous éligibles pour la transmission des paquets, mais ceux qui ne sont pas proches au vecteur du routage ne transfèrent pas le paquet. La figure III-2 illustre l'idée principale de VBF, le nœud S1 est la source, et le nœud S0 est le sink. Le vecteur de routage est spécifié par  $\overrightarrow{S0S1}$ . Les paquets des données sont transmis de S0 à S1. Les nœuds intermédiaires qui se trouvent le long du vecteur de routage forment la pipe de routage d'un rayon pré-contrôlé (i.e., le seuil de distance, notée W).



**Figure III-2** Topologie du protocole VBF pour les RCSF-SMs.

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

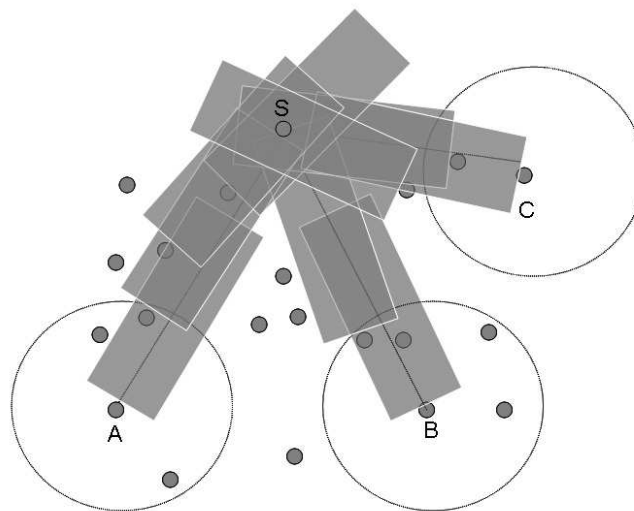
Cependant, VBF a quelques problèmes. Tout d'abord, l'utilisation d'une pipe de routage virtuel de la source à la destination peut affecter l'efficacité d'acheminement du réseau avec différentes densités de nœud. Dans certaines régions, si les nœuds sont très peu déployés ou deviennent plus clairsemés 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.

## VII.2 Le protocole de routage « HH-VBF »

Afin de surmonter les problèmes rencontrés par le protocole VBF, à savoir le faible taux de délivrance 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 [66]. HH-VBF forme la pipe du routage dans un mode saut-par-saut, améliorant le taux de délivrances 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 à la station de base, il définit un canal virtuel différent autour du vecteur de chaque saut de l'expéditeur vers la station de base comme il est mentionné dans la figure III-3. De cette manière, chaque nœud peut prendre la décision de transmission de paquets de manière adaptative sur la base de son emplacement actuel [67]. 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.



**Figure III-3** Principe du protocole HH-VBF pour les RCSF-SMs.



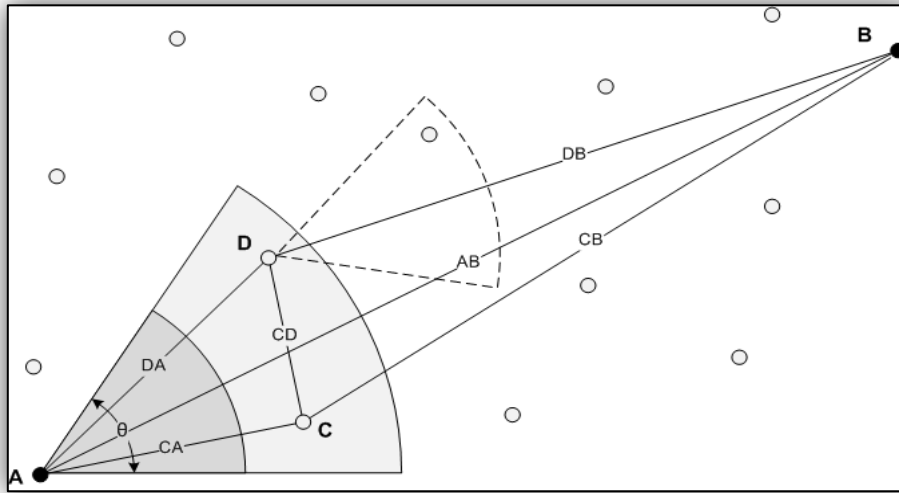
- Dans les réseaux clairsemés, malgré que le nombre de nœuds qualifiés par la transmission puisse être petit, HH-VBF peut trouver un chemin de transmission de données tant que l'un existe dans le réseau.

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.

### VII.3 Le protocole de routage « FBR »

Le Protocole FBR (Focused Beam Routing) représente une technique de routage évolutive pour les réseaux de capteurs sous-marins basée sur des informations de localisation [68]. Elle est adaptée aux réseaux contenant les deux types de nœuds (statiques 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 cross-layer, dans laquelle 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 itinéraire est établi de manière dynamique en tant que paquet de données qui traverse le réseau vers sa destination finale. 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 tel qu'il est illustré dans la figure III-4. 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.



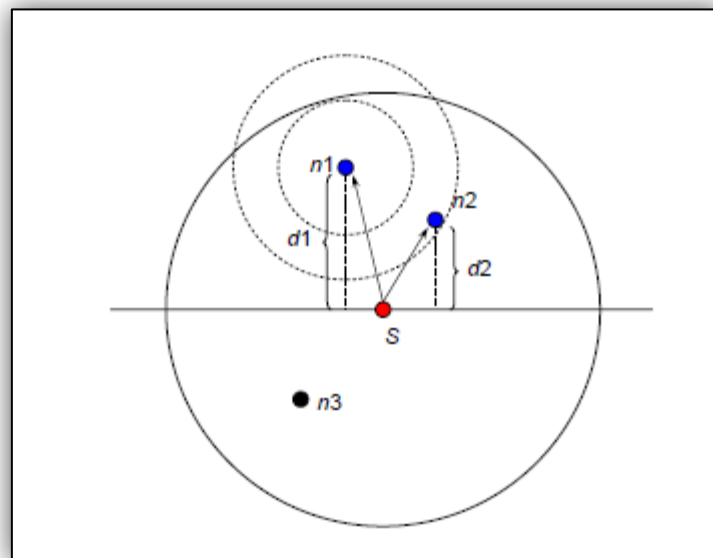
**Figure III-4** L'architecture du protocole FBR.

Cependant, l'approche suivie par FBR pourrait avoir quelques problèmes de performance. Tout d'abord, si les nœuds deviennent clairsemés en raison de mouvements de l'eau, alors il est possible qu'aucun nœud ne se situe dans ce cône d'angle d'expédition. En outre, il se peut que certains nœuds, qui sont disponibles comme candidats pour le prochain saut, existent en dehors de cette zone de transfert. Dans de tels cas, quand il est incapable de trouver le nœud de relais suivant dans ce cône d'émission, il doit retransmettre les RTS à chaque fois, ce qui augmente en fin de compte la surcharge de communication, affectant par conséquent les délivrances de données dans ces zones clairsemées.

#### VII.4 Le protocole de routage « DBR »

Depth Based Routing (DBR) est un protocole de routage qui ne nécessite pas les informations de position complètes [69]. Il gère un réseau dynamique avec une bonne efficacité énergétique et utilise une architecture de réseau multi-sinks sans introduire de coût supplémentaire. Basé sur les informations de profondeur seulement de chaque capteur qui sont acquises à l'aide d'un capteur de profondeur attaché au nœud, les nœuds transmettent les paquets de données vers une station de base qui se trouve sur la surface d'eau. En outre, un

paquet de données comprend un champ qui enregistre les informations de profondeur de son récent transitaire et ce champ est mis à jour à chaque saut. Dans DBR, chaque nœud ajoute son information de profondeur dans le paquet de données. Lors de la réception d'un paquet, un nœud peut transmettre ce paquet seulement lorsque sa profondeur est plus petite que la profondeur de l'émetteur. Comme le montre la figure III-5, le nœud S est l'émetteur, et les nœuds n1, n2 et n3 sont tous des nœuds voisins d'un seul saut. Le cercle en trait plein représente la portée de transmission du nœud S. Lorsque le nœud S diffuse un paquet, tous les nœuds voisins recevront ce paquet. Le nœud n3 se situe en bas du nœud S, donc 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 à cause de sa petite valeur de profondeur par rapport au nœud n2.



**Figure III-5** Sélection du nœud qualifié pour la transmission dans le protocole DBR.

Dans ce protocole, chaque nœud maintient deux files d'attente, la file d'attente de priorité (Q1) et la mémoire tampon d'historique de paquet (Q2), afin de réduire le nombre des nœuds de transfert et de contrôler la transmission dupliquée d'un paquet respectivement. Le fonctionnement du protocole peut se résumer comme suit. Lors de la réception d'un paquet, un nœud vérifie lui-même s'il est un intermédiaire qualifié en fonction de la différence de profondeur calculée 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 de priorité Q1, sinon il le rejette. En cas où le nœud est un nœud intermédiaire qualifié, le paquet est transmis à l'expiration du temps de maintien et les informations sur le paquet transmis sont enregistrées dans la

mémoire tampon d'historique de paquet Q2. Afin de supprimer la transmission des paquets dupliqués, un nœud vérifie toujours la file d'attente Q2 avant la transmission d'un paquet.

Cependant, DBR présente de sérieux problèmes. Tout d'abord, DBR a un seul mode de transmission glouton (greedy mode), qui ne permet pas d'atteindre des taux de livraison élevés dans les zones clairsemées. En second lieu, la transmission des paquets de données dans un mode de diffusion peut diminuer les performances du réseau. Lorsque deux ou plusieurs nœuds sont des candidats pour la transmission du même paquet de données, ce protocole définit un mécanisme qui détermine le nœud qui sera admissible à cette tâche. Cependant, à la suite de ces émissions de plus en plus de nœuds reçoivent les paquets de données et calculent à chaque fois leur profondeur, ce qui constitue une utilisation inefficace de l'énergie disponible limitée. En bref, à la fois les zones à faible et haute densité sont des problèmes pour DBR, l'augmentation des densités augment non seulement la consommation d'énergie mais crée aussi des complexités, ce qui peut conduire à une utilisation inefficace de la mémoire et des pertes de paquets.

### VII.5 Le protocole de routage « ICRP »

ICRP (Information Carrying based Routing Protocol) [70] est un protocole réactif et non-géographique. Ce protocole proposé considère la mobilité de la source et de la destination. Le mécanisme réactif est utilisé de telle sorte qu'aucun paquet explicite RREQ (Route Request) n'est transmis. Au lieu de cela, un chemin d'accès est établi par la diffusion du paquet de données (qui agit également en tant que paquet RREQ). Initialement, le nœud source diffuse le paquet des données et les nœuds intermédiaires retransmettent le paquet reçu. Lors de la réception du paquet, la destination envoie une réponse qui suit le chemin enregistré au cours de l'envoi du paquet des données. Ainsi, une route depuis la source vers la destination est créée sans exploiter un paquet RREQ explicite.

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

Bien que le protocole ICRP a été évalué à la fois par simulation et déploiement réel, cette expérience physique ne se composait que de trois capteurs, ce qui ne reflète pas le trafic de la plupart des scénarios réels dans les RCSF-SMs. Le mécanisme de routage a quelques problèmes de performance. Tout d'abord, quand un nœud ne dispose pas d'informations d'itinéraire pour une destination spécifiée alors il diffusera le paquet de données. Plusieurs émissions se traduiront par le gaspillage d'énergie du nœud, ce qui diminue la durée de vie de l'ensemble du réseau. Deuxièmement, chaque route a une date d'expiration, qui peut être très sensible pour les taux de livraison. D'une part, si elle est très longue alors les nœuds peuvent se déplacer et cette route peut créer de la complexité, tandis que si elle est trop courte alors elle permettra d'augmenter de plus en plus les diffusions.

### VII.6 Le protocole de routage « Adaptative »

Le protocole Adaptative [71] est basé sur une nouvelle approche qui assigne des priorités aux paquets. Les priorités sont attribuées sur la base des caractéristiques des données détectées et le statut du réseau.

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

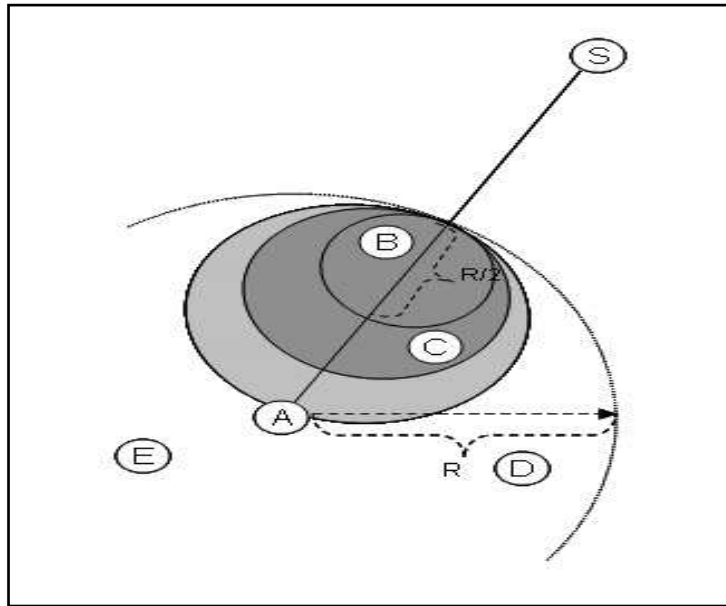
- le niveau d'urgence: l'importance des données
- l'âge des paquets détectés: le temps passé par le paquet dans le réseau
- la densité des nœuds
- le niveau de la batterie du nœud: le niveau de l'énergie résiduelle d'un nœud.

Quand un paquet est généré, la priorité du paquet est calculée. La priorité calculée est associée à une valeur comprise entre 0 et 100, où 0 représente la plus faible priorité d'un paquet et 100 représente la priorité la plus élevée. En outre, sur la base de la valeur de priorité du paquet, un état d'acheminement est calculé. Généralement, il existe quatre états de routage basé sur la valeur de priorité [0, 25], [25, 50], [50, 75] et [75,100]. Par exemple, la valeur de priorité 45 montre que le paquet de routage se trouve dans l'état 2.

En se basant sur l'état de routage, un nœud envoie  $i$  copies du paquet où  $0 < i < 4$ . En outre, pour un état d'acheminement, une zone correspondante est choisie, appelée zone de transfert. La taille de chaque zone d'acheminement est prédéterminée par exemple pour la transmission de la zone 1, 2, 3, 4 le rayon correspondant est respectivement  $R / 2$ ,  $R / 2$ ,  $3R / 4$  et  $R$  [71].

Durant la transmission d'un paquet à la zone de transfert correspondante, en général, une priorité plus élevée (un état de routage plus grand) correspond à une zone de transfert plus importante. La figure III-6 illustre le schéma « adaptative » proposé, où A est le nœud de

transfert actuel. Le paquet est transmis vers le nœud B, puisque, B est dans la zone de transfert  $R/2$  et dans ce cas la, le paquet a la valeur de priorité 45.



**Figure III-6** Protocole de routage adaptative

Les résultats de simulation [71] montrent qu'une telle stratégie peut satisfaire aux exigences de différentes applications comme : le taux de délivrance, le délai moyen de bout en bout, et la consommation d'énergie. Toutefois, le protocole proposé calcule ces priorités séparément pour chaque paquet de données après leur réception. Ces calculs nécessitent beaucoup de communications avec les nœuds voisins, ce qui peut non seulement être un fardeau sur l'énergie de nœud, mais peut aussi aider à augmenter les délais de bout en bout.

### VII.7 Le protocole de routage « DUCS »

DUCS (Distributed Underwater Clustering Scheme) est un protocole d'auto-organisation adaptative, où l'ensemble du réseau est divisé en groupes (clusters) à l'aide d'un algorithme distribué. Les nœuds de capteurs sont organisés en clusters locaux, dans chaque cluster un nœud est sélectionné en tant que chef de groupe « Cluster Head ». Tous les nœuds restants (membres du cluster) transmettent leurs paquets de données aux CHs respectifs. Après avoir reçu les paquets de données de tous les membres de cluster, le CH exécute la fonction de traitement du signal, comme l'agrégation sur les données reçues et les transmet vers la station de base à l'aide du routage multi-saut par d'autres CHs. La figure III-7 schématise le principe du protocole DUCS [72].

Ce protocole fonctionne en deux phases: dans la première phase appelée (phase setup), qui consiste à la formation des clusters et la sélection du cluster-head et les nœuds membres du cluster. La deuxième phase (phase steady), représente la transmission des données.

Dans la première phase, chaque nœud a la probabilité de devenir un cluster-head, un nœud calcule son énergie résiduelle et sur la base de ce calcul, la probabilité d'un nœud de devenir un cluster-head est déterminée.

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

Lors de la réception des messages join-request, le cluster-head enregistre ces voisins et calcule un ordonnancement de transmission. Cet ordonnancement est basé sur le délai de propagation entre le cluster-head et les membres du cluster.

Dans le protocole proposé, pour faire face à la mobilité des nœuds, une phase de maintenance est utilisée. Pendant cette phase, chaque nœud calcule le délai de propagation vers son cluster-head en utilisant la technique ToA (Time of Arrival). Si le délai de propagation d'un nœud diffère de plus de (50%) du délai initial, ce nœud ré-estime ses distances vers chaque cluster-head. Tous les cluster-head sont pris en considération, de cette façon le cluster-head le plus proche est encore une fois sélectionné.

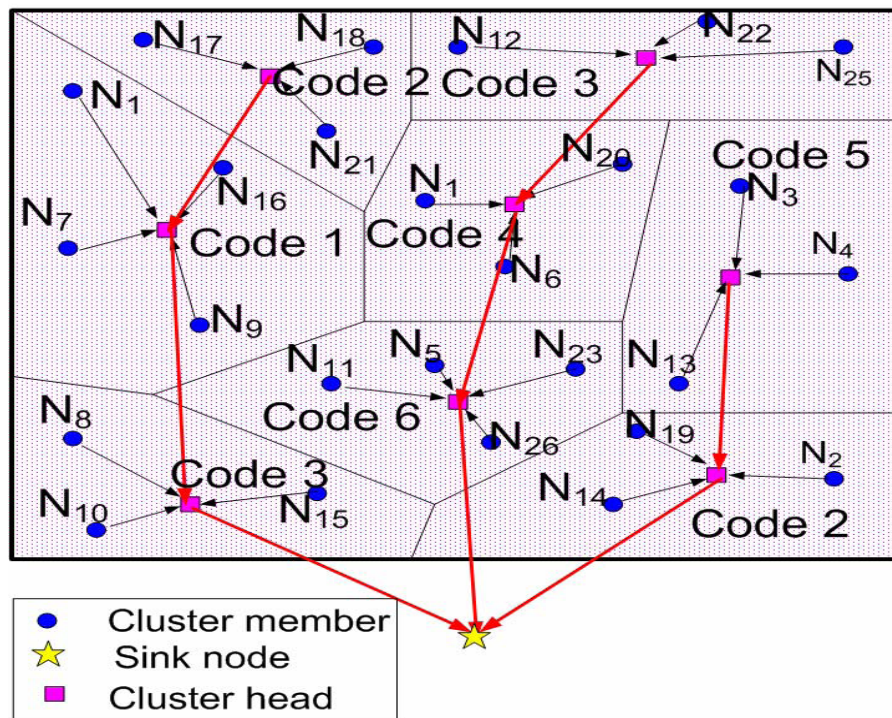


Figure III-7 Exemple de réseau avec DUCS

Bien que DUCS est simple et économe en énergie, mais il a un problème de performances. En premier lieu, les mouvements de nœud en raison de courants d'eau peuvent influencer sur la structure des clusters, ce qui diminue par conséquent la durée de vie de réseau.

### VII.8 Le protocole de routage « MCCP »

MCCP (Minimum Cost Clustering Protocol) [73] est un protocole qui se base sur le principe du « clustering », où les clusters sont formés à base d'une métrique de coût. Le coût d'un cluster est basé sur trois paramètres: la quantité d'énergie requise par les membres du cluster pour atteindre le cluster-head, la position du cluster-head et la station de base, et l'énergie résiduelle du cluster-head et des membres du cluster.

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

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

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

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

Afin d'éviter le problème des hot-spots à proximité de la station de base (les nœuds près d'une station de base, ont une forte probabilité de transmettre une grande quantité de paquets et meurent hâtivement). Dans le protocole proposé les clusters près de la station de base



contiennent moins de membres par rapport aux clusters éloignés. En outre, afin d'équilibrer la charge de trafic entre les cluster-head et les nœuds membres, un regroupement périodique est effectué. Ainsi, le calcul du coût d'un cluster prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds donc le rôle de cluster-head et des nœuds des membres change lors de la formation des nouveaux clusters.

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

### **VII.9 Le protocole de routage « Pack cloning »**

Dans les réseaux de capteurs mobiles, éventuellement plusieurs chemins disjoints peuvent exister depuis un nœud source vers une destination. Il a été démontré que le routage sur ces chemins multiples permet non seulement d'augmenter le taux de délivrance de données, mais également d'accélérer l'exécution de la délivrance. Comme ces chemins commencent à converger à la destination, la possibilité de contention commence à augmenter ainsi. La contention qui se pose entre les nœuds à proximité peut être considérée comme positive. Afin de tirer profit de la proximité des nœuds, les auteurs en [74] ont proposé une technique de clonage de Paquets appelée « Pack cloning », qui contribue à améliorer les taux de délivrance de données. Le schéma proposé utilise cette idée de cloner sélectivement des paquets de données au cours du processus de transfert vers la destination. Contrairement de la diffusion contrôlée ou routage multi-chemin classique, où les paquets dupliqués sont indiscernables parce que les nœuds concernés n'ont aucune idée de combien de doublons ont été introduites, la technique « Pack cloning » a la capacité de contrôler le nombre de paquets clonés selon la qualité de la liaison et des conditions de canal afin de minimiser les dépenses de contention et d'énergie. Au cours du processus de clonage de paquets, un nœud de relais ne renvoie un paquet entrant seulement s'il a déjà reçu une copie. Cela aidera à prévenir le trafic réseau excessif. Cependant, les auteurs veulent exploiter l'avantage d'avoir deux copies distinctes du même paquet le long de deux chemins disjoints. Pour ce faire, des copies distinctes du paquet

d'origine sont créées alors que le nombre de copies distinctes est un paramètre qui peut être ajusté en fonction des conditions. La source d'abord détermine le nombre de copies distinctes qu'elle veut, et ensuite elle commence l'envoi de chaque copie séquentiellement avec un certain intervalle entre eux. Le nombre total de copies produites et le numéro d'identification d'une copie particulière sont mentionnés dans l'en-tête de paquet. Quand un paquet de clones est reçu par un nœud de relais intermédiaire alors il peut dériver des informations à partir du paquet entrant. Cette information extraite est utile pour détecter les doublons et les pertes de paquets. Les paquets dupliqués reçus sont tout simplement supprimés, et de nouveaux paquets de clones sont transmis, tandis que les paquets de clones manquants ou perdus sont générés et transmis. Quand un nœud source effectue le clonage par paquets, il envoie par la suite chaque clone, après la sélection d'une valeur appropriée de l'intervalle, qui dépend des paramètres du canal physique. En faisant cela, il aidera à réduire les chances de clones en conflit et en interférence les uns avec les autres. Le routage multi-chemin est capable d'augmenter la robustesse du réseau non seulement en augmentant le taux de délivrance, mais aussi par une diminution du délai de bout en bout, dans le cas d'utilisation des ondes RF. Cependant, pour le canal acoustique ce type de routage est très gourmand en énergie. Ainsi, afin d'accroître le taux de délivrance, plusieurs chemins sont utilisés et ces multiples chemins continuent à produire des doublons si la qualité de canal n'est pas bonne. En bref, les communications à base de RF peuvent supporter ces régimes, mais pour un environnement acoustique, des techniques telles que le clonage de paquets ne sont pas facilement abordables à cause de la consommation énergétique élevée.

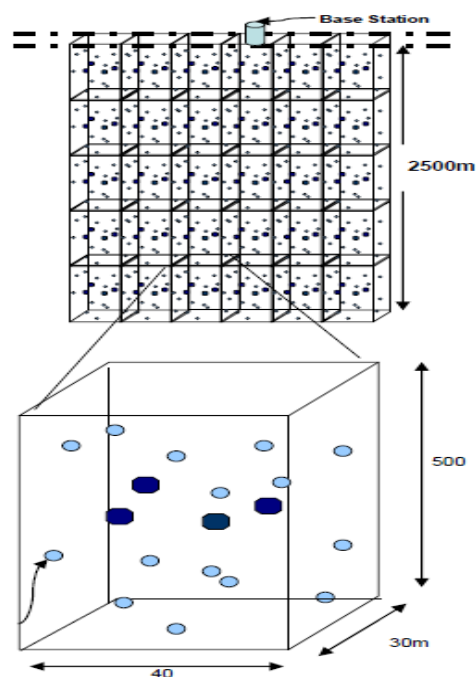
#### **VII.10 Le protocole de routage « LCAD »**

En général, la phase de transmission de données représente la principale source de consommation d'énergie pour un capteur. La dissipation d'énergie pendant la transmission de données est proportionnelle à la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'approche multi-saut est utilisée fréquemment durant la transmission. Cette technique peut poser un autre problème, c'est que les capteurs localisés autour du sink reçoivent un grand nombre de paquets de données, qui drainent rapidement leur énergie. Afin de résoudre ces deux problèmes, le protocole de routage appelé LCAD (Location-Based Clustering Algorithm for Data Gathering) [75], à base de cluster pour les réseaux de capteurs sous-marins à trois dimensions, a été proposé. Ici, les nœuds capteurs sont déployés dans une zone d'intérêt à des profondeurs relatives les uns des autres. A chaque niveau, ces capteurs sont organisés en clusters avec multiples cluster heads. Ils proposent un algorithme pour la sélection de cluster

head à chaque cluster en fonction de la position du nœud dans le réseau. Les liens acoustiques horizontaux sont utilisés pour la communication intra-cluster. Concernant l'énergie, la longueur de cette liaison acoustique horizontale est limitée à un maximum de 500 m comme il a été montré dans [76] que les performances de liaison acoustique peuvent être optimales, à cette distance de communication. Dans l'architecture proposée, l'ensemble du réseau est divisé en plusieurs grilles tridimensionnelles où chaque grille a une dimension d'environ 30x40x500m (voir figure III-8). Le processus de communication est achevé en trois phases:

- (i) la phase setting up, où le cluster head est sélectionné;
- (ii) la phase de collecte de données, où les données sont envoyées au cluster head par les nœuds membres du cluster ;
- (iii) et la phase de transmission, où les données recueillies par les clusters heads sont transmises à la station de base à l'aide des Véhicules autonomes sous-marins (AUVs).

Certains nœuds dans chaque groupe disposent de ressources supplémentaires, comme la mémoire et de l'énergie, et ces nœuds peuvent être qualifiés comme cluster head. Ayant plusieurs CH cela augmente non seulement la fiabilité, mais aussi l'équilibrage de charge dans le réseau. Ces CHs sont situés approximativement au centre de la grille, ce qui permet de communiquer avec un nombre maximum de nœuds de capteurs ordinaires. Ces grilles sont organisées comme les cellules d'un réseau téléphonique cellulaire.



**Figure III-8** Architecture de réseau utilisé dans le protocole de routage LCAD

Les AUVs sont utilisées pour collecter des paquets de données à partir des cluster head au lieu de chaque nœud de capteur dans le réseau. Comme il a été prouvé que la liaison acoustique n'est pas suggérée pour les distances de plus de 500 m, le nombre requis dans chaque niveau dépend des profondeurs moyennes des océans. Pour avoir des meilleurs résultats, ils préconisent un déploiement dense de capteurs dans les niveaux inférieurs et de la distribution clairsemée dans les niveaux supérieurs.

Néanmoins, le protocole proposé semble avoir quelques sérieux problèmes de performance. La performance de LCAD dépend de la structure de la grille. Pour les réseaux de capteurs terrestres, ce type de structure est facilement réalisable. Toutefois, pour les environnements sous-marins où les mouvements des nœuds sont fréquents, l'hypothèse d'une telle structure de grille n'est pas si simple. Pour l'analyse de la performance, le protocole LCAD a été évalué en termes de durée de vie du réseau, mais aucune information sur les mouvements de nœuds n'a été fournie.

## VIII Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les architectures de communication dédiées aux RCSF-SMs. Puis nous avons décrit les problèmes de conception d'un protocole de routage, ainsi que les sources de perte d'énergie et les critères de performance du routage dans un environnement marin. Le dernier volet de notre étude à travers ce chapitre a été consacré aux principaux protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Nous avons résumé ces protocoles de routage classés en trois catégories principales, basés sur l'architecture du réseau, la transmission des données, et le fonctionnement du protocole. Enfin, nous nous sommes concentrés sur les protocoles de routage qui s'intéressent à la consommation d'énergie.

La consommation d'énergie est un problème majeur, plusieurs chercheurs ont proposé des solutions afin de la minimiser dans le nœud et par conséquent améliorer la durée de vie du réseau. Par conséquent, la solution la plus efficace est l'utilisation de protocoles de routage à base de cluster.

Nombreuses sont les approches et techniques détaillées dans ce chapitre, mais la liste est toutefois loin d'être exhaustive. Cela, nous mène dans la suite de ce travail à se pencher sur les solutions de routage que nous avons proposées pour optimiser la durée de vie du réseau en guise de contribution.

## **Chapitre IV. Le routage basé sur le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins**

## I Introduction

Un réseau de capteurs sans fil sous marins est un ensemble de capteurs qui collaborent pour contrôler et surveiller l'environnement. Le nombre de capteurs peut atteindre des centaines, voire des milliers, suivant l'application [14]. Concevoir et développer des protocoles de routage d'information dans le cadre des applications des réseaux de capteurs sans fil sous marins présentent un apport considérable pour améliorer les performances de ces réseaux et d'accroître leur durée de vie.

Les défis sont nombreux et ils doivent être surmontés pour parvenir à des solutions pratiques et avantageuses. Ces défis comprennent la bande passante limitée, le bruit, le taux d'erreur binaire élevé, la perte de transmission, les problèmes de fiabilité, l'énergie et la qualité des liaisons acoustiques [29, 36].

La consommation d'énergie représente une question importante lors de la conception et l'évaluation de la performance globale d'un système RCSF-SM. Le facteur qui affecte cette performance découle en général de l'utilisation des batteries comme seule source d'alimentation des capteurs. Dans ce cadre, les travaux de recherche se concentrent sur la conception de protocoles de routages plus évolutifs et énergétiquement efficaces [77,78]. La plupart des chercheurs se concentrent sur le comportement du capteur individuel en terme d'efficacité énergétique en proposant des protocoles de routage basés sur la technique de clustering, les membres d'un cluster ne transmettent pas leurs données collectées directement à la station de base mais à leur cluster head (CH) correspondant. En conséquence, les CHs sont responsables pour coordonner les membres du cluster, agréger leurs données capturées, et de les transmettre à une station de base distante, directement ou via un mode de transmission multi-sauts.

Dans ce chapitre, nous présenterons notre première contribution représentée par les deux algorithmes nommés SH-FEER et MH-FEER [79], qui peuvent optimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie d'un RCSF-SM.

Il existe diverses techniques pour réaliser la création des clusters à savoir K-Means [80], K-Medoids [81] et Fuzzy C-Means (FCM) [82]. Tous ces algorithmes essaient de partitionner l'ensemble des nœuds en multiple de clusters. Pour ne pas citer que ceux-ci, la liste des algorithmes n'est pas exhaustive. Dans tout ce qui suit, nous allons considérer l'algorithme FCM pour la formation des clusters. Nous commencerons d'abord par présenter une brève

description de ce dernier ensuite, nous présenterons les détails de nos algorithmes proposés ainsi que l'évaluation de ses performances.

## II Algorithme FCM (Fuzzy C-Means)

FCM (Fuzzy C-Means) [83-86] est un algorithme de classification non supervisée floue. Il introduit la notion de sous-ensemble flou dans la définition des clusters: chaque nœud dans la zone de déploiement appartient à chaque groupe avec un certain degré, et tous les clusters sont caractérisés par leur centre de gravité.

Comme d'autres algorithmes non supervisés de classification, FCM utilise un critère de minimisation des distances intra-clusters et maximise les distances inter-clusters, mais délivre un degré d'appartenance à chaque cluster pour chaque nœud. Cet algorithme nécessite la connaissance préalable du nombre de clusters et génère les clusters selon un processus itératif en minimisant une fonction objective. Ainsi, il offre une partition floue de l'environnement en donnant à chaque nœud un degré d'appartenance compris entre 0 et 1 dans un cluster donné. Le cluster, qui est associé à un nœud, est celui dont le degré d'appartenance est le plus élevé.

FCM est basée sur la minimisation de la fonction objective suivante [87]:

$$J(U, c_1, c_2 \dots c_c) = \sum_{i=1}^c \sum_j^n U_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (IV.1)$$

Où  $m$  est un nombre réel supérieur à 1,  $U_{ij}$  est le degré d'appartenance du nœud  $j$  au cluster  $i$ ,  $c$  est le nombre de clusters,  $n$  est le nombre de nœuds et  $d_{ij}$  est la distance euclidienne entre le nœud  $j$  et le centre du cluster  $i$ .

L'algorithme se compose des actions suivantes :

1. Fixer une matrice d'appartenance arbitraire.
2. Calculer les centres des clusters en utilisant l'équation suivante:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n U_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n U_{ij}^m} \quad (IV.2)$$

3. Réajuster la matrice d'appartenance selon la position des centres, conformément à l'équation IV.3:

$$U_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (IV.3)$$

4. Calculer la minimisation et retourner à l'étape 2 s'il n'y a pas de critère de convergence.

### III Contribution

Dans cette partie, nous allons présenter deux algorithmes de routage, basés sur le clustering par la méthode Fuzzy C-Means (FCM) et efficaces en termes d'énergie et de durée de vie, dédiés au réseau de capteurs sans fil sous marins. Ces travaux ont été inspirés des protocoles de routage proposés pour les RCSFs [88]. Ces solutions considèrent que le réseau est statique et à deux dimensions, ce qui ne convient pas pour les RCSF-SMs où les réseaux sont déployés dans un espace à trois dimensions, et la plupart des nœuds sont mobiles. En outre, le choix initial des CHs durant la première itération était aléatoire, ceci n'implique pas le choix optimal surtout dans le cas où le CH élu est positionné dans les extrémités du cluster. Bien au contraire, nos deux propositions SH-FEER (Single-Hop Fuzzy based Energy Efficient Routing algorithm) et MH-FEER (Multi-Hop Fuzzy based Energy Efficient Routing algorithm) ne souffrent pas de telles limitations, car la conception était adéquate à l'environnement aquatique i.e. pour un espace à trois dimensions et pour des topologies statiques et dynamiques. En plus, le critère de la centralité est pris en considération dans le choix des CHs au début des simulations.

#### III.1 Le premier algorithme proposé: SH-FEER

Le premier algorithme SH-FEER (Single-Hop Fuzzy based Energy Efficient Routing algorithm) fonctionne en trois phases. Dans la première phase, les clusters sont créés par la méthode Fuzzy C-Means. Les nœuds s'organisent à l'intérieur des clusters aléatoirement avec des tailles inégales, tous les nœuds ont la même quantité d'énergie. Dans la deuxième étape, un seul nœud sera sélectionné comme CH pour chaque cluster. Dans l'itération initiale, le nœud le plus proche au centre du cluster est sélectionné en tant que CH, mais à partir des prochaines itérations la sélection est effectuée selon un mécanisme de rotation basée sur l'énergie résiduelle de chaque nœud. Dans la troisième phase, chaque nœud membre d'un cluster transmet ses données récoltées au CH correspondant via un lien direct. Le nœud CH reçoit les données de tous les membres du cluster, exerce des fonctions de traitement de données (l'agrégation) et transmet les données à la station de base en utilisant un seul lien de routage. Les CHs sont responsables de la coordination entre les nœuds au sein de leurs clusters (coordination intra-cluster) et de la communication entre eux (coordination inter-cluster).

L'algorithme de cette première proposition est décrit dans ce qui suit:



---

**Phase 1: Clusters formation**

---

Apply FCM algorithm to form clusters.

- Each cluster  $K(i)$  contains a number of nodes,  $i=1, \dots, N$
  - Initially all nodes have the same amount of energy.
- 

---

**Phase 2: Cluster head selection**

---

```

maxE=zeros(1,N) ;
maxE is a row vector contains N zeros
R_max: maximum number of rounds
TE: total energy of network
while(R≤R_max || TE>0)
for i = 1 to N do
  if R==1
    -calculate the distance d (nodei , center) // between nodei and center of cluster.
    -Assign ICH (i) of the cluster in which d (nodei , center) is minimum.
  else
    for j=1 to length(k(i)) do
      if maxE(i)<k(i).E(j)
        maxE(i)=k(i).E(j)
      end if
    end for
    CH(i)=maxE(i)
  end if
end for
end while

```

---



---

**Phase 3: Data transmission (SH- FEER)**

---

- Intra\_cluster transmission

```

for i = 1 to N do
  for j=1 to length(k(i)) do
    k(i).j send data to CH(i)
  end for
end for

```

- Transmission from CHs to the uw-sink

```

for i = 1 to N do
  CH(i) aggregates and forwards directly the data to uw-sink
end for.

```

---

### III.2 Le deuxième algorithme proposé: MH-FEER

MH-FEER imite le premier algorithme proposé, il utilise les mêmes deux premières phases du SH-FEER. Cependant, le processus de transmission des données depuis les CHs vers la station de base est différent en utilisant le routage multi-saut entre les CHs et la station de base. Les données sont transférées à travers de multiples CHs dans la direction de la station de base en choisissant le chemin le plus court par utilisation de l'algorithme glouton. Cette opération sera répétée jusqu'à ce qu'on atteigne la station de base.

Puisque le mode de formation des clusters et la sélection des CHs sont les mêmes que SH-FEER, nous présentons dans la suite le pseudo-code de la partie concernant la transmission de données depuis les CHs jusqu'à la station de base. Nous soulignons que les deux protocoles proposés sont centralisés et contrôlés par la station de base.

---

#### *Phase 3: Data transmission (MH-FEER)*

---

Calcul des distances entre CHs et les distances entre les CHs et la BS ;

For i=1 to N

For j=1 to N do

$$d(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

$$d_{uw-sink}(i) = \sqrt{(x_i - x_{uw-sink})^2 + (y_i - y_{uw-sink})^2 + (z_i - z_{uw-sink})^2}$$

end for

for i=1 to N do

if  $d_{uw-sink}(i) == \text{Min}_{duw-sink}$

CH(i) sends directly to uw-sink

else

for j=1 to N do

if  $(i \neq j) \ \&\& \ d(i, j) == \text{min}(i) \ \&\& \ d_{uw-sink}(i) > d_{uw-sink}(j)$

CH(i) sends data to CH(j)

end if

end for

end if

end for

---

## IV Évaluation

Dans cette section, nous évaluons la performance des algorithmes proposés au moyen de vastes simulations sous Matlab. Tout d'abord, nous définissons les métriques de performance et la méthodologie de simulation, puis nous présentons le modèle d'énergie utilisée. De plus,

nous évaluons comment les paramètres de réseau tels que la densité et la mobilité des nœuds affectent la performance des algorithmes proposés.

Pour mettre en œuvre les algorithmes de routage proposés, nous posons les hypothèses suivantes :

#### IV.1 Hypothèses

Les propriétés suivantes sont utilisées pour le réseau de capteurs simulé :

- Les nœuds capteurs et la station de base sont supposés stationnaires une fois qu'ils sont déployés dans l'environnement.
- La station de base est située hors de la zone des nœuds capteurs.
- Le réseau de capteurs sans fil comprend des nœuds capteurs homogènes.
- Initialement, tous les nœuds capteurs ont la même quantité d'énergie.
- La station de base n'est pas limitée en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul.
- Chaque nœud capteur peut fonctionner soit en mode de détection pour contrôler les paramètres de l'environnement et les transmettre à la station de base, soit en mode CH pour recueillir les données, les compresser et les transmettre à la station de base.

#### IV.2 Modèle d'énergie utilisé

Nous utilisons un modèle d'énergie similaire à celui utilisé dans [89], qui a été proposé particulièrement pour les réseaux acoustiques sous-marins. En se basant sur ce modèle, pour obtenir un niveau de puissance ( $P_0$ ) au niveau d'un récepteur situé à une distance  $d$  d'un émetteur, l'énergie de transmission  $E_{tx}(d)$  est formulée par l'équation IV.4:

$$E_{tx}(d) = P_0 \cdot d^2 \cdot 10^{\frac{\alpha(f)}{10}} \quad (IV.4)$$

Où  $\alpha(f)$ , mesurée en (dB / m), représente le coefficient d'absorption moyen. Ce coefficient dépend d'un intervalle de fréquence d'intérêt sous des conditions spécifiques de température de l'eau et de la salinité,  $\alpha(f)$  est donnée par l'équation IV.5.

$$\alpha(f) = 0.11 \frac{10^{-3}f^2}{1+f^2} + 44 \frac{10^{-3}f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-7}f^2 + 3 \times 10^{-6} \quad (IV.5)$$

Où  $f$  est la fréquence porteuse pour la transmission en kHz. L'énergie de réception est supposée égale à 1 / 3 de l'énergie de transmission.

### IV.3 Résultats de simulation et analyse

Les algorithmes proposés sont testés sur un réseau de 100 nœuds. Les nœuds capteurs sont déployés aléatoirement dans une zone de  $(100 \times 100 \times 100) \text{ m}^3$ ; la station de base est située au point de coordonnées  $(50, 50, 150) \text{ m}$ ; elle est donc au moins à 50 m de distance du nœud capteur le plus proche. Le nombre de CHs est choisi égal à 10, correspondant à la racine carrée du nombre total de nœuds. L'énergie initiale de chaque nœud capteur est égale à 10 Joules. Le tableau IV-1 résume tous les paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Taille du réseau	$(100*100*100) \text{ m}^3$
Nombre de nœuds	100
Énergie initiale	10 J
Coordonnées de la station de base	$(50, 50, 150) \text{ m}$

**Tableau IV-1** Paramètres de simulation

Dans ce travail, deux métriques sont utilisées pour analyser les performances des algorithmes proposés, à savoir la consommation d'énergie totale et le nombre de nœuds vivants.

- La consommation d'énergie totale (ET) est traduite par la somme des énergies consommées par tous les nœuds de capteurs formant le réseau.

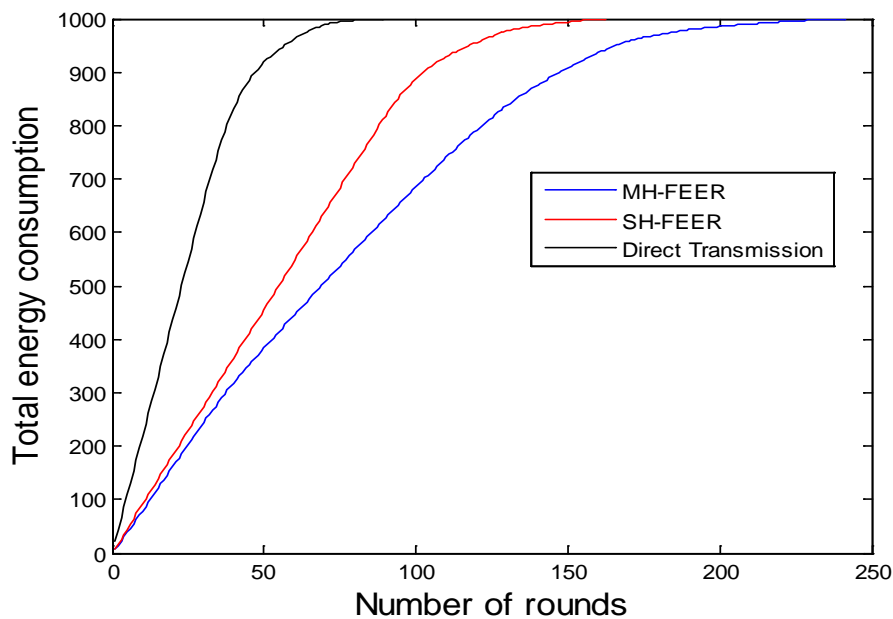
$$E(i)_{\text{consumed}} = E(i)_{\text{initial}} - E(i)_{\text{residual}} \quad (\text{IV.6})$$

$$ET_{\text{consumed}} = \sum_{i=1}^N E(i)_{\text{consumed}} \quad (\text{IV.7})$$

- Le nombre de nœuds vivants correspond au nombre des nœuds où l'énergie est différente de 0 au cours de l'itération (r).

### IV.3.1 Simulation I: topologie Statique

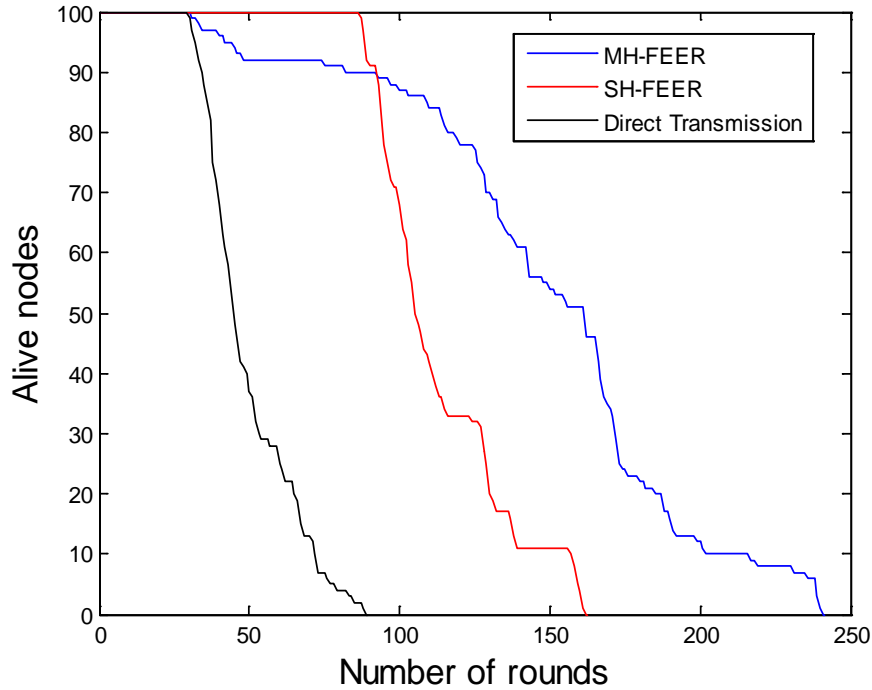
La figure IV-1 présente la consommation d'énergie totale des deux algorithmes proposés et une comparaison est effectuée avec la transmission directe. Comme le montre cette figure, nous observons que l'algorithme MH-FEER consomme moins d'énergie en comparaison avec SH-FEER, cela est dû au mode de transmission multi-saut utilisée par MH-FEER entre les CHs et la station de base. De ce fait, MH-FEER évite les longues transmissions directes depuis les CHs vers la SB employées dans SH-FEER. Nous observons aussi que MH-FEER et SH-FEER consomment moins d'énergie par rapport à l'algorithme de transmission directe.



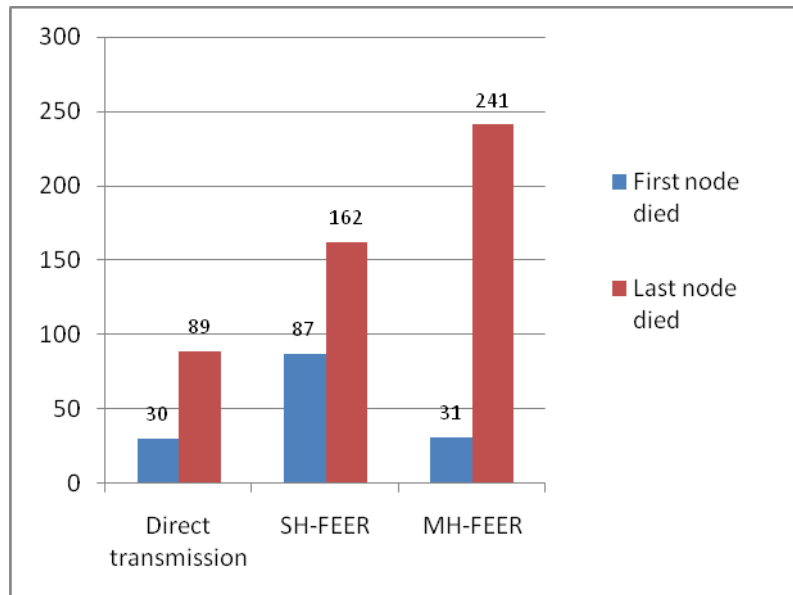
**Figure IV-1** Energie totale consommée vs. Nombre d'itérations (topologie statique)

D'après les résultats illustrés par les figures IV-2 et IV-3, nous pouvons voir que le premier nœud meurt dans l'algorithme de transmission directe après 30 itérations alors que dans SH-FEER et MH-FEER le premier nœud meurt respectivement après 87 et 31 itérations. Nous remarquons également que le dernier nœud meurt dans l'algorithme de transmission directe après 89 itérations alors que dans SH-FEER et MH-FEER le dernier nœud meurt respectivement après 162 et 241 itérations. En conséquence, dans cet ensemble de simulations, nous notons que MH-FEER est environ 32,78% plus efficace en termes de durée de vie du réseau par rapport à SH-FEER, et environ 63,07% plus efficace que l'algorithme de transmission directe.

En outre, le nombre des nœuds vivants diminue rapidement pour l'algorithme de transmission directe et SH-FEER en comparaison avec l'algorithme MH-FEER.



**Figure IV-2** Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations (topologie statique)

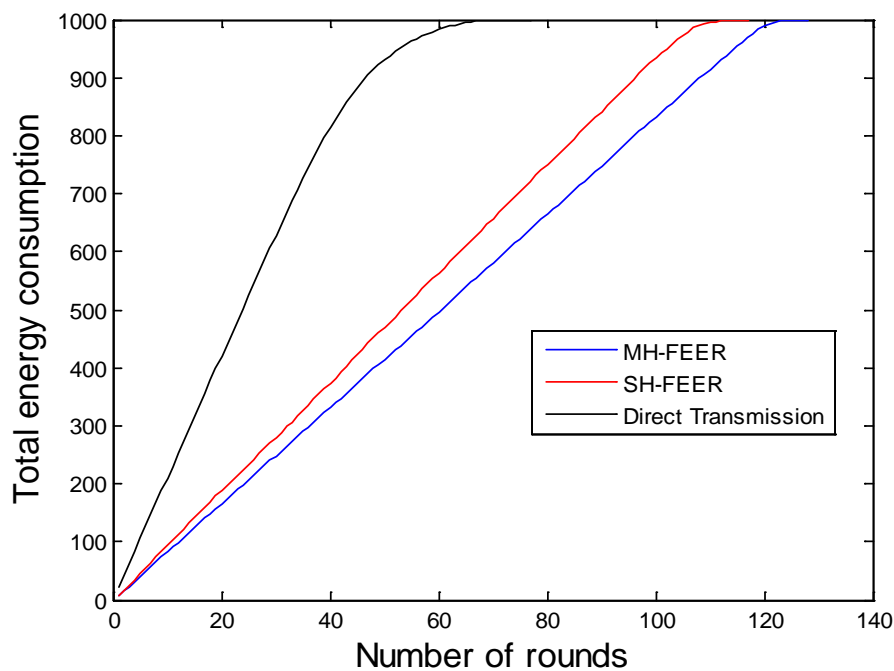


**Figure IV-3** Durée de vie du premier et dernier nœud dans le réseau (topologie statique)

### IV.3.2 Simulation II : la topologie Dynamique

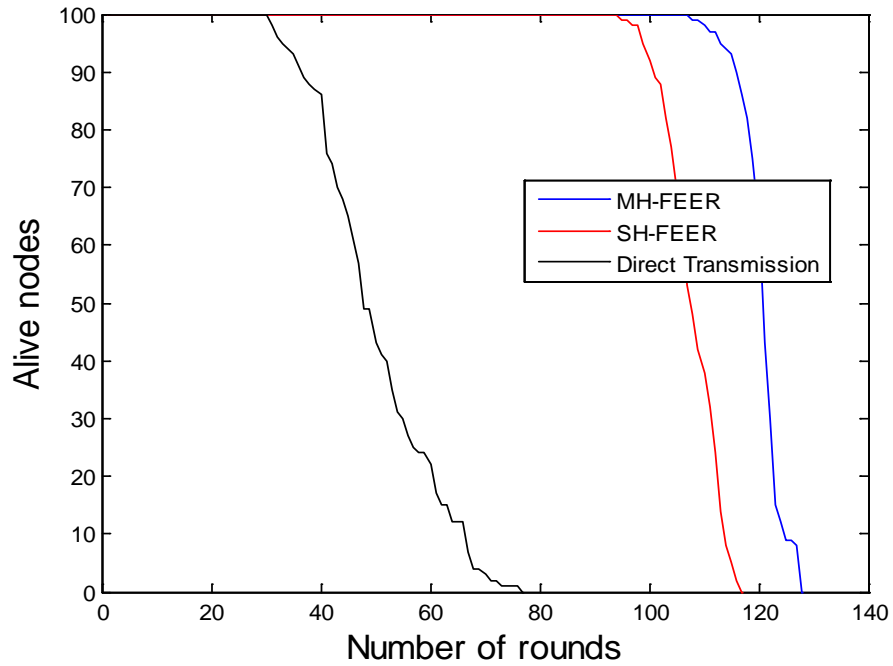
En raison de l'environnement aquatique turbulente (les courants maritimes, mouvement des navires), les capteurs sous-marins deviennent dynamiques, ce qui produit des changements de topologie. Par conséquent, pour qu'on puisse se rapprocher de la réalité de cet environnement, nous avons introduit la mobilité des nœuds dans les conditions de simulation. Considérant cette situation, nous avons utilisé le modèle de mobilité (Random Walk Mobility Model [90]), avec une vitesse des nœuds de 1 m/s, les autres paramètres de simulation sont similaires avec le cas de la topologie statique.

Pour le même nombre de nœuds dans le réseau, la figure IV-4 montre également que la consommation totale d'énergie dans les réseaux dynamiques est significativement élevée comparée aux réseaux statiques. En outre, le nombre des nœuds vivants diminue rapidement par rapport au cas statique (29,37%).

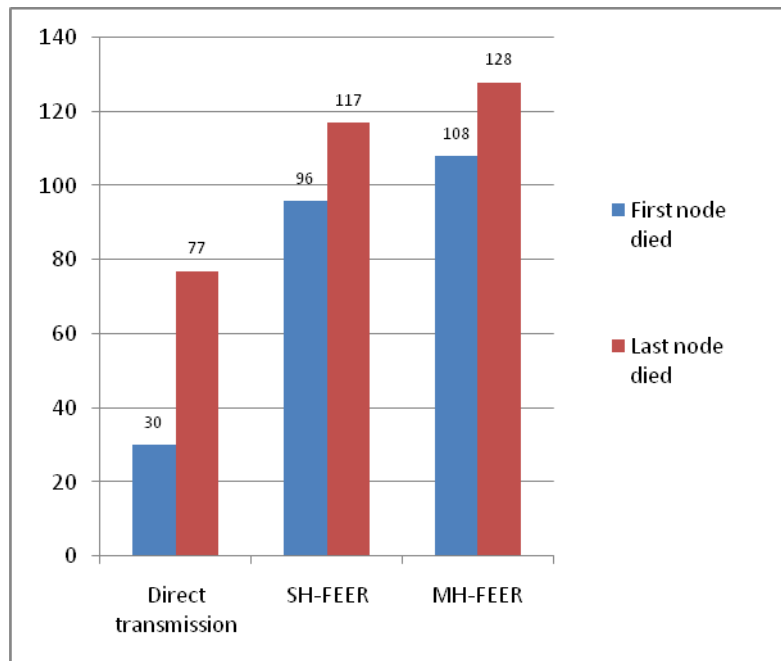


**Figure IV-4** Énergie totale consommée vs. Nombre d'itérations (topologie dynamique)

A partir des résultats présentés dans les figures IV-5 et IV-6, nous pouvons voir que le premier nœud meurt dans l'algorithme de transmission directe après 30 itérations tandis que dans SH-FEER et MH-FEER le premier nœud meurt respectivement après 96 et 108 itérations.



**Figure IV-5** Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations (topologie dynamique)



**Figure IV-6** Durée de vie des premier et dernier nœuds dans le réseau (topologie dynamique)

Nous observons également que le dernier nœud meurt dans l'algorithme de transmission directe après 77 itérations alors que dans SH-FEER et MH-FEER le dernier nœud meurt

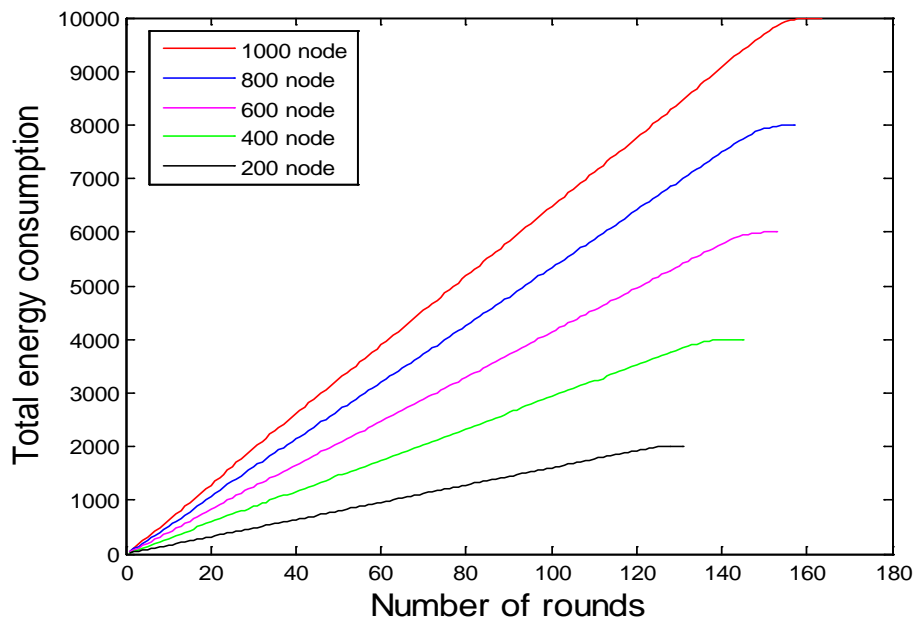


respectivement après 117 et 128 itérations. Par conséquent, dans cet ensemble de simulation, nous notons que MH-FEER est environ 8,5% plus efficace en termes de durée de vie du réseau en comparaison avec SH-FEER et environ 39,84% plus efficace par rapport à l'algorithme de transmission directe.

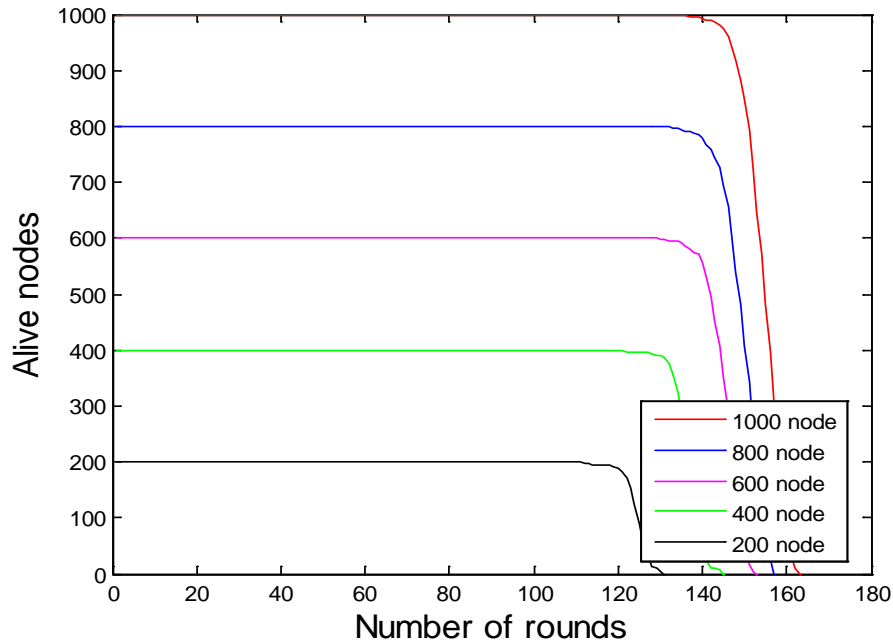
### IV.3.3 Impact de la densité des nœuds

Afin d'examiner l'effet de la densité (ou passage à l'échelle) nous choisissons la seconde proposition MH-FEER pour des réseaux de tailles différentes. Dans cet ensemble de simulations où tous les nœuds sont mobiles avec une vitesse de (1 m/s), nous changeons le nombre de nœuds entre 200 et 1000 nœuds, les résultats des simulations sont exposés dans les figures suivantes.

Les figures IV-7 et IV-8 illustrent respectivement l'effet de la densité des nœuds sur la consommation d'énergie totale et la variation des nœuds restant en vie en fonction du nombre d'itérations. La figure IV-7 montre l'augmentation proportionnelle de la consommation énergétique avec le nombre de nœuds, cela est dû au nombre progressif des nœuds impliqués par la transmission de paquets. Toutefois, le nombre des nœuds vivants reste stable, mais il diminue vers la fin de la simulation.



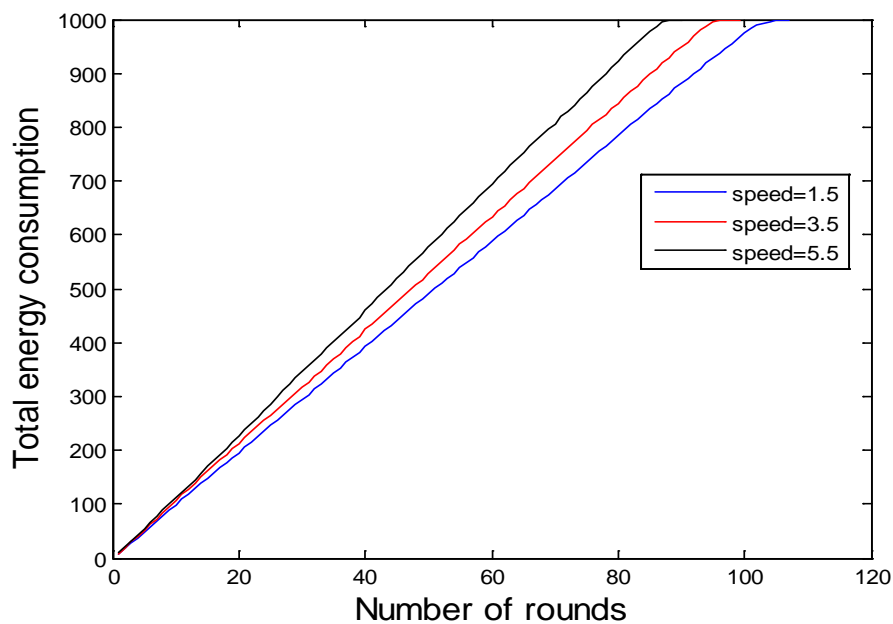
**Figure IV-7** Impact de la densité des nœuds sur l'énergie totale consommée (topologie dynamique)



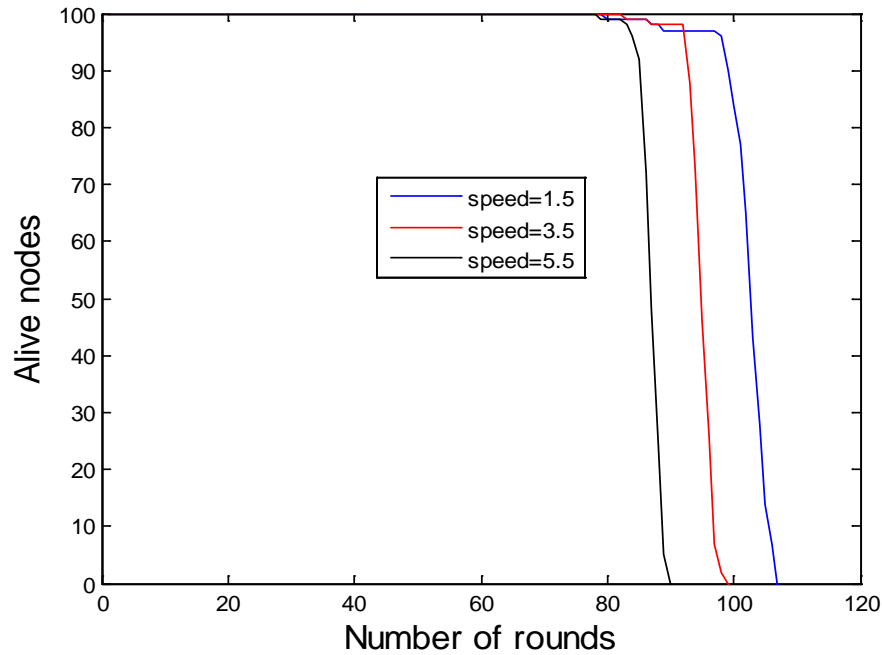
**Figure IV-8** Impact de la densité des nœuds sur le nombre des nœuds vivants (topologie dynamique)

#### IV.3.4 Impact de la mobilité des nœuds

Dans cette section nous voulons tester l'effet de la variation de la vitesse de mobilité de chaque nœud sur la consommation d'énergie totale et aussi sur la durée de vie du réseau. Nous faisons varier la vitesse des nœuds de 1,5 m/s à 5,5 m/s dans un réseau de 100 nœuds.



**Figure IV-9** Impact de la mobilité des nœuds sur l'énergie totale consommée (topologie dynamique)



**Figure IV-10** Impact de la mobilité des nœuds sur le nombre des nœuds vivants  
(topologie dynamique)

On peut voir d'après la figure IV-9 que la consommation d'énergie totale du réseau augmente avec la croissance de la vitesse des nœuds, toutefois, le nombre de nœuds vivants diminue davantage lorsqu'on augmente la vitesse des nœuds, comme il est illustré dans la figure IV-10.

## V Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit deux algorithmes de routage, notés SH-FEER et MH-FEER, dédiés aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Ces protocoles sont basés sur une topologie hiérarchique issue d'un découpage du réseau en plusieurs clusters par la méthode Fuzzy C-Means (FCM). Le routage des données, dans nos deux propositions, se réalise à deux niveaux: intra-clusters et inter-clusters. Nous parlons de routage intra-cluster lorsque les données sont acheminées à l'intérieur du cluster. Lorsqu'il s'agit de la transmission vers la station de base, nous parlons de routage inter-clusters. Les protocoles SH-FEER et MH-FEER choisissent les CHs selon les énergies résiduelles des nœuds mais la différence entre eux réside dans le processus de transmission des données vers la station de base. En fait, MH-FEER est une amélioration de l'algorithme SH-FEER parce que la transmission des données vers la station de base se fait par multi-sauts. Les résultats des simulations montrent que nos schémas proposés présentent des performances supérieures par

rapport à l'algorithme de transmission directe en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau dans les deux types de topologies statiques et dynamiques. De plus, l'impact de la mobilité et le passage à l'échelle pour l'algorithme MH-FEER ont été étudiés. MH-FEER peut être encore amélioré par l'introduction de certains algorithmes intelligents comme les algorithmes des colonies de fourmis spécialement pour découvrir le chemin le plus court entre les CHs et la station de base. Ce traitement constitue l'objet du chapitre suivant.



## **Chapitre V. Routage hybride basé sur les métaheuristiques dans les RCSF-SMs**

## I Introduction

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, la consommation d'énergie et la durée de vie sont devenues deux facteurs clés pour l'évaluation des réseaux de capteurs. En effet, l'objectif de tout type de réseau est d'avoir des nœuds déployés, sans intervention, pour des mois ou des années.

Dans ce cadre, de nombreux protocoles efficaces en termes d'énergie ont été proposés pour acheminer les données à la station de base dans les réseaux de capteurs sans fil. Beaucoup d'entre eux adoptent une approche fondée sur le clustering, dont les nœuds s'organisent sous forme d'un ensemble de clusters, où chaque cluster sera représenté ou géré par un seul nœud élu comme chef de cluster (cluster head). Le choix du cluster head se fait suivant un critère bien déterminé. Une autre famille, basée sur l'utilisation de chaîne au lieu des clusters, a émergé ces derniers temps. Cette approche consiste à regrouper les nœuds du réseau de telle sorte à ce qu'ils forment une chaîne. Ils n'auront ainsi besoin de communiquer qu'avec seulement leurs voisins les plus proches et se relaient dans la communication jusqu'à la station de base. Dans ce cas un seul nœud, appelé (Leader), est sélectionné pour communiquer à la station de base. En fait, l'idée de cette approche est venue pour pallier les lacunes du clustering.

Deux principaux objectifs ont été achevés par cette approche. D'abord, augmenter la durée de vie de chaque nœud en employant des techniques de collaboration et augmenter par conséquent la durée de vie du réseau. En second lieu, permettre seulement la coordination locale entre les nœuds voisins de sorte que la largeur de bande consommée dans la communication soit réduite. A la différence de la première approche, le routage basé sur les chaînes évite la formation de clusters et n'utilise qu'un seul nœud dans une chaîne afin de transmettre à la station de base (SB), au lieu d'en utiliser plusieurs.

En se basant sur ces deux principes, notre objectif dans ce chapitre est de proposer un algorithme de routage hybride, utilisant la technique Fuzzy C-Means (FCM) pour la formation des clusters et une métaheuristique inspiré de la nature, à savoir l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACO) qui sera détaillé dans la section (V.3.3.3), visant à trouver la solution optimale du chemin le plus court vers la station de base.

## II Routage basé sur les chaînes dans les réseaux de capteurs

Le principe du routage hiérarchique basé sur le clustering a été largement utilisé dans les RCSFs grâce à l'avantage majeur de ce type d'architecture qui est le prolongement de la durée de vie du réseau de capteurs. Cependant une nouvelle approche de routage hiérarchique (basée sur les chaînes) a émergé, afin de surmonter les inconvénients de la première (basée sur les clusters). Dans cette approche, les nœuds du réseau sont organisés de façon à former une grande chaîne de voisins proches plutôt que des clusters, où un seul nœud est distingué pour transmettre au sink. En fait, l'idée de formation de chaîne a été proposée pour la première fois dans l'algorithme PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [91, 92]. Dans ce protocole, le nœud peut transmettre et recevoir uniquement les données de son voisin. Chaque nœud est considéré comme un nœud agrégateur, ses données reçues sont traitées et envoyées au prochain nœud de la chaîne. Ainsi à la fin de la chaîne, toutes les données capturées sont fusionnées et transmises par un seul nœud désigné pour communiquer avec la station de base. Les nœuds qui transmettent à la station de base sont choisis, pour un intervalle de temps bien défini, selon la politique de remplacement Round Robin dans le but de répartir équitablement l'énergie consommée durant une itération de transmission.

Plusieurs variantes de PEGASIS ont été proposées telles que Hierarchical PEGASIS qui vise à réduire les délais de transmission par l'envoi simultané de messages et la prise en considération de la métrique (énergie – délai).

Energy-Efficient Pegasus-Based protocol (EEPB) [93,94] adopte un seuil lors de la construction de la chaîne pour réduire la formation de liaison longue (Long Link). La sélection du leader est basée sur deux facteurs: l'énergie résiduelle des nœuds et leurs distances par rapport à la SB. Ainsi il ajuste la fréquence de re-sélection du leader selon les nœuds restants en vie dans le réseau [95].

## III Notions fondamentales sur les métaheuristiques

Afin de résoudre un problème d'optimisation combinatoire, généralement des heuristiques spécialisées sont développées dans le but de résoudre un problème particulier d'optimisation combinatoire.

Les métaheuristiques sont basées sur des heuristiques afin d'explorer l'espace de solutions de manière efficace et non exhaustive, surtout si ce dernier est très grand. Ils sont une évolution logique dans le temps des heuristiques [96]. Parmi ces algorithmes on peut



citer: la recherche Tabou, les algorithmes génétiques, les intelligences en essaims (les colonies de fourmis, les essaims d'abeilles), etc.

### **III.1 Heuristiques et métaheuristiques**

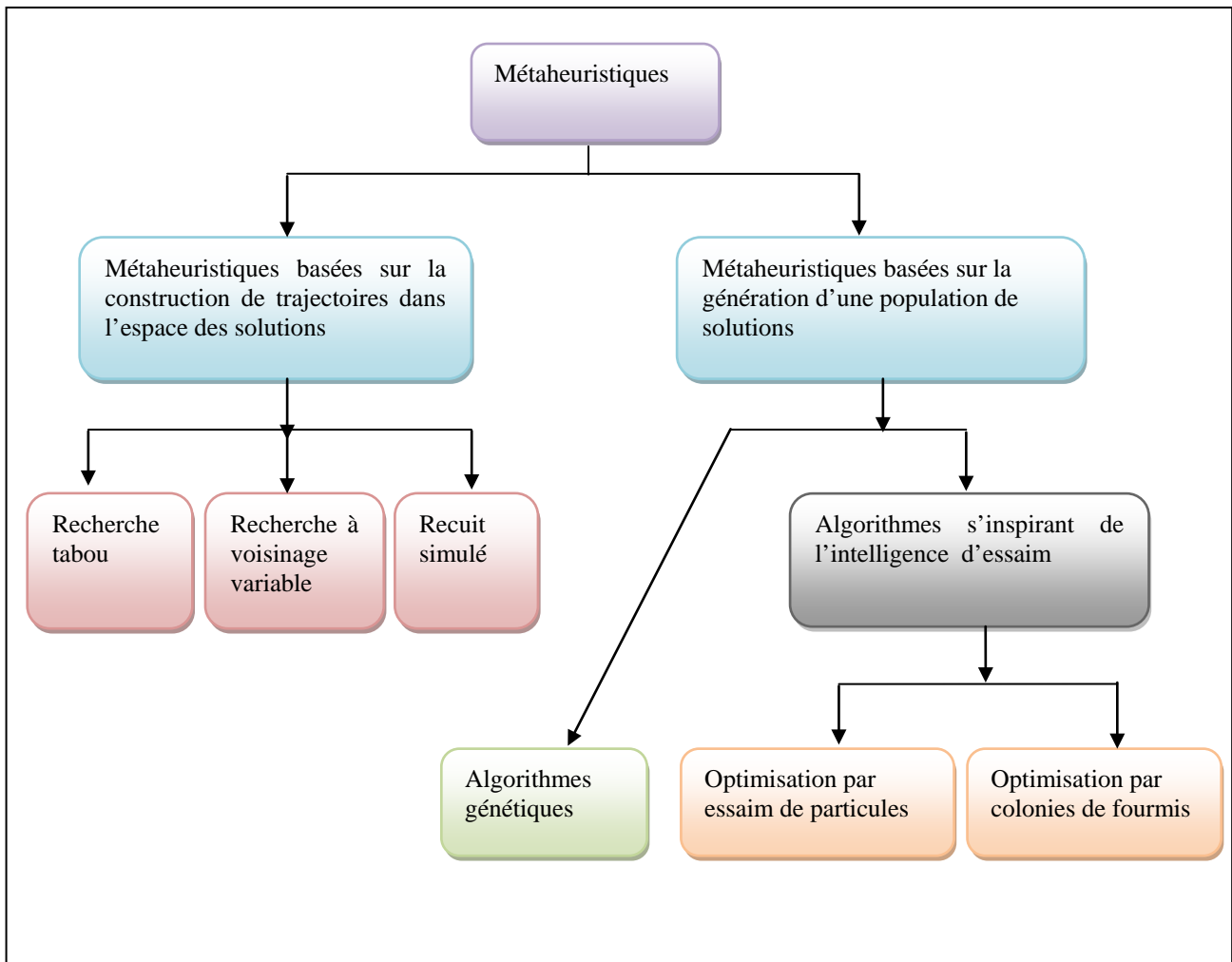
Les premières métaheuristiques datent des années 1980, et bien qu'elles soient d'origine discrète, on peut les adapter à des problèmes continus. Elles sont utilisées généralement quand les méthodes classiques ont échoué, et sont d'une efficacité non garantie. Le terme métaheuristique est utilisé par opposition aux heuristiques particulières pour un problème donné. Les métaheuristiques peuvent être utilisées pour plusieurs types de problèmes, tandis qu'une heuristique est adaptée à un problème donné. Les métaheuristiques ont également comme caractéristiques communes leur caractère stochastique, ainsi que leur inspiration, une analogie avec d'autres domaines de recherche (la biologie, la physique, etc.). Les métaheuristiques ne sont pas des méthodes figées; il n'y a pas de relation d'ordre quant à l'efficacité d'un algorithme ou d'un autre, cela dépend plutôt des paramètres utilisés, de l'application elle-même ou du problème [97].

### **III.2 Classification**

On peut distinguer les métaheuristiques qui font évoluer une seule solution sur l'espace de recherche à chaque itération et les métaheuristiques à base de population de solutions (voir la figure V-1). En général, les métaheuristiques à base de solution unique sont plutôt axées sur l'exploitation de l'espace de recherche, on n'est donc jamais sûr d'obtenir l'optimum. Les métaheuristiques à base de population sont plutôt exploratoires et permettent une meilleure diversification et exploration de l'espace de recherche.

#### ***III.2.1 Les métaheuristiques à solution unique***

Dans cette section, nous présentons les métaheuristiques à base de solution unique, appelées aussi méthodes de trajectoire. Contrairement aux métaheuristiques à base de population, les métaheuristiques à solution unique commencent avec une seule solution initiale et s'en éloignent progressivement, en construisant une trajectoire dans l'espace de recherche. Les méthodes de trajectoire englobent essentiellement la méthode de descente, la méthode du recuit simulé, la recherche tabou, la méthode GRASP, la recherche à voisinage variable, la recherche locale itérée, et leurs variantes.



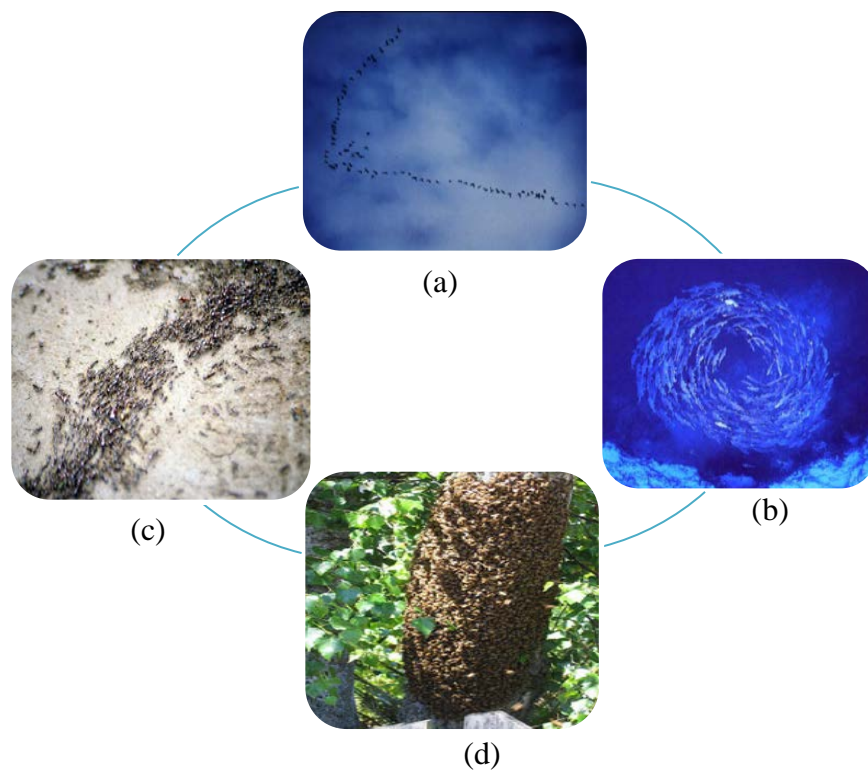
**Figure V-1** Classification des métaheuristiques

### III.2.2 Les métaheuristiques à population de solutions

Contrairement aux algorithmes partant d'une solution singulière, les métaheuristiques à population de solutions améliorent cette population, au fur et à mesure des itérations. On distingue dans cette catégorie, les algorithmes évolutionnaires, qui sont une famille d'algorithmes issus de la théorie de l'évolution par la sélection naturelle, énoncée par Charles Darwin [98] et les algorithmes d'intelligence en essaim qui, de la même manière que les algorithmes évolutionnaires, proviennent d'analogies avec des phénomènes biologiques naturels.

## IV Les stratégies d'optimisations inspirées de la nature utilisée dans les RCSFs

À la fin des années 80, un nouvel axe d'exploration a émergé en intelligence artificielle. Il s'agit de l'étude et de l'utilisation des phénomènes observés dans la nature dans le but de trouver des solutions aux problèmes relatifs aux réseaux de capteurs (voir figure V-2). Les systèmes biologiques ont des propriétés attirantes et peuvent présenter des sources d'inspiration puissantes pour les chercheurs du domaine. Dans cette partie, on va présenter les caractéristiques des systèmes biologiques ainsi que leurs avantages et limites.



**Figure V-2** Auto-organisation dans les systèmes biologiques : (a) un vol groupé d'oiseaux (b) un essaim de poissons (c) Une colonie de fourmis (d) un essaim d'abeilles

### IV.1 Caractéristiques des systèmes biologiques

En effet, ce sont des systèmes composés d'agents très simples, qui peuvent produire des constructions complexes et des solutions à des problèmes non triviaux (tri, parcours optimaux, répartition de tâches, . . .).

Les informaticiens ont repris les principes d'auto-organisation et d'émergence présents dans ces sociétés, pour définir ce que l'on nomme l'intelligence collective. Nous pouvons dire que l'intelligence collective caractérise un système où le travail collectif des entités (non complexes) interagissant entre elles, fait émerger un comportement complexe global.

La méthode de recherche par colonie de fourmis basée sur le dépôt et l'évaporation de pistes de phéromone, et la méthode d'essaims particulaires ne sont que deux méthodes parmi d'autres qui s'inspirent de la biologie. Nous trouvons ainsi, dans la nature, plusieurs exemples qui donnent des idées pour la conception algorithmique. À titre d'exemple, nous pouvons citer les vols groupés d'oiseaux. Ces comportements se trouvent aussi chez des organismes plus simples unicellulaires, comme les bactéries. De nouvelles recherches ont établi que les bactéries utilisent des molécules pour communiquer entre elles. Elles utilisent un réseau composé de liens de cellule à cellule. Elles sont capables de détecter des changements dans leur environnement, s'associer avec des bactéries d'une même espèce, faire des alliances bénéfiques avec d'autres espèces, et prendre l'avantage sur des espèces concurrentes. Ce type de stratégie collective est également attribué aux fourmis, aux abeilles et . . . aux humains.

#### **IV.2 Avantages et limites**

Les avantages liés à l'utilisation d'une telle approche sont :

- la production d'une performance collective supérieure à celle des individus,
- une plus grande adaptation et flexibilité aux environnements réels (en général dynamiques),
- la fiabilité du système dans son ensemble (la perte d'un agent ne met pas en cause le processus général),
- le faible coût des "unités".

Par contre, un certain nombre de problèmes surgissent :

- difficulté pour anticiper la résolution d'un problème par une intelligence émergente,
- problèmes de formulation, de compréhension et de preuve de la résolution,
- nécessité d'un grand nombre d'agents (notion de masse critique), donc risques de conflits,
- risques de comportements oscillatoires ou bloquants,
- pas de coopérations locales intentionnelles, c'est-à-dire des comportements volontairement coopératifs dédiés ou exigés par les individus.

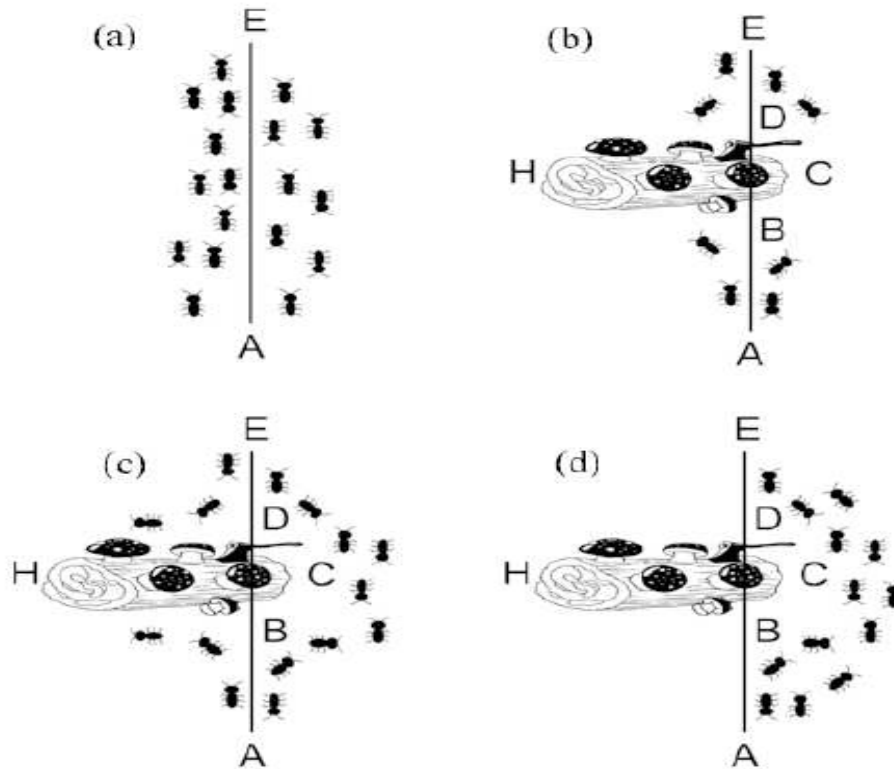
### IV.3 L'algorithme de colonie de fourmis

L'algorithme des colonies de fourmis est basé sur une observation naturelle comme tous les algorithmes évolutionnaires. En 1983, des chercheurs découvrent que les fourmis ont la capacité de toujours trouver le chemin le plus court entre leur nid et une source de nourriture (par exemple) [99]. Ce qui est assez surprenant car la grande majorité des fourmis est aveugle [100].

L'algorithme de colonies de fourmis a été à l'origine principalement utilisé pour produire des solutions quasi-optimales au problème du voyageur de commerce, puis, plus généralement, aux problèmes d'optimisation combinatoire. On observe, depuis ses débuts, que son emploi se généralise à plusieurs domaines, depuis l'optimisation continue jusqu'à la classification, ou encore le traitement d'image [101-108].

Les fourmis sont capables de résoudre collectivement des problèmes complexes, comme trouver le plus court chemin entre deux points dans un environnement accidenté. Pour cela, elles communiquent entre elles de façon locale et indirecte, grâce à une hormone volatile, appelée phéromone: au cours de leur progression, les fourmis déposent une trace de phéromone; elles choisissent ensuite leur chemin de façon aléatoire, selon une probabilité dépendant de la quantité de phéromone précédemment déposée.

Pour mieux comprendre cette particularité, examinons ce qui se passe dans le cas d'une modification environnementale. Initialement, les fourmis utilisent un chemin donné (figure V-3.(a)) entre le nid (A) et la source de nourriture (E). Subitement, une bûche bloque le chemin d'origine. Les fourmis sont donc contraintes de trouver un autre chemin. Dans le sens A vers E, les premières fourmis auront la même probabilité de se diriger à gauche ou à droite de l'obstacle car aucune autre fourmi ne sera passée avant elles. Il n'y a donc aucune trace phéromonale (figure V-3.(b)). Toutefois, une fourmi ayant choisi d'aller à droite (chemin BCD) arrivera en D bien avant une fourmi ayant choisi la gauche. De plus la situation est identique en ce qui concerne le sens E vers A (figure V-3. (c)). Finalement, la quantité de fourmis utilisant l'axe BCD est plus élevée que pour l'axe BHD ce qui entraîne une quantité de phéromone croissante sur l'axe BCD. Après un certain laps de temps, toutes les fourmis devraient (statistiquement) utiliser l'axe BCD (figure V-3.(c)).



**Figure V-3** Description du comportement des fourmis en présence d'un obstacle dans l'environnement : (a) situation initiale, (b) un obstacle s'interpose et les fourmis choisissent d'aller d'un côté ou de l'autre avec la même probabilité, (c) l'axe BCD étant plus court, les fourmis arrivent plus vite de l'autre côté de l'obstacle, (d) le nombre croissant de phéromones fait émerger le chemin BCD.

Le pseudo-code 1 présente le modèle de l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis.

---

**Algorithme 1** : L'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACO)

---

Initialiser les traces de phéromones

**Répéter**

**For** chaque fourmi **Do**

Construction de la solution en utilisant les traces de phéromones

Mettre à jour les traces de phéromones :

- Evaporation ;
- Renforcement ;

**Jusqu'au** critère d'arrêt.

**Sortie** : meilleure solution trouvée ou un ensemble de solutions.

---

Tout d'abord, l'information phéromone est initialisée. L'algorithme est principalement composé de deux étapes itérées: la construction de la solution et la mise à jour de la phéromone.

### IV.3.1 Construction de la solution

La construction de solutions se fait selon une règle de transition d'état probabiliste. Les fourmis artificielles peuvent être considérées comme des procédures stochastiques qui construisent une solution d'une manière probabiliste en ajoutant des parties de solution pour les parties existantes jusqu'à ce qu'une solution complète soit obtenue. Le problème d'optimisation cible peut être vu comme un graphe de décision (ou graphe de construction) où une fourmi va construire un chemin. Habituellement, ce processus itératif prend en compte:

- Les pistes de phéromones: En effet, les pistes de phéromones mémorisent les caractéristiques des "bonnes" solutions générées, qui guideront les fourmis à construire de nouvelles solutions. Les pistes de phéromones changent de façon dynamique lors de la recherche afin de refléter les connaissances acquises. Elles représentent la mémoire de l'ensemble du processus de recherche des fourmis.
- L'information heuristique du problème dépendant: Une information du problème spécifique donne plus d'indices pour les fourmis dans leurs décisions pour construire des solutions.

### IV.3.2 Mise à jour de phéromones

La mise à jour de phéromones est effectuée en utilisant les solutions générées. Une règle globale de mise à jour de phéromones est appliquée en deux phases:

- Une phase d'évaporation où la piste de phéromones diminue automatiquement. Chaque valeur de phéromone est réduite d'un pourcentage fixe:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}, \forall i, j \in [1, n] \quad (V.1)$$

Où  $\rho \in ]0, 1]$  représente le taux de réduction de phéromone. Le but de l'évaporation est d'éviter pour toutes les fourmis une convergence prématurée vers des «bonnes» solutions et d'encourager la diversification dans l'espace de recherche (exploration).

- Une phase de renforcement où la piste de phéromone est mise à jour en fonction des solutions générées. Trois stratégies différentes peuvent être appliquées [109]:

1. Mise à jour en ligne de phéromone étape par étape: La piste de phéromone  $\tau_{ij}$  est mise à jour par une fourmi à chaque étape de la construction de la solution [110].
2. Mise à jour en ligne retardée de phéromone: La mise à jour de la phéromone  $\tau$  est appliquée une fois lorsqu'une fourmi génère une solution complète [111]. Par exemple, dans

l'ACS (Ant Colony System), chaque fourmi va mettre à jour les informations de phéromone avec une valeur qui est proportionnelle à la qualité de la solution trouvée.

Plus la solution trouvée est meilleure, plus la phéromone accumulée est forte.

3. Mise à jour hors ligne de phéromone: La mise à jour de train de phéromones est appliquée une fois que toutes les fourmis auront produit une solution complète. C'est l'approche la plus populaire où différentes stratégies peuvent être utilisées [112] :

– Mise à jour de phéromone basée sur la qualité: Cette stratégie met à jour la valeur de la phéromone associée à la meilleure solution trouvée par toutes les fourmis (ou les meilleures solutions de  $k$ , où  $k$  est un nombre plus petit que le nombre de fourmis) [113]. Les valeurs ajoutées dépendent de la qualité des solutions choisies. Par exemple, pour chaque composant appartenant à la meilleure solution, une valeur positive est ajoutée :

$$\tau_{i\pi^*(i)} = \tau_{i\pi^*(i)} + \Delta, \quad \forall i, j \in [1, n] \quad (\text{V.2})$$

– Mise à jour basée sur le rang: Les meilleures solutions de fourmis  $k$  sont autorisées à mettre à jour la phéromone avec une quantité dépendant du rang des solutions [114].

– Mauvaise mise à jour de phéromone: La fourmi générant la pire solution diminue les pistes de phéromone liées aux composants de la solution [115].

– Mise à jour élitiste: La meilleure solution trouvée jusqu'à présent mettra à jour la phéromone pour appliquer une intensification de la recherche [116]. Une valeur minimum (respectivement maximum) de la phéromone est définie tel que chaque choix a une probabilité minimum (respectivement maximum) pour être sélectionnée.

#### IV.4 Algorithme ACO pour le problème de voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce (Travelling Salesman Problem, TSP) [117, 118] a fait l'objet de la première implémentation d'un algorithme de colonies de fourmis: le "Ant System" (AS). AS était la première application de l'ACO dans le domaine de l'optimisation combinatoire [119]. Il est intéressant d'approfondir le principe de ce premier algorithme pour bien comprendre le mode de fonctionnement des algorithmes de colonies de fourmis. Le problème de voyageur de commerce consiste à trouver le trajet le plus court reliant  $n$  villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois. Le problème est généralement défini comme un graphe complètement connecté [120]. Soit  $G = (N, A)$  le graphe d'entrée où les villes sont les nœuds  $N$  et les trajets entre les villes, les arrêtes  $A$ . La conception d'un algorithme ACO pour le problème de voyageur de commerce nécessite la définition des pistes de phéromone et la procédure de construction de la solution (algorithme 2).



**Algorithme 2: ACO-TSP**


---

```

Initialiser l'information phéromone ;
while critère de fin non rencontré do
  for chaque fourmi do
    Construction des solutions en utilisant les pistes de phéromones :
    -  $S = \{1, 2, \dots, n\}$  ensembles des villes potentiellement sélectionnées
    - Sélection aléatoire de la ville initiale  $i$  ;
    - while  $S \neq \emptyset$  do
      Sélectionner une nouvelle ville  $j$  avec la probabilité
      
$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta}{\sum_{k \in S} \tau_{ik}^\alpha \times \eta_{ik}^\beta} ;$$

       $S = S - \{j\}; i = j;$ 
    end
  end
  Mettre à jour la piste de phéromone :
  for  $i, j \in [1, n]$  do
     $\tau_{ij} = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}$  Evaporation;
  end
  for  $i \in [1, n]$  do
     $\tau_{i\pi(i)} = \tau_{i\pi(i)} + \Delta;$   $\pi$  est la meilleure solution trouvée
  end
end
Sortie : Meilleure solution trouvée ou un ensemble de solutions

```

---

- **Pistes de phéromone:** Une phéromone  $\tau_{ij}$  sera associée à chaque arête  $(i, j)$  du graphe  $G$ . L'information phéromone peut être représentée par une matrice  $(n \times n)$  où chaque élément  $\tau_{ij}$  de la matrice exprime son souhait d'avoir l'arête  $(i, j)$  dans son trajet. La matrice de phéromone est généralement initialisée par les mêmes valeurs. Pendant la recherche, la phéromone sera mise à jour afin d'estimer l'utilité de n'importe quelle arête du graphe.
- **Construction de la solution:** Chaque fourmi va construire une tournée d'une manière stochastique. En partant d'une ville initiale arbitraire  $i$ , une fourmi choisira la prochaine ville  $j$  avec la probabilité

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{k \in S} \tau_{ik}} \quad (\text{V.3})$$

où  $S$  et  $\tau_{ij}$  représentent respectivement l'ensemble des solutions non encore visitées du graphe  $G$  et l'intensité de la piste. Les fourmis peuvent utiliser une ville initiale sélectionnée de façon aléatoire dans la phase de construction.

L'heuristique du problème dépendant supplémentaire est définie selon les valeurs  $\eta_{ij}$  égales à  $1/d_{ij}$  ( $\eta_{ij}$ s'appelle visibilité) où  $d_{ij}$  représente la distance entre les villes  $i$  et  $j$ . Plus la valeur heuristique de  $\eta_{ij}$  est grande, plus la distance  $d_{ij}$  entre les villes  $i$  et  $j$  est courte. En calculant les décisions des probabilités de déplacement,  $p_{ij}$  est calculée comme suit :

$$p_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \times \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in S} \tau_{ik}^{\alpha} \times \eta_{ik}^{\beta}}, \quad \forall j \in S \quad (\text{V.4})$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste  $\tau_{ij}$ , et de la visibilité  $\eta_{ij}$ . Si  $\alpha = 0$ , l'algorithme ACO sera semblable à un algorithme glouton stochastique dans lequel les villes les plus proches sont plus susceptibles d'être choisies. Si  $\beta = 0$ , seules les pistes de phéromones guident la recherche. Dans ce cas, une émergence rapide de stagnation peut se produire lorsque toutes les fourmis vont construire la même tournée optimale.

Par conséquent, un bon compromis doit être trouvé dans l'utilisation de ces deux types d'informations.

Ensuite, la procédure de mise à jour de la phéromone doit être spécifiée. Par exemple, chaque fourmi incrémente la phéromone associée à des arêtes sélectionnées d'une manière proportionnelle à la qualité de la tournée  $\pi$  obtenue:

$$\tau_{i\pi(i)} = \tau_{i\pi(i)} + \Delta, \quad \forall i \in [1, n] \quad (\text{V.5})$$

où  $\Delta = 1/f(\pi)$ . Alors, les bons tours apparaîtront comme le résultat de la coopération entre les fourmis à travers les pistes de phéromones. La procédure d'évaporation classique est appliquée pour les pistes de phéromones. Pour chaque arête, sa phéromone  $\tau_{ij}$  va s'évaporer comme suit:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}, \quad \forall j \in [1, n] \quad (\text{V.6})$$

Où  $\rho \in ]0, 1]$  représente le taux de réduction de la phéromone.

## V Contribution

Dans notre contribution, notée CCRA (Clustered Chain based Routing Algorithm), différents outils sont combinés pour surmonter le problème de l'épuisement de l'énergie dans les RCSF-SMs. Nous proposons un algorithme où nous avons appliqué en premier lieu l'algorithme FCM pour former un nombre prédéfini de clusters. Dans un deuxième temps, l'algorithme ACO est utilisé pour construire une chaîne locale au niveau de chaque cluster et par la suite une chaîne globale sera créée pour relier les leaders à la station de base.

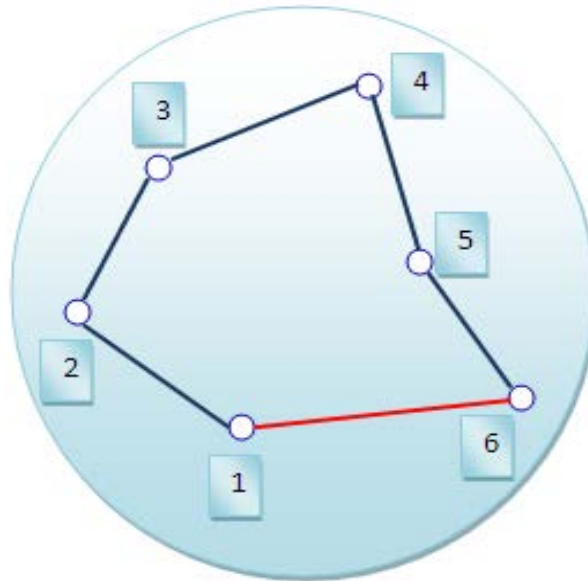
L'algorithme CCRA se construit en trois phases :

- 1) Formation des clusters et des chaînes.
- 2) Sélection du nœud Leader.
- 3) Transmission des données.

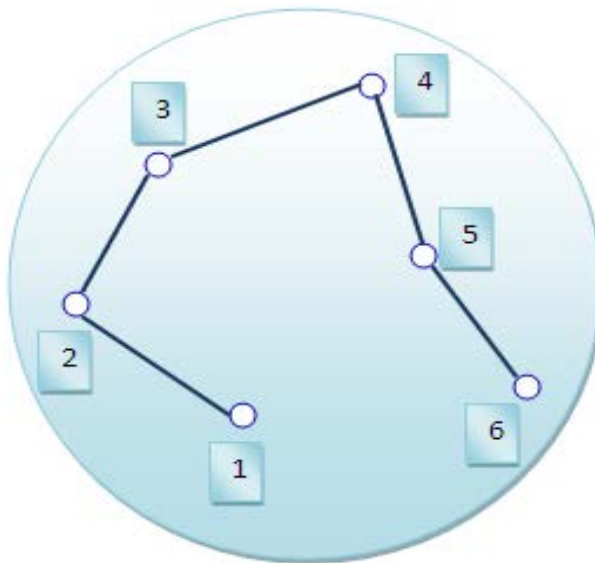
### V.1 Phase 01: formation des clusters et des chaînes

Nous considérons le scénario d'une application où  $N$  nœuds capteurs sont déployés de manière aléatoire dans un domaine 3D d'une surface de  $(M * M * M) m^3$ . Après avoir distribué les nœuds, en échangeant des informations entre la SB et les nœuds capteurs, la station de base obtient une connaissance globale de l'emplacement et de l'énergie de tous les nœuds du réseau. Ensuite, la station de base divise la zone de détection en un nombre prédéfini de clusters de taille inégale. Le nombre de clusters «  $C$  » est choisi égal à la racine carrée du nombre total des nœuds utilisés. Dans la suite, la (SB) calcule les centres des clusters et attribue tous les nœuds capteurs à leurs clusters en appliquant l'algorithme FCM.

Après la formation des clusters, les nœuds dans chaque cluster seront regroupés sous forme d'une seule chaîne appelée «chaîne inférieure» par l'utilisation de l'algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimization). Un chef de chaîne appelé « leader » sera élu pour chaque chaîne pour communiquer avec un autre leader ou avec la station de base. La figure V-4 montre un exemple de cluster contenant six nœuds interconnectés pour former une chaîne fermée. Cette chaîne est obtenue en utilisant l'algorithme d'optimisation de colonie de fourmis tel qu'il est utilisé dans TSP. Ensuite, on enlève la plus grande distance entre deux nœuds consécutifs afin d'obtenir la plus courte chaîne ouverte. Sur la figure V-5, la ligne entre les nœuds 1 et 6 est supprimée. Par la suite une chaîne globale sera construite par le même algorithme (ACO), contenant tous les « $C$ » leaders ainsi que la station de base.

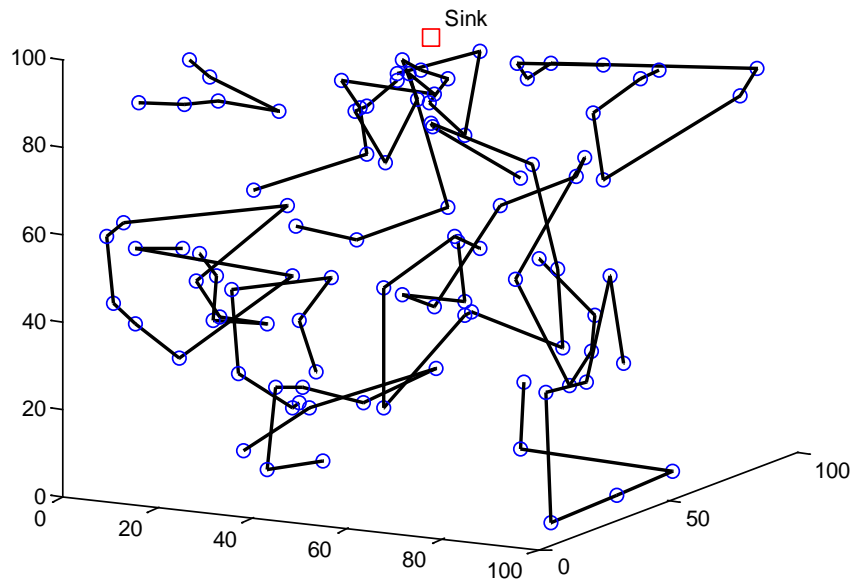


**Figure V-4** Construction de la chaîne fermée

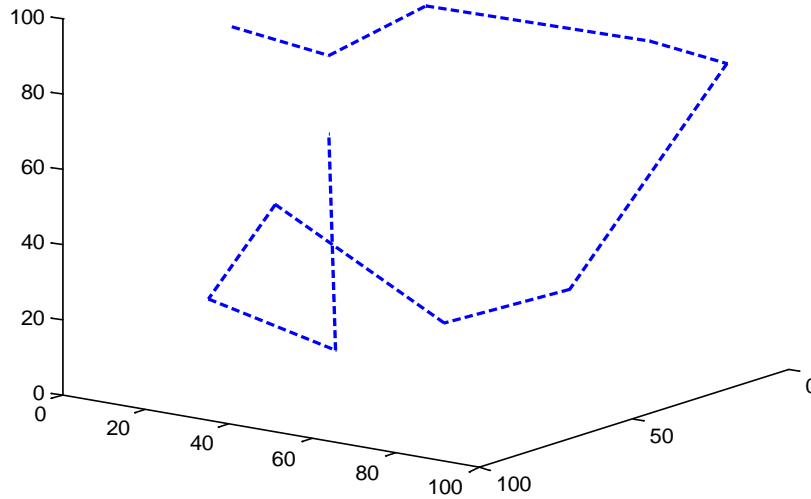


**Figure V-5** Construction de la chaîne ouverte

La figure V-6 illustre le principe de fonctionnement de notre algorithme où les lignes noires représentent la chaîne inférieure qui relie les nœuds dans chaque cluster tandis que les lignes en bleu pointillées de la figure V-7 représentent la chaîne globale reliant les nœuds leaders et la (SB).



**Figure V-6** Formation des chaînes inférieures dans chaque cluster



**Figure V-7** Formation de la chaîne globale

**V.2 Phase 02: sélection du nœud Leader**

Après la création de l'infrastructure du réseau par la technique FCM, plusieurs chaînes inférieures et une chaîne globale sont formées avec les capteurs déployés, le processus d'élection du leader se fait localement dans chaque cluster. Initialement, le leader sera

positionné au centre de la chaîne, mais pour les itérations à venir, l'énergie résiduelle de chaque nœud sera calculée, le nœud qui a le plus d'énergie sera qualifié comme un leader.

En outre, notre algorithme incorpore une rotation du rôle de leader dans la chaîne après chaque itération pour éviter l'épuisement rapide des batteries de certains capteurs spécifiques. Ainsi, de cette manière, la consommation d'énergie est distribuée.

### **V.3 Phase 03: transmission des données**

Après la formation des chaînes et la sélection des leaders, les capteurs commencent la collection des données pour les transmettre à la station de base. Le mécanisme du passage de jeton est adopté pour initier la transmission de données comme il est utilisé dans le protocole PEGASIS.

Chaque nœud d'extrémité de la chaîne commence la transmission au nœud suivant le long de la chaîne inférieure. Le nœud de la prochaine position reçoit les données et les fusionne avec les siennes, ensuite les envoie à un autre voisin dans la chaîne. De cette manière les données se propagent du nœud le plus éloigné de la chaîne jusqu'au leader. Ensuite, la même approche de transmission de données est utilisée dans la chaîne globale.

## **VI Évaluation**

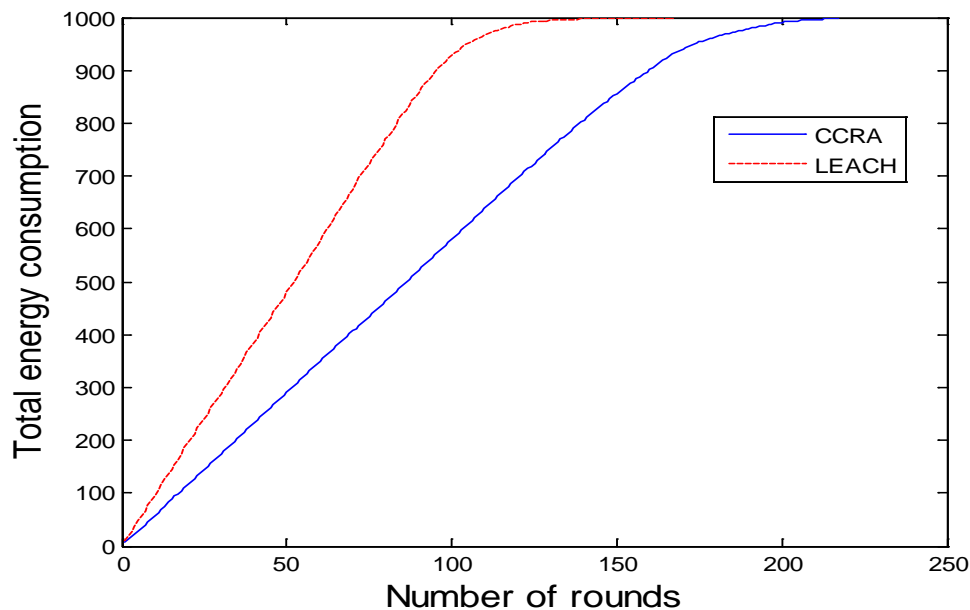
Les expériences de simulation menées ont été effectuées sous l'environnement Matlab (version R2012a). Un réseau de capteurs dense de 100 nœuds est réparti aléatoirement dans un espace à trois dimensions ( $100 * 100 * 100$ ) m<sup>3</sup>. Le réseau est considéré homogène et chaque capteur est supposé avoir une énergie initiale de 10 Joules. Afin d'avoir un grand nombre de sauts, une station de base est déployée au point (50, 50, 150), la station de base n'est pas limitée en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul. Tous les autres nœuds du réseau sont mobiles en utilisant un modèle de mobilité «random walk mobility model» [90]. Chaque nœud capteur peut fonctionner soit en mode de détection pour contrôler les paramètres de l'environnement et les transmettre à la station de base, soit en mode leader pour recueillir les données, les compresser et les transmettre à la station de base.

Le modèle d'énergie utilisé dans cet ensemble de simulations est identique au modèle utilisé dans nos algorithmes proposés dans le chapitre IV.

### **VI.1 L'efficacité énergétique**

Nous avons exécuté des simulations pour évaluer et comparer les performances de notre algorithme proposé avec le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

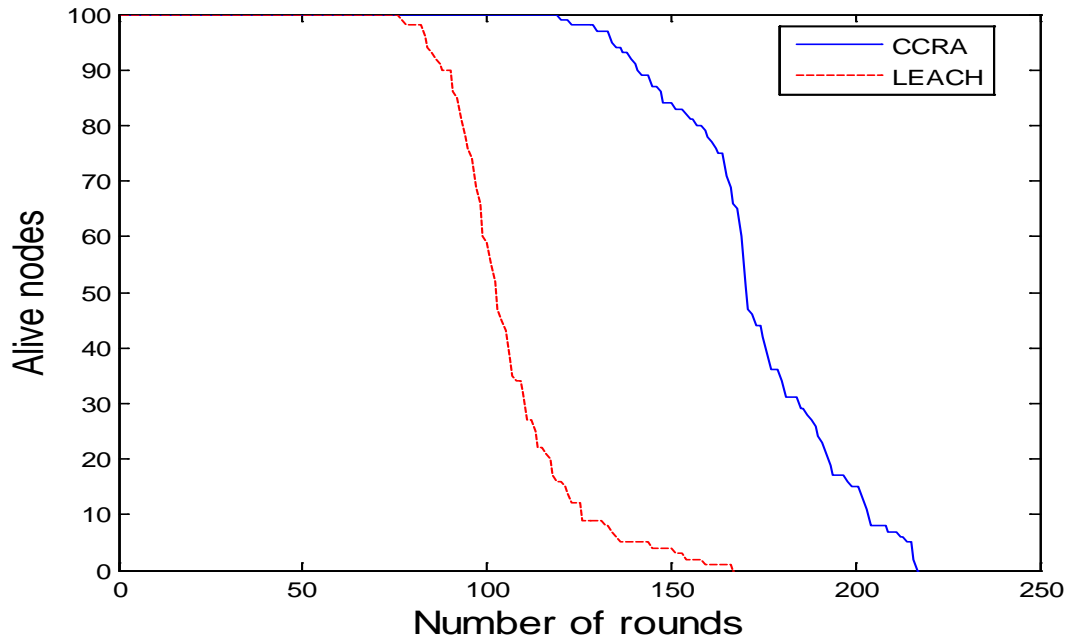
[121], adapté aux caractéristiques aquatiques. Deux métriques clés sont évaluées, à savoir la consommation totale d'énergie et la durée de vie du réseau. La consommation totale d'énergie est définie comme la somme des quantités d'énergie consommées par tous les nœuds capteurs qui forment le réseau. La durée de vie du réseau est définie comme la durée jusqu'à ce que le dernier nœud épuise toute son énergie. Comme on peut le voir sur la figure V-8, l'énergie totale requise ne cesse d'augmenter avec l'augmentation du nombre des itérations. A partir de cette figure, on peut voir également que notre algorithme se trouve plus économe en termes d'énergie et conserve la quantité totale d'énergie utilisée dans le réseau. Ceci est dû aux éliminations des longues distances de transmissions entre les nœuds membres du cluster et le CH, et entre le CH et la station de base. De plus, dans notre approche la quantité des données pouvant être reçue par le leader est au plus deux messages, contrairement au protocole LEACH, appliqué par exemple à un réseau de 100 nœuds, répartis en 5 clusters de 20 nœuds, où chaque CH reçoit 20 messages.



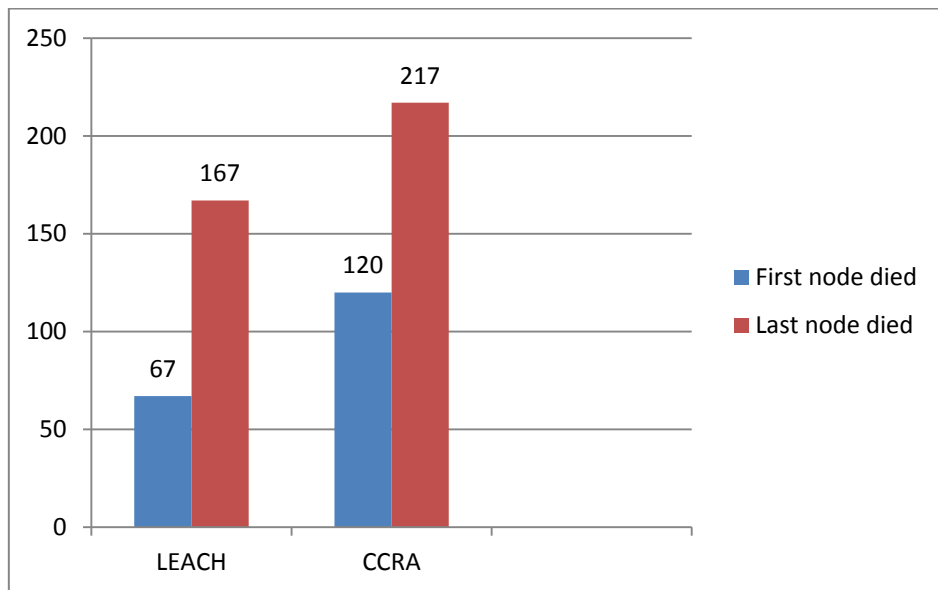
**Figure V-8** Énergie totale consommée vs. Nombre d'itérations

## VI.2 La durée de vie du réseau

A partir des résultats de simulation présentés dans les figures V-9 et V-10, nous pouvons remarquer que le premier nœud meurt dans LEACH après 67 itérations alors que dans l'algorithme CCRA le premier nœud meurt après 120 itérations. Nous observons également que le dernier nœud meurt dans le protocole LEACH après 167 itérations alors que dans l'algorithme proposé après 217 itérations.



**Figure V-9** Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations



**Figure V-10** Durée de vie du premier et dernier nœud dans le réseau

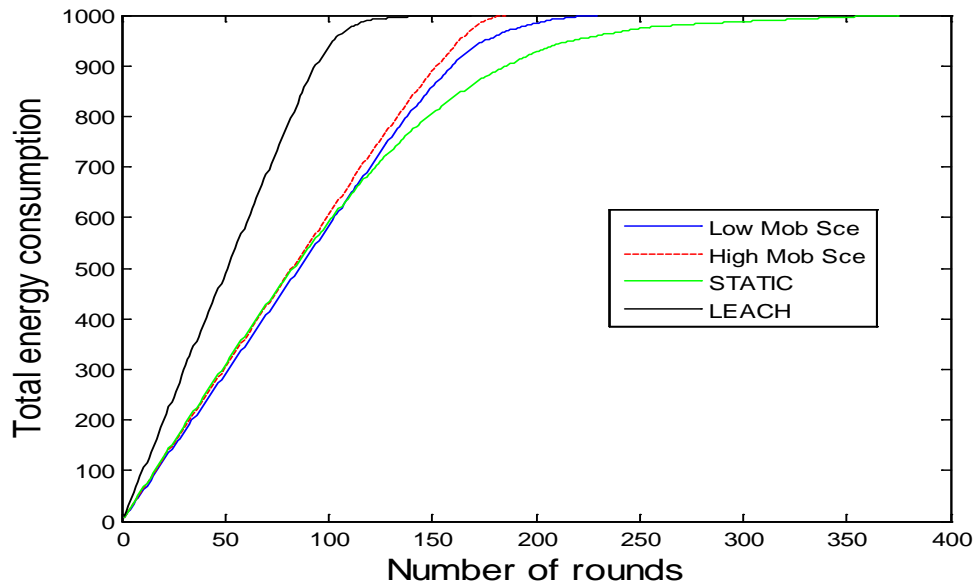
Par conséquent, nous pouvons voir que notre algorithme CCRA atteint un meilleur équilibre de la charge et par conséquent il est efficace en termes d'énergie par rapport à LEACH. CCRA offre encore une durée de vie plus étendue que LEACH qui est d'environ 23, 04%. De ce fait, on peut déduire que CCRA augmente la durée de vie et la qualité du réseau en répartissant la charge de l'énergie de manière équilibrée entre tous les nœuds.



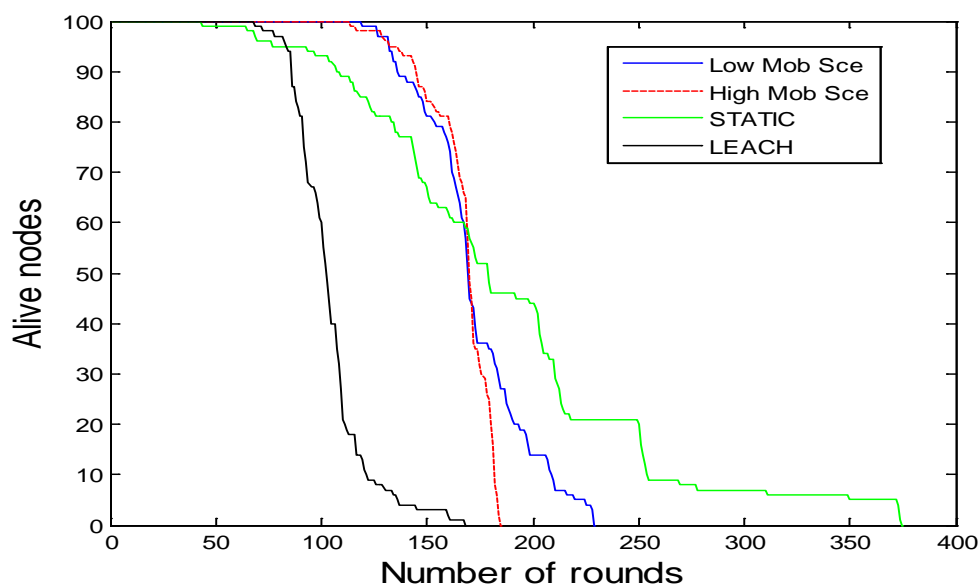
### VI.3 Impact de la mobilité

Dans cette section, nous comparons l'algorithme CCRA selon différents scénarios de mobilité (bas, haut), scénario statique et le protocole LEACH.

- scénario statique: les nœuds sont déployés aléatoirement sur une position prédéfinie.
- scénario de mobilité basse: la vitesse de chaque nœud va de 0 m/s à 5 m/s.
- scénario de mobilité haute: la vitesse de chaque nœud va de 5 m / s à 20 m / s.



**Figure V-11** Consommation totale d'énergie vs. Nombre d'itérations sous différents scénarios de mobilité



**Figure V-12** Nombre de nœuds restant en vie vs. Nombre d'itérations sous différents scénarios de mobilité

D'après la figure V-11, on observe que notre protocole CCRA est beaucoup plus efficace en termes d'énergie par rapport à LEACH dans tous les scénarios de mobilité étudiés. La comparaison de l'algorithme CCRA sous différents scénarios de mobilité montre qu'en dessous de l'itération 115, la consommation totale d'énergie des trois scénarios est presque identique. Par contre au-dessus de 115<sup>ième</sup> itération, la consommation totale d'énergie par les deux scénarios de mobilité est plus importante que le cas statique. Ceci est dû au fait que ces scénarios tiennent compte du mouvement des nœuds ce qui provoque davantage d'énergie consommée. Ainsi, on peut remarquer que plus le taux de mobilité augmente plus la consommation d'énergie s'accroît.

En général, nous pouvons déduire de la figure V-12 que le nombre des nœuds vivant dans l'algorithme CCRA est toujours plus élevé par rapport au protocole LEACH même en variant les trois scénarios de mobilité. On remarque aussi sur cette figure que le nombre de nœuds vivants de l'algorithme CCRA décroît lorsqu'on augmente la vitesse des nœuds.

## **VII Conclusion**

Dans ce travail, nous avons proposé un algorithme de routage hybride économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Notre algorithme CCRA utilise une technique de clustering (FCM). Cette technique a la possibilité de regrouper le réseau en plusieurs nombres de clusters. Afin d'optimiser la consommation énergétique dans cette technique, nous avons intégré dans cet algorithme une technique permettant une construction des chaînes, basée sur l'algorithme des colonies de fourmis (ACO).

Les résultats obtenus montrent la bonne performance de notre algorithme hybride par rapport au protocole LEACH, qui lui est basé uniquement sur le clustering. L'algorithme hybride CCRA, offre encore une durée de vie plus étendue que LEACH qui est d'environ 23,04%. Finalement, notre algorithme CCRA est non seulement efficace en termes d'énergie, mais il reste très résistant sous différents scénarios de mobilité.

## **Conclusion générale**

## I Principales contributions

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé des solutions permettant d'offrir une meilleure prise en compte des ressources énergétiques du réseau. La première solution représente deux algorithmes basés sur le clustering appelés SH-FEER, MH-FEER. La deuxième solution est un algorithme de routage hybride qui combine les deux concepts : clustering et la construction des chaînes basant sur l'algorithme de colonies de fourmis.

Un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil sous-marins et le routage dans ce type de réseau présenté dans la première partie, nous a permis de mettre en lumière les différentes facettes des réseaux de capteurs sans fil sous-marins à savoir leurs caractéristiques uniques et leurs différences avec les réseaux de capteurs sans fil terrestres. Ainsi parmi les médiums de communication adéquate pour l'acheminement des données (électromagnétique, optique et acoustique), l'onde acoustique s'avère le meilleur moyen de transmission sous l'eau grâce aux bonnes performances offertes.

Nous avons également présenté les contraintes confrontées par ce type de réseaux ainsi que leurs importantes applications dans multiples domaines. En outre, on a exposé les différentes architectures de communication proposées pour les RCSF-SMs.

Nous avons, par la suite menés une étude et une analyse de plusieurs protocoles de routage, ces protocoles ont été classifiés en trois catégories, selon la structure du réseau, la transmission de données et le fonctionnement du protocole. Parmi ces protocoles, nous nous sommes intéressés plus précisément à ceux qui traitent le problème de la consommation d'énergie.

Afin de bien améliorer la consommation énergétique et d'augmenter la durée de vie du réseau, nous avons proposé, dans la deuxième partie, deux algorithmes qui partagent le même concept de construction des clusters à savoir l'algorithme "Fuzzy C-Means". En utilisant ce dernier, les clusters ont une meilleure organisation où la distance moyenne de chaque nœud du cluster est minimisée. L'algorithme Fuzzy C-Means est plus efficace pour équilibrer la charge du réseau et distribuer les nœuds entre les clusters. Les deux algorithmes proposés SH-FEER, MH-FEER diffèrent dans leur mode de transmission des données à la station de base. Une étude comparative a été effectuée entre ces deux algorithmes, ses deux algorithmes proposés ont été simulés pour des réseaux statiques et dynamiques, les résultats obtenus ont

prouvé que le deuxième algorithme proposé appelé MH-FEER offre de bonnes performances en terme de consommation énergétique et des nombres de nœuds restant en vie dans le réseau.

A la suite, nous avons proposé un algorithme hybride qui utilise à la fois le routage basé sur le clustering et le routage basé sur les chaînes. L'algorithme « CCRA » est caractérisé par la répartition des nœuds en plusieurs clusters en utilisant l'algorithme FCM (Fuzzy C-Means), à l'intérieur de chaque cluster une chaîne sera formée en reliant tous les membres du cluster, le nœud qui a le plus d'énergie résiduelle sera élu comme leader. Au niveau de chaque chaîne, la communication est effectuée par l'utilisation d'un algorithme d'optimisation par colonie de fourmis pour trouver le chemin le plus court qui relie les nœuds du cluster.

Une chaîne globale reliant les nœuds leaders et la station de base sera construite par la suite. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme proposé prolonge la durée de vie du réseau de 23.04% par rapport au LEACH.

Cet algorithme a été testé sur des réseaux statiques ainsi sur différents scénarios de mobilité (faible, haut).

## II Perspectives et nouveaux défis

Nous pouvons proposer comme perspectives de continuité à ce travail les points suivants :

- La formation des clusters et la sélection des CHs sont deux volets importants pour le routage hiérarchique dédié aux applications de réseaux de capteurs sans fil sous marins et peuvent considérablement affecter la dissipation d'énergie dans le réseau. De ce fait, il est essentiel de trouver davantage des solutions efficaces pour pallier ce problème.
- En ce qui concerne les méthodes d'optimisation de chemin, il est important d'explorer et combiner d'autres méthodes métaheuristiques inspirées de la nature afin de minimiser davantage le chemin de transmission vers la station de base et par la suite de comparer les performances en termes de consommation d'énergie et d'espace mémoire.
- Les réseaux de capteurs sous-marins souffrent du manque d'un modèle réaliste de mobilité des nœuds. La plupart des protocoles de routage appliquent le modèle de mobilité « random walk mobility model », et un certain nombre d'entre eux emploient d'autres modèles de mobilité tels que « Random Way point ». Cependant, ces modèles de mobilité ne reflètent pas le mouvement réel dans l'environnement sous-marin. Par conséquent, la

conception d'un nouveau modèle de mobilité pour les environnements sous-marins est essentielle, un modèle qui établit la cinématique des nœuds de capteurs à la base de l'hydrodynamique de courants marins.

- Enfin, il est essentiel, de prêter plus d'attention à la protection des informations circulant dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins. Le prolongement de la durée de vie du réseau par le déploiement des protocoles de routage et de sécurité adéquats permet une gestion efficace de l'énergie. Le rechargement des batteries, dont la capacité est limitée, dans des zones hostiles est souvent impossible. Pour garantir des communications sécurisées où les nœuds légitimes sont authentifiés et l'information véhiculée est fraîche, disponible et confidentielle, les RCSF-SMs nécessitent alors le développement des mécanismes de sécurité efficaces et peu coûteux en énergie.

## Références

## Références

- [1] E. Deborah, G. Ramesh, H. John, and K. Satish. "Next century challenges: scalable coordination in sensor networks", in Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking Seattle, Washington, United States: ACM Press, pp. 263-270, 1999.
- [2] D. Puccinelli and M. Haenggi. "WSN: Applications & Challenges", CAS Magazine, sept 2005.
- [3] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck. "Wireless underground sensor networks: Research challenges", Ad Hoc Networks 4(6), pp. 669-686, 2006.
- [4] M. Li and Y. Liu. "Underground structure monitoring with wireless sensor networks", In Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, pp. 69-78, 2007.
- [5] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia. "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks", ACM Sigbed Review 1(2), pp. 3-8, 2004.
- [6] J. Heidemann, Y. Li, A. Syed, J. Wills, and W. Ye. "Underwater sensor networking: Research challenges and potential applications", USC/ISI Technical Report ISI-TR-2005-603, 2005.
- [7] I. F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury. "A survey on wireless multimedia sensor networks", Computer networks 51(4), pp. 921-960, 2007.
- [8] M. Alan. "Wireless sensor networks for habitat monitoring", 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, New York, pp. 88-97, 2002.
- [9] M. Lehsaini. "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique", Thèse de Doctorat en informatique, Université de Tlemcen et Université de Franche-Comté, 2009.
- [10] A. Bonivento, P. Carloni Luca and A. Sangiovanni. "Platform-based design of wireless sensor networks for industrial applications", Conference on Design, automation and test in Europe, Belgium, pp. 1103-1107, 2006.
- [11] S. Cheung Coleri and P. Varaiya. "Sensor networks for monitoring traffic", 42nd Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 2004.
- [12] D. Estrin, D. Culler, K. Pister, G. Sukhatme. "Connecting the physical world with pervasive networks", IEEE Pervasive Computing, VOL. 1(1), pp. 59-69, 2002.
- [13] K. Lorincz, D. J. Malan, T. R. F. Fulford-Jones, A. Nawoj, A. Clavel, V. Shnayder, G. Mainland, M. Welsh and S. Moulton. "Sensor networks for emergency response: Challenges and opportunities", IEEE Pervasive Computing, VOL. 3(4), pp.16-23, 2004.
- [14] J. Heidemann, M. Stojanovic and M. Zorzi. "Underwater sensor networks: applications, advances and challenges", Royal Society, Philos Transact A Math Phys Eng Sci, pp.158-75, 2012.
- [15] D.L. Codiga, J.A. Rice, P.A. Baxley. "Networked acoustic modems for real-time data delivery from distributed subsurface instruments in the coastal ocean: Initial system development and performance", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004.
- [16] I. Vasilescu, K. Kotay, and D. Rus, M. Dunbabin and P. Corke. "Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network", *SensSys'05, ACM, 2005*.
- [17] F. Schill, R. Zimmer, J. Trumpf. "Visible Spectrum Optical Communication and Distance Sensing for Underwater Applications", National ICT Australia Ltd, ACRA, 2004.
- [18] A. Bouzoualegh. "modélisation et simulation des caractéristiques physiques d'un système de communication aquatique sans fil", Tunisie, SETIT 2007.
- [19] M. Tivey, P. Fucile, and E. Sichel. "A Low Power, Low Cost, Underwater Optical Communication System", Ridge 2000 Events, 2004.
- [20] A. Bouzoualegh, T. Val, E. Campo et F. Peyrard. "Etude Des Caractéristiques Requises Pour Les réseaux Aquatiques Sans Fil", CNRIUT'03-Colloque National de la Recherche IUT 2003-, Tarbes, France, pp. 319-326, Mai 2003.
- [21] E. Sozer, M. Stojanovic et J.G. Proakis. "Design and Simulation of an Underwater Acoustic Local Area Network", Communication and Digital Signal Processing Center, Northeastern University. in Proc. Opnetwork'99, Washington, DC, August 1999.
- [22] M. Stojanovic. "Recent advances in high rate underwater acoustic communication", IEEE J.Ocean Eng, pp.125-136, April 1996.
- [23] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov. "Fundamentals of Oceans Acoustics", Springer, New York, 2001.



- [24] G. Zaibi, N. Nasri and A. Kachouri and M. Samet. "Survey of Temperature Variation Effect on Underwater Acoustic Wireless Transmission", ICGST International Journal on Computer Network and Internet Research, CNIR, 2009.
- [25] M. Abdellaoui, N. Nasri, B. Gassara, A. Kachouri, M. Samet, T. Val. "Determination of the underwater channel characteristics to improve a multiband OFDM communication", Applied Sciences Research 1(5), Academic Journals Inc, USA, pp. 431-443, 2006.
- [26] N. Nasri, A. Kachouri, L. Andrieux and M. Samet. "Surveys of design considerations for underwater networks", 5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, TUNISIA, March 2009.
- [27] N. Tsingos. "Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives", laboratoire iMAGIS/GRAVIR-IMAG/INRIA. UMR CNRS C5527, pp. 19, Décembre 1998.
- [28] L. M. Brekhovskikh, Yu. P. Lysanov. "Fundamentals of ocean acoustics", Moscow, Russia, Edition Springer, 2003.
- [29] I.F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia. "Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks", Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, 2005.
- [30] J.H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou. "Challenges: Building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications", IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking, pp. 12-18, 2006.
- [31] N. Nasri, G. Zaïbi, A. Kachouri, M. Abdellaoui, M. Samet. "Étude de l'architecture d'un réseau de communication Aquatique Sans Fils", JS-EABA 2007 5èmes Journées Scientifiques de Borj el Amri, mai 2007.
- [32] N. Nasri, A. Kachouri, L. Andrieux. M. Samet. "Design Considerations For Wireless Underwater Communication Transceiver", IEEE.ICSCS08, 2008.
- [33] J. G. Proakis, "Digital Communication", 3rd ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 1995.
- [34] N. Baldo, P. Casari, P. Casciaro and M. Zorzi. "Effective Heuristics for Flexible Spectrum Access in Underwater Acoustic Networks", California Institute of Telecommunications and Information Technology – UC San Diego, USA, 2008.
- [35] C. Viala, C. Noel, G. Lapiere. "Simulation of acoustic signal in time-varying multipath underwater channel", Underwater acoustics for deep sea applications, Brest, June 2002.
- [36] M. Stojanovic. "Underwater Acoustic Communication", For the Wiley Encyclopaedia of Electrical and Electronics Engineering, 1997.
- [37] M. Wenz. "Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources", Journal of the Acoustical Society of America, 34, pp. 1936-1955, 1962.
- [38] E. M. Sozer, M. Stojanovic, J. G. Proakis. "Underwater Acoustic Networks", Life Fellow, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 25, N° 1, January 2000.
- [39] Ocean Engineering at Florida Atlantic University, Available from <http://www.oe.fau.edu/research/ams.html>
- [40] N.N. Soreide, C.E. Woody, S.M. Holt. "Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs", in: 16th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, January 2004.
- [41] E. Cayirci, H. Tezcan, Y. Dogan, V. Coskun. "Wireless sensor networks for underwater surveillance systems", AdHoc Networks, in press; 2004.
- [42] AUV Laboratory at MIT Sea Grant, Available from <http://auvlab.mit.edu/>.
- [43] Second field test for the AOSN program, Monterey Bay August 2003, Available from <http://www.mbari.org/aosn/MontereyBay2003/MontereyBay2003Default.html>.
- [44] J. Jalbert, D. Blidberg, M. Ageev. "Some design considerations for a solar powered AUV: Energy management and its impact on operational characteristics", Unmanned Systems 15 (4), pp. 26–31, 1997.
- [45] M. Beniwal, R. Singh. "Localization Techniques and Their Challenges in Underwater Wireless Sensor Networks", International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5 (3), pp. 4706-4710, 2014.
- [46] M. Ayaz, I. Baig, A. Azween, I. Faye. "A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks", Elsevier Ltd, Vol.34, No 1, pp. 1908-1927, 2011.
- [47] W. Wahid and K. Dongkyun. "Analyzing Routing Protocols for Underwater Wireless Sensor Networks", International Journal of Communication Networks and Information Security, Vol. 2, No.3, pp. 253-261, 2010.

- [48] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," Elsevier's Journal of Ad Hoc Networks. Vol. 3, pp. 257–279, 2005.
- [49] I. F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia. "State of the Art in Protocol Research for Underwater Sensor Networks", the First ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet06), Los Angeles, California, USA, pp. 7-17, 2006.
- [50] R. Jurdak, C. V. Lopes, "Battery lifetime estimation and optimization for underwater sensor networks", IEEE Sensor Network Operations, 2004.
- [51] M. Abdellaoui, N. Nasri, B. Gassara, A. Kachouri, M. Samet, T. Val. "Determination of the underwater channel characteristics to improve a multiband OFDM communication", Applied Sciences Research 1(5), pp. 431-443, 2006.
- [52] N. Nasri, A. Kachouri, M. Samet, L. Andrieux. "Radio Frequency Identification (RFID) Working, design considerations and modelling of antenna", IEEE 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2008.
- [53] P.J.M. Havinga and G.J.M. Smit. "Design Techniques for Low Power Systems", in Journal of Systems Architecture, Vol.46, No.1, pp. 1-21, 2000.
- [54] M. Miladi. "Étude et Implémentation de Protocoles d'Accès au Medium pour Réseaux de Capteurs Sans-Fil", thèse soutenu, page80, 2010.
- [55] A.G. Ruzzelli, L. Evers, S.O. Dulman, L.F.W. van Hoesel and P.J.M. Havinga, "On the Design of an Energy-Efficient Low-Latency Integrated Protocol for Distributed Mobile Sensor Networks", in Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad hoc Networks (IWVAN'04), pp. 35-44, 2004.
- [56] B. Krishnamachari, D. Estrin, S. Wicker. "Modelling data-centric routing in wireless sensor networks", IEEE INFOCOM. 2002.
- [57] N. Thepvilajanapong. "A study on data collection and mobility control for wireless sensor networks", PhD Thesis, A Dissertation Submitted to the Department of Information and Communication Engineering, the University of Tokyo. December 2005.
- [58] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. "Geography-informed energy conservation for ad-hoc routing", Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 70-84, ACM Press New York, NY, USA, 2001.
- [59] K. BOUCHAKOUR. "Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil: Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy)", mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de MAGISTER EN INFORMATIQUE, Ecole Nationale Supérieure de l'Informatique, 2012.
- [60] P. Xie, J. Cui and L. Lao. "VBF: Vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks", Proc. of IFIP Networking, pp. 1216–1221, 2006.
- [61] T. C. Austin, R. P. Stokey, and K. M. Sharp. "PARADIGM: A Buoy-based System for AUV Navigation and Tracking", In IEEE Proceedings of Oceans, 2000.
- [62] J. E. Garcia. "Ad hoc Positioning for Sensors in Underwater Acoustic Networks", In IEEE Proceedings of Oceans, 2004.
- [63] N. H. Kussat, C. D. Chadwell, and R. Zimmerman. "Absolute Positioning of an Autonomous Underwater Vehicle Using (GPS) and Acoustic Measurements", IEEE Journal of Oceanic Engineering, 30(1), pp. 153-164, 2005.
- [64] Y. Zhang and L. Cheng. "A Distributed Protocol for Multi-hop Underwater Robot Positioning". In IEEE Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics, August 2004.
- [65] Z. Zhou, J. H. Cui, and S. Zhou. "Localization for Large-Scale Underwater Sensor Networks", In Proceedings of IFIP Networking'07, pp. 108-119, Atlanta, Georgia, USA, 2007.
- [66] N. Nicolaou, A. See, P. Xie, J. H. Cui, D. Maggiorini. Improving the Robustness of Location-Based Routing for Underwater Sensor Networks", IEEE Oceans 2007 Conf. Europe, pp.1-6, June 2007.
- [67] L. Liu, S. Zhou, J. H. Cui. "Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks", Wireless Communications & Mobile Computing, Vol. 8, pp.977-994, 2008.
- [68] J. M. Jornet, M. Stojanovic, and M. Zorzi. "Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks", in Proc ACM WUWNet, San Francisco, California, USA, Sept 2008.
- [69] H. Yan, Z. J. Shi, J. H. Cui. "DBR: depth-based routing for underwater sensor networks", In: Proceedings of the 7th international IFIP-TC6 networking conference on adhoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet. Singapore: Springer-Verlag, 2008.
- [70] W. Liang, H. Yu, L. Liu and B. Li. "Information-carrying based routing protocol for underwater acoustic sensor network", In: Mechatronics and Automation, ICMA 2007, 2007.

- [71] Z. Guo, G. Colombo. ; B. Wang and J. H. Cui. "Adaptive routing in underwater delay/disruption tolerant sensor networks", In: Proceedings of the fifth annual conference on wireless on demand network systems and services, WONS, 2008.
- [72] M.C. Domingo, R. Prior. "A distributed clustering scheme for underwater wireless sensor networks", in personal, indoor and mobile radio communications", Proceedings of the IEEE 18th International Symposium on PIMRC, 2007.
- [73] W. Pu, L. Cheng and Z. Jun, "Distributed minimum-cost clustering protocol for underwater sensor networks (UWSNs)", Proceedings of the IEEE international conference on communications, ICC '07, 2007.
- [74] P. Sun, W.K.G. Seah, P.W.Q. Lee. "Efficient data delivery with packet cloning for underwater sensor networks", In: Proceedings of the symposium on under- water technology and workshop on scientific use of submarine cables and related technologies, 2007.
- [75] K. R. Anupama, A. Sasidharan, S. Vadlamani. "A location-based clustering algorithm for data gathering in 3D underwater wireless sensor networks". In: Proceedings of the International Symposium on Telecommunications, IST, 2008.
- [76] M. Stojanovic, J. A. Catipovic, J. G. Proakis. "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels". *Ocean Eng, IEEE Journal*, pp. 100–111, 1994.
- [77] Y. Yousef. "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Thèse de Doctorat en informatique, Université de HAUTE ALSACE, 2010.
- [78] R. Kacimi. "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil". Thèse de Doctorat en Réseaux et Télécommunication de Toulouse, 2009.
- [79] S. Souiki, M. Hadjila, M. Feham. "Fuzzy Based Clustering and Energy Efficient Routing for Underwater Wireless Sensor Networks". *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, Vol.7, No.2, pp. 33-44, 2015.
- [80] J. MacQueen. "Some methods for classification and analysis of multivariate observations". In Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, number 281-297, pp. 14, California, 1967.
- [81] H. S. Park and C. H. Jun. "A simple and fast algorithm for k-medoids clustering". *Expert Systems with Applications* 36(2), pp. 3336–3341, 2009.
- [82] J. C. Bezdek. "Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms", Kluwer Academic Publishers, 1981.
- [83] N. R. Pal, K. Pal, J. M. Keller and J. C. Bezdek. "A possibilistic fuzzy c-means clustering algorithm". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 13(4), pp. 517–530, 2005.
- [84] M. S. Yang. "A survey of fuzzy clustering". *Mathematical and Computer modelling* 18(11), pp.1–16, 1993.
- [85] Y. Hu and R. J. Hathaway. "On efficiency of optimization in fuzzy c-means". *NEURAL PARALLEL AND SCIENTIFIC COMPUTATIONS* 10(2), pp. 141–156, 2002.
- [86] M. Alata, M. Molhim and A. Ramini. "Optimizing of fuzzy c-means clustering algorithm using GA". *World Academy of Science, Engineering and Technology* 1(5) , 2008.
- [87] H. Izakian, A. Abraham and V. Snasel. "Fuzzy clustering using hybrid fuzzy c-means and fuzzy particle swarm optimization". In *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC 2009*, pp. 1690–1694, 2009.
- [88] M. Hadjila, H. Guyennet and M. Feham. "Energy-Efficient in Wireless Sensor Networks using Fuzzy C-Means Clustering Approach", *International Journal of Sensors and Sensor Networks*, pp. 21-26, 2013.
- [89] E. Sozer, M. Stojanovic, and J. Proakis, "Underwater acoustic networks", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no.1, pp. 72-83, 2000.
- [90] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research", in *Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
- [91] S. Lindsey, S. Raghavendra, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics", *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, Vol.13, No.9, 2002.
- [92] S. Lindsey, C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Vol. 3, pp. 1125-1130, 2002.
- [93] Y. C. Yu and G. Wei. "An Improved PEGASIS Algorithm in Wireless Sensor Network", *Acta Electronica Sinica* 36(7), pp. 1309–1313, 2008.
- [94] Y. Yong-chang, W. Gang, and W. Juan. "Research on Load Balance and Energy Efficient Routing Algorithm in Wireless Sensor Network", *Communications Technology* 11, 2007.

- [95] M. Hadjila, H. Guyennet and M. Feham. “A Hybrid Cluster and Chain-Based Routing Protocol for Lifetime Improvement in WSN”, In Proceedings the International conference WWIC 2014, LNCS 8458, Springer, pp. 257–268, 2014.
- [96] F. Glover. “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Computers and Operations Research*, 13(5), pp. 533–549, 1986.
- [97] J. Dréo, A. Pérowski, P. Siarry and E. Taillard. “Métaheuristiques pour l’optimisation difficile ». Eyrolles. Paris, 2003.
- [98] C. Darwin. “On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life”. J. Murray, ISBN 0486450066, June 1859.
- [99] J. L. Deneubourg, J. M. Pasteels and J. C. Verhaeghe. “Probabilistic behaviour in ants : a strategy of errors ? *Journal of Theoretical Biology*”, pp. 259-271, 1983.
- [100] W. Tfaili. “Conception d’un algorithme de colonie de fourmis pour l’optimisation continue dynamique, Thèse de Doctorat en Science de l’ingénieur, UNIVERSITÉ PARIS 12-VAL DE MARNE, 2007.
- [101] R. Hoshyar, S. H. Jamali, and C. Locus. “Ant colony algorithm for finding good interleaving pattern in turbo codes”. *IEE Proc-commun*, 147(5), pp. 257–262, 2000.
- [102] K. M. Sim and W. H. Sun. “Ant colony optimization for routing and load-balancing: survey and new directions”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Cybernetics*, 33(5), pp. 560–572, 2003.
- [103] C. Solnon. “Ants can solve constraint satisfaction problems”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, pp. 347-357, 2002.
- [104] R. S. Parpinelli, H. S. Lopes, and A. A. Freitas. “Data mining with an Ant Colony Optimization Algorithm”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, 6(4), pp. 321–332, 2002.
- [105] L. Nemes and T. Roska. “A cnn model of oscillation and chaos in ant colonies: a case study”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications*, 42(10), pp. 741–745, 1995.
- [106] P. S. Heck and S. Ghosh. “A study of synthetic creativity : Behavior modeling and simulation of an ant colony”. *IEEE Intelligent Systems*, 15, pp. 58–66, 2000.
- [107] D. Merkle, M. Middendorf, and H. Schmeck. “Ant colony optimization for resource constrained project scheduling”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(4), pp. 333–346, 2002.
- [108] S. J. Huang. “Enhancement of Hydroelectric Generation Scheduling Using Ant Colony System based optimization Approaches”. *IEEE Transactions on energy conversion*, 16(3), pp. 296–301, 2001.
- [109] David Corne, Marco Dorigo, and Fred Glover. “New ideas in optimisation. McGraw-Hill London , 1999.
- [110] M. Dorigo and L. M. Gambardella. “Ant Colony System : A cooperative learning approach to the traveling salesman problem”, *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on* 1(1), pp. 53–66, 1997.
- [111] V. Maniezzo. “Exact and approximate nondeterministic tree-search procedures for the quadratic assignment problem”, *INFORMS Journal on Computing* 11(4), pp. 358–369, 1999.
- [112] D. Merkle and M. Middendorf. “Swarm Intelligence”, In *Search Methodologies*, Springer, pp. 401–435, 2005.
- [113] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni. “Ant System: optimization by a colony of cooperating agents”. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics*, *IEEE Transactions on* 26(1), pp. 29–41, 1996.
- [114] B. Bullnheimer, R. F. Hartl and C. Strauss. “A new rank based version of the Ant System”. A computational study, 1997.
- [115] O. Cordon, I. Fernández de Viana, F. Herrera and L. Moreno. “A new ACO model integrating evolutionary computation concepts: The bestworst Ant System”, 2000.
- [116] T. Stützle and H. H. Hoos. “MAX–MIN Ant System”, *Future generation computer systems* 16(8), pp. 889–914, 2000.
- [117] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvatal, and W. J. Cook. “The Traveling Salesman Problem : A computational study”, Princeton University Press, 2011.
- [118] G. Reinelt. “The traveling salesman: computational solutions for TSP applications”, Springer-Verlag 1994.
- [119] M. Dorigo. “Optimization, learning and natural algorithms”, Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy 1992.
- [120] J. Dréo, A. Pérowski, É. D. Taillard and P. Siarry. “Métaheuristiques pour l’optimisation difficile. Eyrolles (Editions), 2003.

- [121] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 10–19, 2000.

# Liste des publications

## I Journaux avec comité de lecture

- I Sihem Souiki, Mourad Hadjila, Mohammed Feham. “FUZZY BASED CLUSTERING AND ENERGY EFFICIENT ROUTING FOR UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS”, *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, Vol.7, No.2, March 2015.
- II Sihem Souiki, Maghnia Feham, Mohammed Feham, Nabila Labraoui. “GEOGRAPHIC ROUTING PROTOCOLS FOR UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS: A SURVEY”, *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, Vol. 6, No. 1, February 2014.

## III Conférences internationales avec comité de lecture

- I Sihem Souiki, Mourad Hadjila, Mohammed Feham. “CLUSTERING COMBINED WITH BIO INSPIRED ROUTING IN UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS”, In: *International conference on Intelligent Information Processing, Security and Advanced Communication (IPAC'2015)* .ACM, Batna, Algeria.
- II Sihem Souiki, Mourad Hadjila, Mohammed Feham. “ENERGY EFFICIENT ROUTING FOR MOBILE UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS”, In: *12th International Symposium on Programming and Systems (ISPS), 2015*.IEEE, Algiers, Algeria.
- III Sihem Souiki, Maghnia Feham, Mohammed Feham, Benamar kadri. “UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS: SECURITY ISSUES”, In: *International Conference on Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)*, Mars 2014. Ouargla, Algeria.

## IV Conférences nationales

- I Sihem Souiki, Mourad Hadjila, Mohammed Feham. “POWER AWARE CLUSTER BASED ROUTING ALGORITHM FOR UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORK”, In: *9ème Conférence sur le Génie Electrique « CGE'09 »*, April 2015, Ecole Militaire Polytechnique (Bordj El Bahri, Alger).
- II Sihem Souiki, Maghnia Feham, Mohammed Feham. “VBF ROUTING PROTOCOLS IMPROVEMENTS FOR UNDERWATER WIRELESS SENSOR NETWORKS : A SURVEY”, In : *Conference Nationale sur les Technologies de l'Information et les Telecommunications*, December 2013, Tlemcen, Algeria.
- III Sihem Souiki, Maghnia Feham, Mohammed Feham. “ LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL SOUS-MARINS : APPLICATIONS ET DEFIS”, In : *Séminaire National sur les TIC*, Juillet 2013, Oran l'USTO-MB.

## Abstract

Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) have the promise of revolutionizing many areas of science, industry, and government with their ability to bring computation and sensing into the physical world. Acoustic communications are the typical physical layer technology in underwater networks, providing robust underwater communications for both military and civilian applications. Some of these applications are: environmental monitoring, underwater exploration, disaster prevention, assisted navigation, tactical surveillance, and mine detection. Similar to the terrestrial sensor networks, UWSNs have different challenges such as limited bandwidth, low battery power, defective underwater channels, and high variable propagation delay. A crucial problem in UWSN is finding an efficient route between a source and a destination with minimal energy consumption of sensor node which can be wasted rapidly. The most proposed routing protocols for terrestrial sensor networks are not adequate for UWSN owing to their different characteristics, thus new design of routing protocols must be adapted to this environment. In this thesis, we focus on energy constraints related to the use of batteries with limited capacity for the supply of sensors. In our work, we propose routing algorithms to route information while controlling energy consumption. Our first contribution consists in proposing two algorithms called SH-FEER and MH-FEER based on the clustering concept using the FCM techniques to construct the clusters, the two proposed algorithms differ mainly in the transmission mode to the base station. Whereas our second contribution consists in proposing another hybrid algorithm called CCRA which group between two concepts (cluster based and chain based). Moreover, all the proposed routing algorithms are evaluated in terms of total energy consumed in the network for both static and dynamic topologies, in the aim to prolong the network life time.

**Keywords:** Underwater wireless sensor network, routing, energy consumption efficiency, clustering, chain approach.

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins (RCSF-SMs) ont révolutionné de nombreux domaines de la science, de l'industrie, et de gouvernement avec leur capacité à apporter de calcul et de détection dans le monde physique. L'onde acoustique représente la technologie typique de la couche physique dans les réseaux de capteurs sans fil sous l'eau, qui peut garantir une communication sous-marine robuste à la fois pour des applications civiles et militaires. Certaines de ces applications sont: la surveillance de l'environnement, l'exploration sous-marine, la prévention des catastrophes, navigation assistée, surveillance tactique, et la détection des mines. Similaires aux réseaux de capteurs terrestres, les RCSF-SMs sont confrontés par différents défis tels que la bande passante limitée, batterie faible, le canal sous-marin défectueux, et le délai de propagation élevé. Un problème crucial dans les RCSF-SMs, est de trouver un chemin optimal entre une source et une destination avec une consommation d'énergie minimale du nœud capteur qui peut être épuisé rapidement.

La majorité des protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs terrestres ne sont pas adéquats pour les RCSF-SMs en raison de leurs caractéristiques différentes, par conséquent de nouveaux protocoles de routage doivent être conçus à cet environnement. Dans cette thèse, nous nous concentrons sur les contraintes énergétiques liées à l'utilisation de batteries avec une capacité limitée des capteurs. Dans notre travail, nous proposons des algorithmes de routage pour acheminer des informations tout en contrôlant la consommation d'énergie. Notre première contribution consiste à proposer deux algorithmes appelés SH-FEER et MH-FEER basée sur le concept de clustering en utilisant la technique FCM pour construire les clusters, les deux algorithmes proposés diffèrent principalement dans le mode de transmission vers la station de base. Nous enchaînons par notre deuxième contribution qui représente un autre algorithme hybride appelé CCRA qui combine entre les deux concepts (basée sur les clusters et basé sur les chaînes). En outre, tous les algorithmes de routages proposés sont évalués en termes d'énergie consommée totale dans le réseau pour les deux topologies statiques et dynamiques, dans le but de prolonger la durée de vie du réseau.

**Mots-clés:** réseau de capteurs sans fil sous-marins, routage, consommation d'énergie efficace, clustering, approche basée sur les chaînes.

## ملخص

تتركز هذه الدراسة على واحدة من الموضوعات المهمة المتمثلة في شبكات الاستشعار اللاسلكية المستخدمة تحت الماء والتي أحدثت بدورها ثورة في العديد من مجالات العلم والصناعة. تمثل الموجة الصوتية التكنولوجية النموذجية لتحقيق التواصل الفعال بين أجهزة الاستشعار المستعملة تحت المياه لكل من التطبيقات المدنية والعسكرية. بعض من هذه التطبيقات يتمثل في: الرصد البيئي، التنقيب تحت الماء، الوقاية من الكوارث، الملاحة، المراقبة التكتيكية والكشف عن الألغام. يمكن تلخيص مشكلة البحث في محاولة العثور على المسار الأمثل لتوجيه المعلومات نحو المحطة الأساسية مع مراعاة الحد الأدنى من استهلاك طاقة أجهزة الاستشعار التي يمكن أن تستنفد بسرعة.

ولتنفيذ هذه الدراسة تم إجراء العديد من التجارب لإثبات مدى فاعلية الخوارزميات التي تم تطويرها خلال هذا البحث. وتمثل أهم نتائج البحث فيما يلي:

- تطوير اثنين من خوارزميات التوجيه بالاستناد إلى مفهوم التجميع باستخدام تقنية (FCM) لتكوين مجموعات من أجهزة الاستشعار. تختلف أساساً هذه الخوارزميات المقترحة في طريقة انتقال المعلومات إلى المحطة الأساسية.
- تطوير خوارزمية مهجنة والتي تجمع بين المفهومين الذين يركزان على أساس (المجموعات، السلاسل).
- قياس جميع خوارزميات التوجيه المقترحة من حيث الطاقة الإجمالية المستهلكة في الشبكة لكلا أنواع الطوبولوجيا (الساكنة و الدينامكية) من أجل إطالة عمر الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** شبكة استشعار لاسلكية تحت الماء، التوجيه، كفاءة استهلاك الطاقة، النهج التجميعي، النهج المعتمد على السلاسل