

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département D'électronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : TELECOMMUNICATION
Spécialité : Réseau et Télécommunication
Thème

**ROUTAGE HIERARCHIQUE BASE SUR L'ALGORITHME
GENETIQUE DEDIE POUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS
FIL SOUS MARINS**

Présenté Par :

- 1) ELAIHAR WIEME
- 2) BENEDRA HABIBA CHAIMAA

Devant le jury composé de :

Dr.DEBBAL	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr.BEMMOUSSAT	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr.SOUIKI	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Madame SOUIKI, de nous avoir encadré dans notre mémoire de fin d'étude.

Un gros merci également à nos familles pour leurs soutiens aussi bien moral que financier et pour leurs sacrifices.

Nous tenons également à remercier tous nos amies et tous les étudiants de notre promo fondamentaux.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, nous remercions A tous ceux qui nous aidés et encouragés de près ou de loin.

Elaihar Wieme

Benedra Habiba Chaimaa

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir

Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère : Naimi Yassine,

A mes chères sœurs : Amira, Racha et Malek

A ma tante Chahra et son mari Allal et ses fille : Sara, Fadia, Asmaa, Imene et Aicha

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma chère grande mère,

Qui je souhaite une bonne santé.

A mes proche Nardjessa et Imen,

Qui m'a aider et supporté dans les moments difficiles.

A mon cher binôme, chaimaa

Pour leur entente et sa sympathie.

A mes chère copine Hind, Maroua, Sara, Raounak, Soumia, Abir , Lina, Saida,

Mouna,

A ma belle famille

POUR LEURS INDEFECTIBLES SOUTIENS ET LEURS PATIENCES INFINIES.

Elaihar Wieme

Dédicaces

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage pour achever ce modeste

travail Que je dédie :

A mes chers et respectueux parents, source de vie pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

Puisse Dieu vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A mes chères sœurs : Souhila, Houda, Aya pour leur appui et leur encouragement.

A mes nièces : Marwa, Merieme, Habiba, Allaa, Fatima, Maha.

A mes neveux : Haroun et Tayeb, Haytem.

A mon chère amie : Elaihar Marwa.

A mon chère binôme : Wieme.

À mes chères camarades : Wieme, Safae, Raounak, Abir, Soumia, Hind, Sara, Lina, Saida, Mimouna.

A toutes personnes qui m'ont encouragé ou aidé dans l'achèvement de ce travail.

Benedra Habiba Chaimaa

Résumé

À l'heure actuelle, l'application des réseaux de capteurs sous-marins sans fil (RCSF-SM) a connu une croissance significative et des développements remarquables en raison de l'évolution technologique. Cependant, il souffre encore de problèmes de limitation de puissance, en plus de l'importance de routage et son impact significatif sur la performance du RCSF sous-marins. Pour résoudre ces problèmes, il y a plusieurs protocoles pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie des nœuds de capteurs dans le RCSF-SM. Dans notre recherche, Notre algorithme proposé FAG combine entre le clustering en utilisant la technique FCM et le principe des chaines en utilisant l'algorithme génétique, On a fait une technique hybride entre le FCM et l'AG .ensuite une évaluation en termes de consommation énergétique et de durée de vie des nœuds a été présentée et discutée avec une comparaison avec un autre algorithme basé sur l'ACO.

Mots clé: RCSF-SM, Routage, Algorithme génétique, FUZZY C-MEANS.

Abstract

Currently, the application of wireless underwater sensor networks (WS-CSN) has experienced significant growth and remarkable developments due to the technological evolution. However, it still suffers from power limitation issues, in addition to the importance of routing and its significant impact on the performance of the underwater WSN. To solve these problems, there are several protocols to reduce the power consumption and extend the lifetime of sensor nodes in the SCN-MS. In our research, our proposed FAG algorithm combines between clustering using FCM technique and chain principle using genetic algorithm, A hybrid technique between FCM and GA was made .Then an evaluation in terms of energy consumption and lifetime of nodes was presented and discussed with a comparison with another algorithm based on ACO.

Keywords: UWSNs, Routing, Genetic algorithm, FUZZY C-MEANS.

ملخص

في الوقت الحاضر، شهد تطبيق شبكات الاستشعار اللاسلكية تحت الماء (WSN-SM) نموًا كبيرًا وتطورات ملحوظة بسبب التطور التكنولوجي. ومع ذلك، فإنه لا يزال يعاني من مشكلات الحد من الطاقة، بالإضافة إلى أهمية التوجيه وتأثيره الكبير على أداء RCSF-SM. لحل هذه المشكلات، توجد عدة بروتوكولات لتقليل استهلاك الطاقة وإطالة عمر عُقد المستشعر في RCSF-SM. في بحثنا، تجمع خوارزمية FAG المقترحة بين التجميع باستخدام تقنية FCM ومبدأ السلاسل باستخدام الخوارزمية الجينية، وقد صنعنا تقنية هجينة بين FCM و AG. ثم تم تقديم تقييم من حيث استهلاك الطاقة وعمر العقد وتمت مناقشته بمقارنة مع خوارزمية أخرى تعتمد على ACO.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية تحت الماء، الخوارزمية الجينية، FUZZY C-MEANS، توجيه.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des abréviations	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	1
Chapitre I. Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil terrestre (RCSF) et les réseaux des capteurs sans fil sous-marins (RCSF_SM).	3
I. Introduction	4
II. Le réseau de capteur sans fil RCSF	4
II.1 Définition :	4
II.2 Les types de RCSF	5
II.3 Architecture d'un capteur sans fil.....	6
II.4 Défis du réseau de capteur sans fil	8
III. Le réseau de capteurs sans fil sous-marins RCSF_SM	9
III.1 Définition.....	9
III.2 Architecture des réseaux de capteurs sans fil sous-marins	9
III.3 Classification des applications de Réseau de capteurs sans fil sous-marin	11
III.4 Défis et opportunités de RCSF_SM	15
IV. Différences entre les réseaux de capteurs sans fil terrestres et sous-marins	16
V. Conclusion	18
Chapitre II. Protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins	19
I. Introduction	20
II. Définition de routage dans un réseau de capteur sans fil sous-marins	20
III. Les défis du routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins	20
III.1 Long délai de propagation des communications	21
III.2 Effet de l'environnement	21
III.3 Mobilité des nœuds	21
III.4 Économie d'énergie	22
IV. Classification des protocoles de routage dans les RCSFs-SM	22
IV.1 Protocole de routage base sur l'énergie	23
IV.1.1 Protocoles de routage conscient de l'énergie.....	23
IV.1.2 Protocoles de routage à base de cluster	23
IV.2 Protocoles de routage basés sur les informations de localisation.....	24

IV.2.1 Protocoles de routage basé sur la localisation	24
IV.2.2 Protocole de routage basé sur la profondeur	25
IV.3 Protocole de routage base sur data	25
IV.3.1 Protocoles adressant la conscience de la direction	26
IV.3.2 Protocole de routage basé sur l'inondation	26
V. Routage basé sur le méta heuristique pour les réseaux des capteurs sans fil sous-marins ...	27
V.1 protocole de routage basé sur l'algorithme génétique pour le positionnement et le déploiement des réseaux de capteurs sous-marins	27
V.2 Algorithme de routage en grappe basé sur des algorithmes améliorés d'optimisation de colonies de fourmis pour les réseaux de capteurs sans fil sous-marins	28
V.3 L'algorithme de fusion d'ACOA-AFSA	29
V.4 Un algorithme de colonies d'abeilles artificielles pour le problème du regroupement du chemin d'acheminement moyen minimum dans les réseaux de capteurs sous-marins multi-sauts	30
VI. Conclusion	30
Chapitre III. Simulation et résultats de l'algorithme hybride proposé.	32
I. Introduction	33
II. Présentation du logiciel Matlab	33
III. Fuzzy C-Means (FCM).....	33
IV. L'algorithme génétique	34
IV.1 Modèle de l'algorithme génétique	35
IV.2 Description de l'algorithme proposé	36
V. Evaluation	39
V.1 Hypothèses	39
V.2 Modèle d'énergie et leur consommation	39
VI. Résultats de simulation	40
VI.1 Les paramètre de simulation	40
VI.2 les résultats de l'énergie résiduelle de réseau	40
VI.3 les résultats des nombres des nœuds	40
VI.4 Comparaison entre FAG et un autre algorithme basé sur l'ACO.....	41
VII. Conclusion	43
Conclusion générale	44
References	46

Liste des abréviations

ARQ	Automatic Repeat Request
AUV	Autonomous Under water Vehicle
BB	Broad Band
Co_DBR	Cooperative Depth-Based Routing
CN	Computer Network
FSO	Free Space Optics
IrDA	The Infrared Data Association
Im-CBE2R	IMproved-Collision avoidance Based Energy efficient Routing
ISM	Industrielles Scientifiques et Médicales
LF-WPAN	Low Flow Wireless Personal Area Networks
LTE	Long-Term Evolution
MAC	Media Access Control
MBB	Mobile Broadband Network
MTCN	Cellular Mobile Telecommunications Networks
RCSF_SM	Réseaux de Capteurs Sans Fil _Sous-Marins
RCSF	Réseau de Capteur Sans Fil
RPAN	Réseau Personnel Sans Fil
SP-CBE2R	Shortest Path-Collision avoidance Based Energy efficient Routing
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocole
UWB	Ultra Wide Band
VPN	Vrtual Private Network
WCN	Wireless Computer Network

WC Wireless Communication

WN Wireless Network

WAN Wide Area Network

Liste des figures

Figure I.1 Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) [10].....	5
Figure I.2 Les types de RCSF [7].....	5
Figure I.3 Architecture d'un capteur sans fil [12].	7
Figure I.4 Architecture des réseaux de capteurs sans fin sous-marins [25].....	10
Figure II.1 Les classifications des protocoles de routage dans le RCSF_SM [51].....	22
Figure II.2 Formation et visulisation du chromosome utilisé daans l'AG [63].	27
Figure III.1 Les étapes d'une model d'algorithme génétique.	35
Figure III.2 Structure générale d'un AG [78].	36
Figure III.3 Le nœud de tête est le dernier nœud de la chaine [79].....	37
Figure III.4 Le nœud leader est le premier nœud de la chaine [79].....	37
Figure III.5 Le nœud leader est à l'intérieur de la chaine [79].	37
Figure III.6 Transmission inter-cluster.	38
Figure III.7 Mise à jour de la chaine [79].	38
Figure III.8 L'énergie résiduelle des réseaux en fonction de nombre d'itérations.	40
Figure III.9 Le nombre des nœuds vivant en fonction de nombre d'itération.	41
Figure III.10 L'énergie résiduelle en fonction le nombre d'itération.	42
Figure III.11 Le nombre des nœuds vivant en fonction nombre d'itérations.	42

Liste des tableaux

Tableau I-1 Différences entre les réseaux de capteurs sans fil terrestres et sous-marins [37].	18
Tableau III-1 Les paramètres de simulation.....	40

Introduction générale

Introduction générale :

Depuis sa création, les réseaux de communication sans fil connaissent un succès croissant dans les sciences et l'industrie. De ce constat, une nouvelle architecture a émergé est les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) qui constituent l'un des domaines de recherche les plus actifs car ils offrent des solutions à faible coût et facilement déployables à la surveillance à distance et au traitement des données dans les environnements hostiles.

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de capteurs autonomes à faible coût, interconnectés par un réseau de communications sans fil, capables d'effectuer des mesures sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée. Le réseau de capteur sans fil est un domaine de recherche couvrant des applications terrestres, mais nous savons que l'eau couvrant 70 % de la Terre, il est nécessaire de mener des recherches approfondies sur la surveillance et l'exploration de divers aspects de l'environnement océanique. L'approche naturelle consiste à adapter les architectures terrestres actuellement disponibles et éprouvées à une utilisation sous-marine.

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins diffèrent des réseaux de capteurs radio terrestres dans de nombreux aspects tels que le délai de propagation, la bande passante, l'énergie de transmission, l'effet multi trajet, etc. Les réseaux de capteurs utilisés pour les communications sous-marines sont différents à bien des égards des réseaux de capteurs traditionnels terrestres. Tout d'abord, la consommation d'énergie est différente car certaines applications importantes nécessitent une grande quantité de données, mais très rarement. Pour les réseaux de capteur, il existe une relation importante entre la distance de liaison, le nombre de sauts et la fiabilité. Pour des raisons énergétiques, les paquets sur plusieurs sauts courts sont préférés aux longues liaisons, car les transmissions de données à sauts multiples se sont avérées plus efficaces sur le plan énergétique pour les réseaux sous-marins que les sauts simples. En même temps, on observe que le routage de paquets sur un plus grand nombre de sauts dégrade finalement la fonction de fiabilité de bout en bout, en particulier dans un environnement sous-marin difficile.

La structure de ce manuscrit est organisée en trois chapitres : Dans le premier chapitre, nous commençons par présenter les concepts fondamentaux d'un réseau de capteurs sans fil et les concepts fondamentaux d'un réseau de capteurs sans fil sous-marins avec son architecture, application et ses défis...etc. À la fin nous faisons une comparaison entre eux. Le deuxième chapitre décrit les protocoles de routage sur le RCSF sous-marin avec ses défis et quelques protocoles de routage basé sur le méta heuristique. Dans le chapitre 3, nous utilisons un routage hybride qui fait la combinaison entre deux algorithmes le Fuzzy C-Means (FCM) essaie de partitionner l'ensemble des nœuds en multiple de clusters, et l'algorithme génétique pour former les chaînes et de l'élection de nœuds leaders. Nous évaluons l'algorithme proposé sur la base de deux Métriques : énergie consommée et nombre de nœuds restants dans le réseau. Finalement, nous finissons par une conclusion générale.

À la fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale qui contient les principales contributions présenté tout au long de ce mémoire.

Chapitre I. Généralités sur les réseaux des capteurs sans fil terrestre (RCSF) et les réseaux des capteurs sans fil sous-marins (RCSF_SM).

I.Introduction :

Les récentes avancées dans les domaines des technologies sans-fil et électroniques ont permis le développement à faible coût de minuscules capteurs consommant peu d'énergie où compte tenu de l'abstraction virtuelle des objets intelligents permise par les technologies intelligentes, Les réseaux de capteurs sont utilisés pour un large éventail d'applications. 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 réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).

A travers ce chapitre nous faisant notre étude Préliminaire sur deux niveaux le premier niveau se focalise sur les réseaux de capteurs sans fil terrestre, et le deuxième niveau sur des réseaux de capteurs sans fil sous-marin .Le réseau de capteurs sans fil sous-marin (RCSF_SM) est une technologie à venir principalement utilisée pour divers types d'explorations effectuées et tenues sous l'eau. Il est d'une grande importance dans divers domaines tels que la surveillance, l'armée, les catastrophes, les sports et la navigation, etc.

II.Le réseau de capteur sans fil RCSF :

II.1 Définition :

Les réseaux de capteurs sans fil sont construits sur le principe de l'interaction des dispositifs de détection. Ces dispositifs sont connus pour leur petite taille et leur faible coût, mais en même temps, ils ont une puissance de traitement et une mémoire relativement faibles, d'une alimentation électrique limitée et d'une bande passante de communication relativement faible [1,2]. Alors que certains capteurs sont fixes et sans mouvement, d'autres capteurs peuvent être très mobiles lorsqu'ils sont fixés à des objets en mouvement. La plupart des études sur ce type de réseau se sont concentrées sur le routage efficace en énergie [3,4].

Il existe de nombreux types différents de RCSF allant des mécanismes primitifs de collecte de données à un seul saut et jusqu'aux réseaux de capteurs multi-sauts intelligents. Ce dernier type de réseau peut fournir la portée la plus large possible et permettre l'utilisation de mécanismes avancés qui fournissent des valeurs sensorielles à la demande ou ajuste le routage des paquets selon les besoins supplémentaires de l'application [5,6].

Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués de quelques centièmes de capteurs simples équipés d'un récepteur radio. Ils sont couramment utilisés pour surveiller et automatiser de grandes zones. En raison de leur simplicité, ces réseaux se retrouvent rapidement à faible d'énergie et ont souvent des problèmes d'évolutivité et de bande passante disponible. Pour résoudre ces problèmes, la recherche actuelle se limite principalement à l'ajout de récepteurs supplémentaires [7].

Actuellement, dans les systèmes d'automatisation, la surveillance de l'état des objets, la technologie des réseaux de capteurs sans fil est de plus en plus utilisée avec succès. À des fins technologiques et industrielles, des capteurs de faible puissance et de petite taille peuvent être intégrés à pratiquement n'importe quel équipement d'acquisition de données [8, 9].

La figure 1 montre l'architecture de base d'un RCSF (réseaux de capteurs sans fil). Les capteurs sont déployés de manière aléatoire dans une zone d'intérêt. La zone d'intérêt et la station de base (sink) situé à l'extrémité de la zone sont responsables de la récupération des données collectées par les capteurs [10]. Le plus souvent, la stations de base collecte et traite les données du réseau, ne transmettant ainsi que les informations pertinentes à l'utilisateur. Il peut également recevoir des commandes à exécuter sur le réseau interne de sa part (l'utilisateur). Les données collectées sont traitées et analysées par l'utilisateur [11].

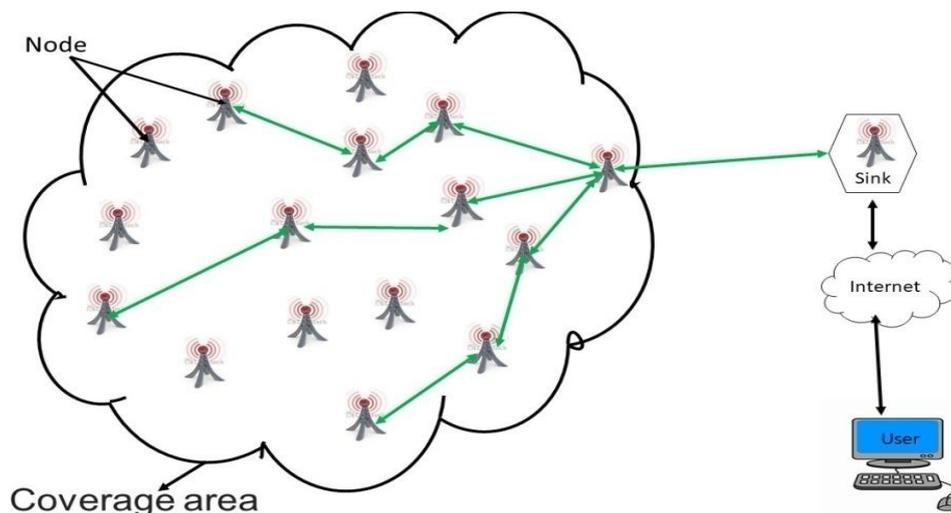


Figure I.1 Architecture générale d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF) [10].

II.2 Les types de RCSF :

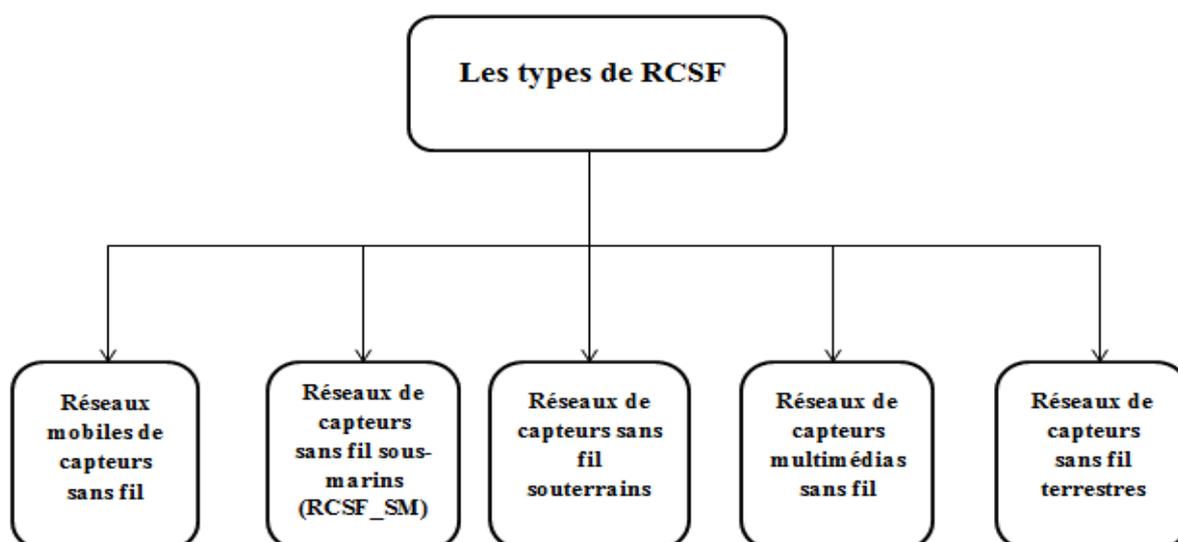


Figure I.2 Les types de RCSF [7].

II.2.1 Réseaux de capteurs mobiles sans fil: Ce type de réseaux utilise des nœuds de capteurs mobiles, alors que les RCSF, ont des nœuds de capteurs statiques. Les réseaux de capteurs mobiles sans fil présente une importante adaptabilité que les RCSF statiques, car les RCSF mobiles peuvent être mis en place pour n'importe quelle situation et ils peuvent

fonctionner avec de soudains changements de topologie [8].

II.2.2 Réseaux de capteurs sans fil sous-marins (RCSF_SM): La communication sans fil sous-marine est l'un des plus grands défis dans la construction de RCSF sous-marins. Il a été constaté que les radiofréquences et les ondes acoustiques (ayant une petite bande passante) sont atténuées et modifiées dans l'eau. La communication optique est la meilleure solution pour la communication à courte distance dans l'eau. Si les communications optiques dans vertes/bleues sont utilisées par rapport aux communications acoustiques pour les courtes distances, elles offrent une bande passante et une propagation plus rapide dans l'eau. Dans tous les types de RCSF le réseau de capteurs sans fil sous-marin représente un domaine de recherche émergent. La plupart des RCSF_SM peuvent être utilisés pour des applications sismiques, les applications de surveillance et de sécurité. Les applications RCSF_SM incluent également les sous-marins sans pilote et les attaques. Il existe encore de nombreux défis dans le domaine des RCSF_SM, tels que la sécurité, la consommation d'énergie, l'installation et la communication entre les capteurs [7].

II.2.3 Réseaux de capteurs sans fil souterrains: l'objectif de ce type de réseau est de surveiller plusieurs conditions souterraines comme la composition, l'humidité du sol, etc. Ainsi, transférer l'information à une station de base qui se trouve au-dessus du sol [7].

II.2.4 Réseaux de capteurs multimédias sans fil: Les différentes applications des réseaux de capteurs multimédias sans fil comprennent la gestion du trafic, la surveillance météorologique, etc. Une communication efficace sous forme multimédia, c'est-à-dire audio, vidéo et image. Les réseaux de capteurs multimédias sans fil requièrent plus de ressources, comme une large bande passante et une forte consommation d'énergie. Les réseaux de capteurs multimédias sans fil ont besoin de techniques avancées tels que les techniques de compression et de transmission des données [7].

II.2.5 Réseaux de capteurs sans fil terrestres: les réseaux des capteurs sans fil terrestres contiennent des centaines de nœuds qui sont placés dans une zone géographique. Par conséquent, les cellules solaires peuvent être utilisées dans les réseaux de capteurs terrestres. L'énergie peut être économisée en réduisant les délais, en opérant des cycles de service bas, etc. L'optique en espace libre (FSO) est utilisée comme moyen de communication de base dans les systèmes FSO / RF, tandis que les liaisons par radiofréquence (RF) sont utilisées comme moyen de secours lorsque la communication optique n'est pas possible en raison de l'absence de visibilité. Les liaisons FSO fournissent une faible énergie de communication dans les réseaux de capteurs sans fil [7].

II.3 Architecture d'un capteur sans fil :

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une quantité physique (par exemple, la température, la lumière, la pression) et de la communiquer à un centre de collecte directement ou par l'intermédiaire d'autres nœuds de capteurs qui agissent comme des routeurs [12]. Compte tenu des progrès de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil, il est désormais possible d'utiliser des capteurs sans fil. Il est possible de produire des micros capteurs de quelques millimètres cubes de volume qui peuvent

fonctionner en réseau à des vitesses très élevées. Qui peuvent fonctionner en réseau à un coût raisonnable [13]. Un capteur se compose de quatre unités de base et de deux unités optionnelles [12,14] (voir Figure I.3) :

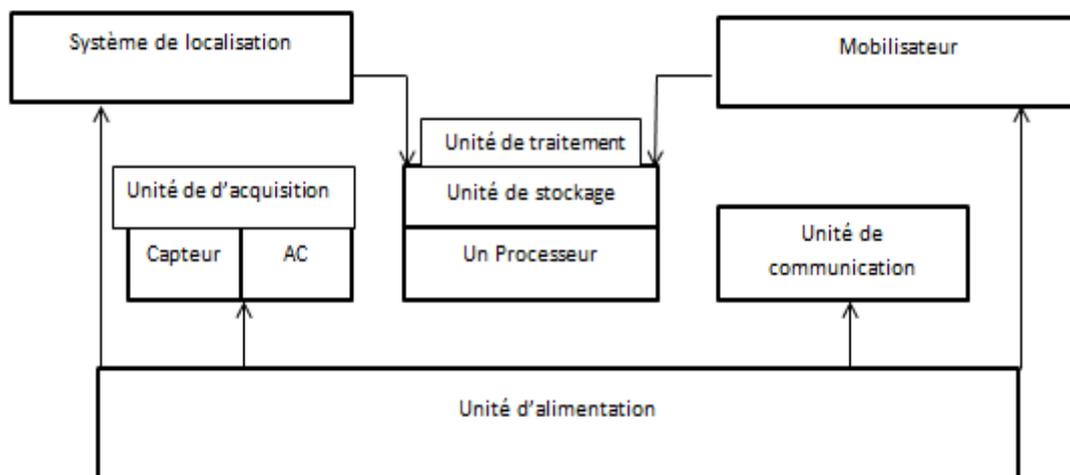


Figure I.3 Architecture d'un capteur sans fil [12].

II.3.1 Unité d'acquisition: Sont généralement composées de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogiques-numériques (CAN). Le site signaux analogiques produits par les capteurs en fonction du le phénomène observé sont convertis en signaux numériques par le CAN, puis transmis à l'unité de traitement.

II.3.2 Unité de traitement: Elle est également composée de deux unités : une unité de stockage des données et un processeur responsable du traitement des données et des procédures de contrôle que permettant la collaboration du capteur avec les autres afin d'effectuer des tâches d'acquisition.

II.3.3 Unité de communication: Sa fonction est la transmission et la réception d'informations. Elle est équipée d'un couple d'émetteur/récepteur. Elle permet la communication au sein du réseau, par radiofréquence (ondes radio), ou par d'autres possibilités de transmission.

II.3.4 Unité d'alimentation: L'alimentation électrique est un élément essentiel de l'architecture des capteurs. Elle est chargée de fournir l'énergie à toutes les autres unités. Elle correspond le plus souvent à une batterie, alimentant le capteur, dont les ressources limitées font un problème spécifique à ce type de réseau. Cependant la réalisation récente d'unité d'alimentation par panneaux solaires tente d'apporter une solution pour prolonger la durée de vie des capteurs [14].

II.3.5 Mobilisateur: En option, il est utilisé pour déplacer le nœud afin de réaliser la tâche à traiter.

II.3.6 Système de localisation: En option, ce système fournit des informations sur l'emplacement requis par l'application et/ou le routage.

II.4 Défis du réseau de capteur sans fil :

Les RCSF, malgré leur grand potentiel, n'ont pas encore atteint leur efficacité optimale. Cela est dû en grande partie aux défis inhérents qu'ils présentent et à l'étendue toujours croissante de la demande des applications. Ces défis ont suscité un grand intérêt de la part des chercheurs au cours de la dernière décennie. Certains des principaux défis sont énumérés ci-dessous [15,16].

II.4.1 L'énergie: La conservation de l'énergie est essentielle au développement des RCSF. Comme les nœuds de capteurs fonctionnent avec une batterie limitée [17], il est essentiel d'utiliser l'énergie de manière judicieuse et efficace pour prolonger de manière significative la durée de vie du réseau. Dans d'autres cas, la source d'énergie peut être reconstituée par des moyens solaires ou autres. Cependant, au fur et à mesure que les RCSF se développent, il peut devenir difficile de réapprovisionner la source d'énergie [18]. Cela dépendrait toutefois du terrain sur lequel ils sont déployés et cela reste un sujet de recherche et de conception ouvert. La principale cause de la consommation d'énergie des nœuds de capteurs est largement attribuée à la détection, à la communication et au traitement des données. Plusieurs travaux scientifiques ont été faits pour traiter la question de l'énergie dans les RCSF [16].

II.4.2 La communication: La communication dans les RCSF se fait par le biais d'un support sans fil guidé par différentes spécifications IEEE fonctionnant dans les bandes de fréquences industrielles scientifiques et médicales (ISM) sans licence. L'IEEE définit la couche physique et Contrôle d'accès aux médias (MAC) pour les réseaux personnels sans fil à faible débit (LF-WPAN). IEEE 802.15.1 (Bluetooth) et 802.15.4 sont les deux protocoles les plus viables pour les RCSF. Ces protocoles doivent coexister mutuellement avec d'autres protocoles sans fil fonctionnant sur la même bande ISM, tels que IEEE 802.11a/b/g (Réseau local sans fil RLAN) et IEEE 802.15.3 (ultra large bande: UWB). Le RLAN et l'UWB ne sont pas idéalement adaptés aux capteurs sans fil à contrainte de ressources. Le RLAN et l'UWB sont des technologies de communication sans fil à large bande passante pour appareils dotés d'une grande puissance de traitement et de sources d'énergie constantes ou facilement sources d'alimentation rechargeables [16].

II.4.3 Routage: Les topologies des RCSF ne sont pas structurées et, par conséquent, de nombreux protocoles de routage traditionnels ne sont pas adaptés. En outre, le fait que qu'ils ne sont pas basés sur IP le routage devient un aspect très difficile mais intéressant. Le routage est basé sur la couche réseau telle qu'elle est définie par la norme IEEE 802.15.4. Les protocoles de routage RCSF doivent être légers en raison des ressources limitées de ces réseaux. Les protocoles de routage RCSF sont classés en plusieurs catégories : transfert gourmand, centré sur les données énergétique, la localisation et l'inondation. Le transfert par gourmandise transmet les paquets aux voisins proches de la destination [17]. Ces types de protocoles sont plus efficaces dans les déploiements denses, par opposition aux déploiements sporadiques/intermittents [18].

II.4.4 Sécurité: Les RCSF, comme les autres réseaux sans fil, sont sensibles aux menaces de sécurité. Certaines des mesures de sécurité et des algorithmes cryptographiques appropriés sont largement discutés [17]. En outre ils ont identifié les exigences de sécurité

fondamentales qui doivent être satisfaites dans les RCSF : Authentification des données, confidentialité des données, intégrité des données, disponibilité et redondance [19-21]. Pour atteindre les objectifs de sécurité, les RCSF doivent faire face à différentes menaces auxquelles ils sont sensibles [16].

II.4.5 Configuration: La configuration manuelle de tout dispositif de réseau est difficile et fastidieuse, surtout lorsque le réseau se développe. Les capteurs doivent réagir rapidement à tout changement dans le réseau et ont donc besoin d'une gestion dynamique de la configuration. Christin et autre [20] affirment que le rôle des nœuds de capteurs pourrait s'étendre pour offrir des fonctions autonomes telles que l'autoréparation, l'auto découverte, ce qui nécessite une approche plus subtile et plus économe en énergie.

III. Le réseau de capteurs sans fil sous-marins RCSF_SM :

III.1 Définition :

Le RCSF_SM est une fusion de la technologie sans fil et de la technologie des capteurs micromécaniques extrêmement petits ayant des capacités de détection, de calcul et de communication intelligentes. Le RCSF_SM est un réseau de nœuds de capteurs autonomes [22], répartis dans l'espace sous l'eau pour détecter les propriétés de l'eau telles que la qualité, la température et la pression. Les données détectées peuvent être utilisées par une variété d'applications qui peuvent être utilisées pour le bénéfice des humains. Les nœuds capteurs, fixes ou mobiles, sont connectés via une liaison sans fil par des modules de communication pour transférer divers événements d'intérêt [23]. La communication sous-marine se fait principalement avec un ensemble de nœuds transmettant leurs données à des nœuds passerelles flottants qui relaient les données à la station de surveillance et de contrôle côtière la plus proche, également appelée station distante [24]. Généralement, dans les RCSF_SM, des émetteurs-récepteurs acoustiques sont utilisés pour la communication. Les réseaux RCSF_SM sont utilisés pour un large éventail d'applications, telles que la surveillance de l'environnement marin, de l'exploration scientifique, l'exploitation commerciale, la protection du littoral, la surveillance de la pollution sous-marine, la prévention des catastrophes aquatiques et la facilitation des sports aquatiques.

Les réseaux RCSF_SM offrent une solution prometteuse à des applications toujours plus exigeantes. Cependant, les applications RCSF_SM sont à la fois passionnantes et difficiles. La raison réside dans les conditions imprévisibles de l'environnement aquatique qui créent de sérieuses contraintes dans la conception et le déploiement de ces réseaux [25].

III.2 Architecture des réseaux de capteurs sans fil sous-marins :

Dans cette section, nous abordons les principales architectures RCSF_SM existantes (figure I.4), qui constituent la base de la conception des applications RCSF_SM :

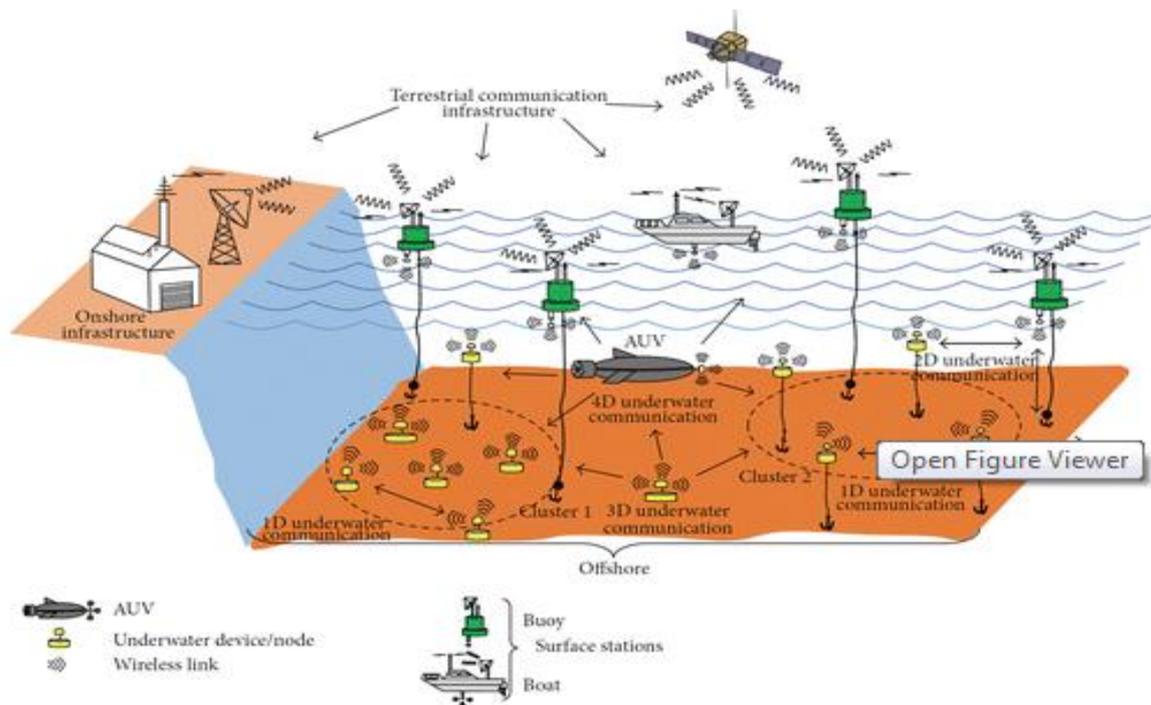


Figure I.4 Architecture des réseaux de capteurs sans fin sous-marins [25].

III.2.1 Architecture RCSF_{SM} (1D): L'architecture RCSF_{SM} unidimensionnelle (1D) fait référence à un réseau où les nœuds de capteurs sont déployés de manière autonome. Chaque nœud de capteur est un réseau autonome, responsable de la détection, du traitement et de la transmission des informations à la station de base [25]. Dans ce type d'architecture, un nœud peut être une bouée flottante capable de détecter les propriétés sous-marines ou être déployé sous l'eau pendant une période donnée pour détecter des informations, station de base remonter à la surface pour transmettre les informations détectées à la station de base. Il peut s'agir d'un véhicule sous-marin autonome (AUV) qui plonge dans l'eau, détecte ou collecte les propriétés sous-marines et transmet les informations à la station de base. Dans le réseau RCSF_{SM} (1D), les nœuds peuvent communiquer par voie acoustique, radiofréquence (RF) ou optique. En outre, la nature topologique du réseau RCSF_{SM} (1D) est en étoile, la transmission entre le nœud de capteurs et la station de base s'effectuant en un seul saut.

III.2.2 Architecture RCSF_{SM} (2D): L'architecture RCSF bidimensionnelle (2D) désigne un réseau dans lequel un groupe de nœuds de capteurs (cluster) est déployé sous l'eau. Chaque cluster possède une tête de cluster (également appelée cluster head CH). Chaque membre de cluster recueille les données sous-marines et les communique au nœud CH. Le nœud CH rassemble les informations données de tous ses nœuds membres et les relaie aux nœuds flottants de surface. Dans ce type d'architecture, la communication se fait en deux dimensions, c'est-à-dire que chaque membre du cluster communique avec son nœud CH par un lien de communications horizontales et le nœud CH communique avec le nœud flottant de surface par un lien de communication vertical. Dans le réseau RCSF_{SM} (2D), la communication acoustique, optique et RF peut être utilisée en fonction du type d'application et de la nature de l'environnement sous-marin. Dans le réseau RCSF_{SM} (2D), la communication acoustique est préférée pour le nœud CH sous-marin et le nœud flottant de

surface en raison de la distance généralement élevée qui les sépare. Pour la formation du cluster, la disposition du réseau peut être en étoile, en mailles ou en anneau, en fonction des exigences de l'application. Le réseau RCSF_SM (2D) peut être utilisé pour des applications à temps critique et tolérantes aux délais [1].

III.2.3 Architecture RCSF_SM (3D): Dans ce type de réseau, les capteurs sont déployés sous l'eau sous forme de cluster et sont ancrés à différentes profondeurs. En raison du déploiement des capteurs à des hauteurs variables, la communication entre les capteurs va au-delà des deux dimensions. Il existe trois scénarios de communication dans cette architecture :

- communication inter-clusters entre des nœuds situés à différentes profondeurs,
- communication intra-clusters (entre les capteurs et le nœud CH).
- communication entre nœuds CH et station de base.

Dans ces trois types de scénarios de communication, des liaisons acoustiques, optiques et RF peuvent être utilisées [1].

III.2.4 Architecture RCSF_SM (4D): Le réseau RCSF_SM quadridimensionnel (4D) est conçu par la combinaison d'un réseau RCSF_SM fixe, c'est-à-dire le RCSF_SM (3D) et d'un réseau RCSF_SM mobile. Le RCSF_SM mobile se compose de véhicules sous-marins télécommandés ROV (Under water Remotely Operated Vehicles) qui collectent les données des nœuds CH et les transmettent à la station de base. Les ROV peuvent être des robots submersibles autonomes, des véhicules, des navires et même des sous-marins. Chaque capteur sous-marin peut être autonome pour relayer les données directement aux ROV en fonction de la proximité de ce nœud de capteur particulier avec le ROV. Le scénario de communication entre le ROV et le capteur sous-marin dépend de la distance et des données entre eux et peut être acoustique ou radio. Comme la transmission doit être directement au ROV, les capteurs qui transmettent de données volumineuse (plusieurs ou important) et qui sont proches des ROVs peuvent utiliser des liaisons radio tandis que les capteurs qui ont peu de données à transmettre ou qui sont loin du ROV peuvent utiliser des liaisons acoustiques [2,3].

III.3 Classification des applications de Réseau de capteurs sans fil sous-marin :

Le nombre d'applications basées sur les RCSF_SM est en constante augmentation. Cette tendance est due aux progrès réalisés dans des domaines tels que l'électronique, les systèmes micro-électromécaniques (MEMS), les communications sous-marines, les capteurs sous-marins et l'étanchéité des équipements. Cette tendance est également due au fait que les océans, bien que couvrant de vastes zones de la Terre (70 % de la surface de la Terre avec une profondeur moyenne de 4 km [26]), sont encore considérés comme largement inexplorés et insuffisamment connus [27].

Un grand nombre d'applications des RCSF_SMs peuvent être classées comme des applications de surveillance. L'analyse de la qualité de l'eau, la surveillance de la pollution (chimique, biologique et nucléaire), la surveillance des courants marins, le suivi des poissons ou des micro-organismes, les mesures de pression et de température, ainsi que l'analyse de la

conductivité et de la turbidité, sont autant d'exemples de surveillance environnementale [28]. La surveillance des structures sous-marines telles que les plates-formes pétrolières, les conduites de pétrole et de gaz, les câbles de communication à haut débit enterrés et d'autres équipements peuvent être réalisées à l'aide de RCSF sous-marins. Parmi cette application :

III.3.1 Applications de surveillance: La surveillance sous-marine fait référence à un réseau de capteurs qui est déployé sous l'eau pour surveiller l'environnement sous-marin, ses propriétés ou tout objet d'intérêt. Ces applications sont particulièrement liées à la surveillance de l'environnement physique. Les applications de surveillance sous-marine peuvent également être classées:

- (1) surveillance de la qualité de l'eau.
- (2) surveillance de l'habitat sous l'eau.
- (3) surveillance des explorations sous-marines [27].

III.3.1.1 Qualité de l'eau: L'eau est une ressource précieuse et un facteur essentiel pour la survie des êtres vivants sous ou au-dessus de la surface de l'eau. Les applications de surveillance de la qualité de l'eau varient de la surveillance de la qualité de l'eau des canaux aux océans. Les chercheurs ont développé une application pour surveiller la qualité de l'eau des bassins pour les élevages de truites [4]. Pour la croissance des truites dans une ferme/piscine, divers paramètres ont été surveillés tels que la demande chimique en oxygène, l'azote ammoniacal (NH₃-N), le pH et la conductivité électrique (CE). Les paramètres ont été suivis pendant 270 jours entre août 2011 et avril 2012. Un algorithme a été proposé par les auteurs qui peuvent afficher les informations de l'entrée et de la sortie des quatre bassins. La comparaison a été faite en utilisant la logique floue pour évaluer les données détectées et notifier en cas de problème d'un état critique lorsque les paramètres dépassent les limites des valeurs seuils. Dans [29], les auteurs ont développé deux approches basées sur les RCSF_SM pour surveiller la qualité de l'eau dans un réseau de distribution d'eau potable. La première approche est basée sur l'utilisation de capteurs intégrés avec un mini-AUV responsable de la collecte des échantillons d'eau et la transmission des informations à la station de base. La deuxième approche consiste en des sondes montées sur des panneaux solaires utilisant une interface sans fil basée sur IEEE 802.15.4 pour collecter et transmettre les informations. Les deux approches ont été comparées en termes de temps total nécessaire au déploiement, de temps total nécessaire à l'analyse, de coût total de l'investissement et d'efficacité, le nombre total de mesures par analyse pour un site, le besoin d'opérateurs qualifiés, l'analyse en temps réel et la diversité des sondes [27].

III.3.1.2 la surveillance de L'habitat sous l'eau : La surveillance de l'habitat sous-marin concerne l'étude de l'environnement de tout organisme vivant au-dessus ou dans l'eau. C'est l'un des domaines les plus intéressants mais aussi les plus difficiles des sciences naturelles. La surveillance de l'habitat, lorsqu'elle est envisagée sous l'eau, devient encore plus difficile en raison des conditions sous-marines vulnérables. Les réseaux RCSF_SM peuvent également être utilisés pour des applications de surveillance des écosystèmes. Peuvent être classées en surveillance de la vie marine, surveillance de la pisciculture, et les applications de

surveillance des plantes sous-marines/récifs coralliens [27].

III.3.1.3 Exploration sous-marine: Il existe un grand nombre de minéraux présents sous l'eau qui doivent être explorés, comme le pétrole et le gaz. Il faut également rencontrer l'extrémité de l'eau en reliant une extrémité de la surface à une autre [27].

III.3.2 Catastrophes : En général, les catastrophes naturelles sont inévitables. Parmi elles, les catastrophes naturelles liées à l'eau sont plus dangereuses et provoquent d'énormes destructions sur la terre. Par conséquent, la surveillance des catastrophes et les mécanismes de prévention sont très nécessaires. Le RCSF_SM offre un large éventail d'applications pour la gestion et le traitement de telles catastrophes. Plus particulièrement, la surveillance des événements qui aggravent les conséquences d'une catastrophe. Outre l'insuffisance des ressources nécessaires à la surveillance complète d'une vaste étendue d'eau (par exemple l'océan), la tâche devient encore plus ardue lorsque les conditions météorologiques sont parfois impitoyables. Par conséquent, la surveillance efficace de la dynamique marine et aquatique est un défi de recherche important. Les stratégies de surveillance de RCSF_SM pour la gestion et peuvent être formulées dans une grande variété d'applications telles que les inondations, les éruptions volcaniques sous-marines, les tremblements de terre sous-marins et les tsunamis qui en résultent, et les marées noires qui entraînent des instabilités écologiques au-dessus et au-dessous de l'eau [27].

III.3.2.1 Inondations : Les répercussions d'une inondation et l'augmentation de sa fréquence ont poussé les chercheurs à trouver des moyens de d'alerte rapide en cas d'inondation. Ces alertes ne doivent pas seulement être placées sur rivages urbains et nécessitent donc un déploiement à distance. Le RCSF_SM permet de développer des solutions de déploiement de capteurs sous-marins avec des agents relais au-dessus de l'eau pour calculer les signes vitaux aquatiques [27].

III.3.2.2 Volcan, tremblement de terre et tsunami: Les tremblements de terre et les volcans sous-marins sont des catastrophes naturelles et des causes de mise en danger des êtres vivants. Ces calamités naturelles peuvent se produire n'importe quand et n'importe où sur la surface de la terre. Encore plus alarmantes lorsqu'elles se produisent sous l'eau, en fonction des changements sismiques et géologiques qui se produisent sous terre. Il est donc important de surveiller ces conditions. Les chercheurs ont discuté l'architecture des RCSF_SM et ont proposé une architecture 4D pour la surveillance précoce de l'environnement [30]. Cette architecture permet la génération d'alertes précoces en cas d'événements dangereux tels que les tremblements de terre. En cas d'événements dangereux tels que les tremblements de terre et les tsunamis. Les auteurs ont proposé une communication multi porteuse en utilisant la technique OFDM pour une communication sous-marine efficace dans de tels scénarios [27].

III.3.2.3 La marée noire : La pollution d'origine humaine est un facteur important à prendre en compte lorsqu'on parle de la santé de la vie marine. La vie marine est très affectée par la pollution due aux marées noires. Les réseaux RCSF_SM ont contribué à trouver l'emplacement et l'épaisseur des déversements d'hydrocarbures dans l'eau, ce qui peut accélérer la procédure de nettoyage [27].

III.3.3 Militaire: Les RCSF_SM sont également utilisés pour des applications militaires. Ces systèmes s'appuient sur différents capteurs déployés pour la détection de différents aspects des applications militaires tels que des caméras, des sonars d'imagerie, et des détecteurs de métaux intégrés aux AUV sont utilisés pour aider à la recherche de mines sous-marines, à la sécurisation des ports et des sous-marins, ils sont également utilisés pour le contrôle et la surveillance. Ces applications peuvent déboucher sur une solution économique pour protéger les forces navales [27].

III.3.3.1 Mines : Puisqu'un capteur peut détecter des paramètres physiques, c'est une pratique intellectuelle pour détecter les mines cachées sous l'eau. Cela peut aider les navires militaires à effectuer un voyage sans problème. Les mines sont généralement constituées de matériaux ferreux et peuvent être différenciées du fouillis sous-marin par le fait que le fouillis n'est pas métallique. Par conséquent, l'utilisation de capteurs de détection de métaux peut aider à trouver les débris sous-marins [27].

III.3.3.2 Localisation des sous-marins: La localisation de la cible est une autre application des RCSF_SM qui utilisent des AUV (Autonomous Underwater vehicle) pour localiser les sous-marins. Les méthodes conventionnelles de localisation des sous-marins nécessitent des calculs lourds. Ces systèmes basés sur les RCSF_SM tendent à fournir des solutions économiques aux problèmes de localisation [27].

III.3.3.3 La surveillance: Les RCSF_SM sont également utilisés à des fins de surveillance pour détecter l'intrusion de toute entité indésirable. Ils peuvent être utilisés à des fins de surveillance à proximité et en mer. Il existe un grand nombre d'applications pour la surveillance côtière, comme la détection des navires de guerre et l'arrivée de la logistique [27].

III.3.4 Navigation assistée de l'environnement sous-marin : La navigation assistée de l'environnement aquatique est extrêmement irrégulier, inexploré, aléatoire et sombre avec une profondeur croissante. Dans un tel environnement, il y a un besoin d'assistance pour la navigation des vaisseaux, des bateaux, des navires, et même des nageurs et des explorateurs. Les technologies d'assistance à la navigation qui sont les plus courantes à la surface de l'eau ne sont pas utilisées sous l'eau en raison du changement de support de transmission. Par conséquent, afin de localiser, guider et naviguer, il existe un besoin de technologies, de systèmes et d'applications de navigation assistée qui pourraient être utilisés sous l'eau. Dans cette perspective, le RCSF_SM peut être utilisé pour fournir des systèmes et des applications de navigation assistée [27].

III.3.5 Le sport: Un large éventail d'applications RCSF_SM existe également pour la catégorie des sports sous-marins. Ces applications sont différentes des autres applications RCSF_SM en termes de vitesse de la mobilité des nœuds, de paramètres de détection, etc. Dans [31], les auteurs ont présenté un réseau de capteurs sans fil utilisé pour surveiller les performances d'un nageur ou de plusieurs nageurs. La bande passante du réseau est prise en compte dans ce travail, où la performance est communiquée à l'entraîneur et aux autres nageurs simultanément. Dans [32], un objectif similaire est atteint, qui nécessite un retour d'information en temps réel aux entraîneurs.

III.4 Défis et opportunités de RCSF_SM :

Si le réseau RCSF_SM est un nouveau domaine prometteur qui peut aider à explorer le monde insondable se trouvant sous l'eau, il présente également de nombreux défis et opportunités:

III.4.1 Environnement sous-marin imprévisible: Les conditions sous-marines sont extrêmement imprévisibles. La haute pression anonyme de l'eau, les activités sous-marines imprévisibles et les profondeurs inégales de la surface sous-marine rendent difficiles la conception et le déploiement des réseaux RCSF_SM [27].

III.4.2 Conception et déploiement de réseaux complexes: En raison de l'environnement sous-marin imprévisible, il est extrêmement difficile de déployer sous l'eau un réseau qui fonctionne de manière fiable et sans fil. La technologie actuelle des câbles permet une communication limitée, mais elle entraîne des coûts importants de déploiement, de maintenance et de récupération des dispositifs pour faire face aux conditions sous-marines volatiles [27].

III.4.3 Inadaptabilité: L'exploration sous-marine traditionnelle repose sur soit un seul dispositif sous-marin coûteux, soit sur un réseau sous-marin à petite échelle. Aucune des deux technologies existantes n'est pour des applications couvrant une grande surface. La mise en place d'une technologie de réseau de capteurs sous-marins évolutive est essentielle pour explorer l'immense espace sous-marin [27].

III.4.4 Informations peu fiables: les nœuds sous-marins sont en mouvement continu en raison des courants marins ; la localisation des nœuds sous l'eau devient donc beaucoup plus cruciale. Les systèmes traditionnels de positionnement et de localisation ne fonctionnent pas sous l'eau. Par conséquent, les conditions sous-marines démantèlent la localisation des nœuds et la topologie du réseau, ce qui rend finalement la transmission des informations peu fiable [27].

III.4.5 Nécessité de nouveaux protocoles pour les RCSF_SM: Dans la communication sous-marine, le milieu de communication est l'eau, contrairement à l'air dans les réseaux de capteurs terrestres. Par conséquent, les protocoles de communication des réseaux de capteurs terrestres ne sont pas utilisés sous l'eau. La plupart du temps, les signaux acoustiques sont utilisés pour la communication sous-marine sur de grandes distances, tandis que les ondes radios sont considérées pour la communication à courte distance, à la surface de l'eau. Mais les signaux radio transmettent sur de longues distances à des fréquences très basses, ce qui nécessite de grandes antennes et une puissance de transmission élevée [33], ce qui peut réduire la durée de vie globale du réseau RCSF_SM. En outre, le délai de propagation de la communication acoustique est très élevé par rapport à la communication RF, ce qui explique que de nombreux algorithmes et protocoles destinés aux réseaux terrestres sans fil ne peuvent être adaptés directement aux réseaux sans fil.

III.4.6 Faibles débits de données: Les communications par radiofréquence (RF) ne sont pas efficaces dans les communications sous-marines en raison de l'effet du milieu sur la communication. L'eau absorbe une grande partie de l'énergie RF et par conséquent, seule une

communication à très courte portée est possible avec la RF [34]. En revanche, la communication acoustique est utilisée pour transmettre des signaux d'impulsion et des informations de faible fidélité sous l'eau en raison de sa faible largeur de bande. Les applications RCSF_SM potentielles, telles que la mesure du niveau de pollution d'une ferme de pêche au fond de la mer [35], nécessitent la transmission de nombreuses données. Cependant, avec des fréquences aussi basses, il faut beaucoup de temps pour envoyer ces données dynamiques.

III.4.7 Dommages physiques de l'équipement : les capteurs utilisés dans les dispositifs sous-marins sont susceptibles de subir les problèmes courants de la vie sous-marine, par exemple, l'accumulation d'algues sur l'objectif de la caméra [36] et l'accumulation de sel qui réduit l'efficacité des capteurs, etc.

IV. Différences entre les réseaux de capteurs sans fil terrestres et sous-marins :

RCSF	RCSF_SM
La plupart des applications nécessitent un déploiement dense	Le déploiement éparse est préféré, non seulement en raison des équipements coûteux, mais aussi pour couvrir de grandes zones surveillées
La plupart des architectures de réseau supposent que les nœuds de capteurs sont stationnaires différentes topologies peuvent être appliquées	Les nœuds continuent de se déplacer 1-3 m/s avec les courants d'eau. La topologie du réseau n'est pas toujours fixe
Un réseau avec des nœuds statiques est considéré plus stable notamment en termes de liens de communication	Le routage avec des nœuds mobiles est plus difficile non seulement en termes d'optimisation des routes mais aussi de stabilité des liens en termes d'optimisation des routes mais aussi la stabilité des liens devient un problème important.
Généralement est considéré plus fiable en raison d'une grande compréhension des conditions de liaison sans fil.	La fiabilité est une préoccupation majeure en raison des conditions inhospitalières. Les liaisons de communication sont confrontées à un taux d'erreur élevé et à des pertes temporaires. Les approches tolérantes aux pannes sont privilégiées
Les nœuds se déplaçant dans l'espace 2D même lorsqu'ils sont déployés en tant que réseaux ad hoc	Les nœuds peuvent se déplacer dans un volume 3D sans suivre aucun modèle de mobilité
Habituellement, la destination est fixe et change rarement d'emplacement.	Les stations de base ou destinations sont placés à la surface d'eau et peuvent se déplacer avec le courant de l'eau

Le déploiement affecte les performances du réseau. En général, les données sont acheminées par des chemins prédéterminés	Le déploiement non uniforme et aléatoire est courant. Des protocoles de routage plus auto-configurables et auto-organisés sont nécessaires pour gérer le déploiement non uniforme.
Dans la plupart des cas, les nœuds sont supposés être homogènes dans le réseau.	Les réseaux hétérogènes sont courants. L'inclusion d'un ensemble de nœuds hétérogène soulève de multiples problèmes techniques liés au routage des données
Les ondes radio sont disponibles, les nœuds peuvent communiquer avec faibles délais de propagation à vitesse de la lumière	Les ondes acoustiques remplacent les ondes radio (à une vitesse de $1.5 \cdot 10^3$ m/s) La vitesse de communication passe de la vitesse de la lumière à celle du son, ce qui entraîne de délais de propagation élevés (cinq ordres de grandeur)
Débit de données élevé, normalement de l'ordre de Mbit	Faible débit de données, normalement de l'ordre du Kbit. peut dépasser 40 kb/s à une distance de km
Augmentation du nombre de sauts pendant le processus de routage	Le nombre de sauts dépend de la profondeur de la zone de surveillance.
Faible consommation d'énergie.	Consommation d'énergie élevée en raison des distances plus longues (conséquence du déploiement de nœuds épars) et du traitement complexe du signal
Des piles plus grandes peuvent être utilisées et peuvent être remplacées ou rechargées avec facilité.	La puissance de la batterie est limitée et ne peut être facilement remplacées ou rechargées. Les protocoles de routage doivent adopter un mécanisme de mise hors tension pendant la communication et utiliser un minimum de retransmission.
Les nœuds sont moins sujets aux erreurs et peuvent continuer à fonctionner pendant le temps.	Les nœuds sont plus sujets aux erreurs et peuvent mourir (en raison de l'encrassement ou la corrosion) ou quitter la zone de travail. Des algorithmes de routage plus fiables et à récupération automatique sont nécessaires.
La localisation coopérative utilisant la technique du temps d'arrivée (ToA) et la différence de temps d'arrivée (TDoA) sont utilisés pour localisation sans GPS	Les techniques comme TDoA ne sont pas réalisables en raison de l'indisponibilité d'une synchronisation précise dans l'eau
Des schémas comme l'indice de puissance récepteur (RSSI) peuvent être utilisé pour la localisation coopérative	Le RSSI est très vulnérable aux interférences acoustiques telles que les trajets multiples, l'étalement de la fréquence Doppler et le bruit de la marée proche du rivage, et ne peut

	fournir une précision pour plus de quelques mètres
Les techniques de demande de répétition automatique telle que les techniques ARQ (Automatic Repeat Request) sont utilisées pour la récupération des erreurs et la perte de paquets	Les techniques ARQ sont inefficaces en raison des grands délais de propagation importants, car les retransmissions provoquent une latence excessive ainsi que des surcharges de signalisation
Les techniques de correction d'erreur directe (FEC) sont utilisées pour augmenter la robustesse contre les Erreurs	La correction d'erreur directe n'est pas facilement abordable en raison de la redondance des bits dans une bande passante extrêmement étroite. Bande passante extrêmement réduite de la communication acoustique
GPS utilisent la bande des GHz pour les réseaux de capteurs terrestres ces fréquences sont prises en charge et la fonction GPS peut être utilisée à des fins de localisation	Le routage géographique n'est pas pris en charge car ces bandes à haute fréquences ne sont pas pratiques pour les RCSF_SM. En fin de compte, il faut s'en remettre à des schémas de localisation ou de synchronisation temporelle, connus sous le nom de localisation coopérative.

Tableau I-1 Différences entre les réseaux de capteurs sans fil terrestres et sous-marins [37].

V. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les RCSF en générale et en cas particulier les RCSF-SM, nous avons définis le réseau de capteurs sans fil, son architecture, ses types, ses applications et ses critères de performances.

Ensuite nous avons détaillé les RCSF-SM : ses applications, ses architectures et ces défis. En finira par une petite comparaison entre les RCSF et les RCSF-SM. Dans le deuxième chapitre on va aborder la notion du routage dans les RCSF-SM.

Chapitre II. Protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins

I.Introduction :

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins ont des conditions environnementales très différentes de l'environnement de la terre à cause de plusieurs problèmes due à la transmission des données collectées par les capteurs et les requêtes envoyées par la station de base. Selon ses problèmes, la technique de routage est la solution la plus efficace pour assurer un fonctionnement correct de ce type de réseau est de choisir une technique de routage optimale. En raison des propriétés spéciales de la transmission des données de la RCSF_SM caractérisées par des conditions environnementales sous-marines et transmission des nœuds du capteur et ses fonctions, ce chapitre a abordé l'aperçu et les fonctionnement et quelque avantages et inconvénient des protocoles de routage.

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins ont des conditions environnementales très différentes de l'environnement terrestre à cause de plusieurs problèmes due à la transmission des données collectées par les capteurs, et les requêtes envoyées par la station de base Selon ses problèmes, la solution la plus efficace pour assurer un fonctionnement correct de ce type de réseau est de choisir une technique de routage optimale.

II.Définition de routage dans un réseau de capteur sans fil sous-marins :

Le routage est un processus qui sélectionne les chemins par lesquels les unités de données de protocole appelées paquets, se propagent de la source à la destination. C'est la fonction principale de la couche réseau.

Les deux fonctions principales effectuées par un algorithme de routage sont : la sélection de routes pour diverses paire source-destination et la remise des messages à leur destination correcte une fois que les routes sont sélectionnées. La deuxième fonction est conceptuellement simple en utilisant une variété de protocoles et de structures de données (appelées tables de routage) [38].

Le routage dans un environnement sous-marin est l'un des domaines de recherche les plus difficiles en raison de la nature du canal acoustique et de l'environnement sous-marin hostile [39]. De plus, le routage dans les capteurs sous-marins inclut souvent le routage des données collectées par les nœuds du réseau pour une ou plusieurs destinations ces données sont caractérisées par des corrélations spatiales et temporelles c'est très important par rapport à la haute densité de déploiement des nœuds. [40, 41, 42].

III. Les défis du routage dans les réseaux de capteurs sans fil sous-marins :

Dans cette section, les défis concernant les réseaux de capteurs sous-marins sont présentés, ce qui rend la communication sous-marine difficile et problématique par rapport à la communication des réseaux de capteurs terrestres. Dans les réseaux de capteurs sous-marins, des défis tels que la fiabilité et l'utilisation efficace de la liaison de communication acoustique, la sélection de la taille optimale des paquets pour la communication, la

consommation d'énergie, la localisation distribuée, les effets environnementaux, le contrôle d'accès aux médias et le protocole de routage du réseau doivent encore être abordés. Ces problèmes requièrent l'attention du monde universitaire et de la communauté des chercheurs. La section suivante décrit les efforts déployés par les chercheurs pour résoudre ces problèmes [43].

III.1 Long délai de propagation des communications :

Le routage dans les réseaux sans fil terrestres peut être réalisé par des défis multiples et des confirmations répétées, et le retard causé par ces opérations est négligeable en raison de la vitesse de propagation de la radio. Cependant, le routage dans les réseaux sans fil sous-marins subit un long retard, car la propagation des signaux acoustiques n'est que d'environ 1500 m/s, et que la confirmation et défis répétées entraînent un long d'attente, ce qui réduit l'efficacité de la communication sur l'ensemble du réseau [44].

III.2 Effet de l'environnement :

Les organismes marins sont affectés par les sons anthropogéniques émis dans l'environnement sous-marin, de diverses manières par exemple, les organes de l'audition sont affectés sous la forme d'une perte d'audition. Les ondes sonores à haut potentiel reçues par les marins peuvent les blesser et peuvent aussi devenir la cause de leur mort [45]. Actuellement, la communication sous-marine utilise différents types de méthodes de communication, par exemple optique, électromagnétique et acoustique. Seule la communication acoustique répond aux exigences de la communication sous-marine en raison d'une atténuation moindre et d'une faible absorption dans l'eau de mer [46].

La vitesse du son n'est pas constante dans l'océan. Près de la surface de l'océan, la vitesse du son est de 1500 m/s, c'est-à-dire quatre fois, par rapport à la vitesse du son dans l'air. La partie supérieure de l'océan est appelée couche superficielle, dans laquelle le changement de température est moins important, tandis que dans la couche inférieure (thermocline), la température est un facteur important qui affecte la vitesse du son par rapport aux autres [47].

La vitesse du son augmente en raison de l'augmentation de la température de l'océan et diminue dans les océans plus froids. Approximativement, le montage de 1°C peut augmenter la vitesse du son de près de 4.0 m/s. Une augmentation de 1 unité de salinité pratique peut augmenter la vitesse du son de près de 1,4 m/s, lorsque nous marchons en profondeur, la pression de l'eau de l'océan continue d'augmenter, par conséquent, chaque profondeur de 1 km augmentera la vitesse du son de près de 17 m/s [48]. Dans cette étude, les auteurs ont discuté des problèmes de l'environnement sous-marin et ont observé que les ondes acoustiques sont utilisées pour obtenir différents paramètres de l'environnement et il n'y a pas de normalisation des paramètres pour la surveillance de l'environnement sous-marin, ce qui se traduit par une variété de systèmes de surveillance mais aucun d'entre eux ne constitue une norme [49].

III.3 Mobilité des nœuds :

Contrairement aux nœuds de capteurs fixés au sol dans les réseaux sans fil terrestres, ceux des réseaux sans fil sous-marins sont généralement placés de manière aléatoire, ou semi-fixes par

le biais des câbles et des ancrages. Par conséquent, les emplacements des nœuds de capteurs ne sont pas fixes pendant le processus de routage. Dans un environnement dynamique, un itinéraire existant peut être rompu si l'efficacité temporelle et la robustesse de la mise à jour et du maintien de l'itinéraire deviennent plus exigeantes. Comme les signaux de positionnement, tels que le signal de positionnement global (GPS), sous l'eau, il est difficile d'obtenir des informations en temps réel et précises sur la position des nœuds sous l'eau, conduisant à des problèmes de localité qui génèrent certaines difficultés dans la conception des algorithmes de routage [44].

III.4 Économie d'énergie :

Comme la durée de vie de chaque nœud sous-marin est limitée en raison de la puissance de transmission élevée, de la faible charge de la batterie et de la difficulté à la remplacer, il faut envisager des économies d'énergie [50].

IV. Classification des protocoles de routage dans les RCSFs-SM :

Les protocoles de routage sous-marin sont divisés en trois catégories : les protocoles basés sur l'énergie, les protocoles basés sur les données et les protocoles basés sur les informations géographiques. Parallèlement, nous présenterons quelques protocoles de routage typiques dans diverses catégories. Les protocoles typiques permettent aux lecteurs de comprendre plus rapidement et plus clairement la structure et les caractéristiques des protocoles de classification [51].

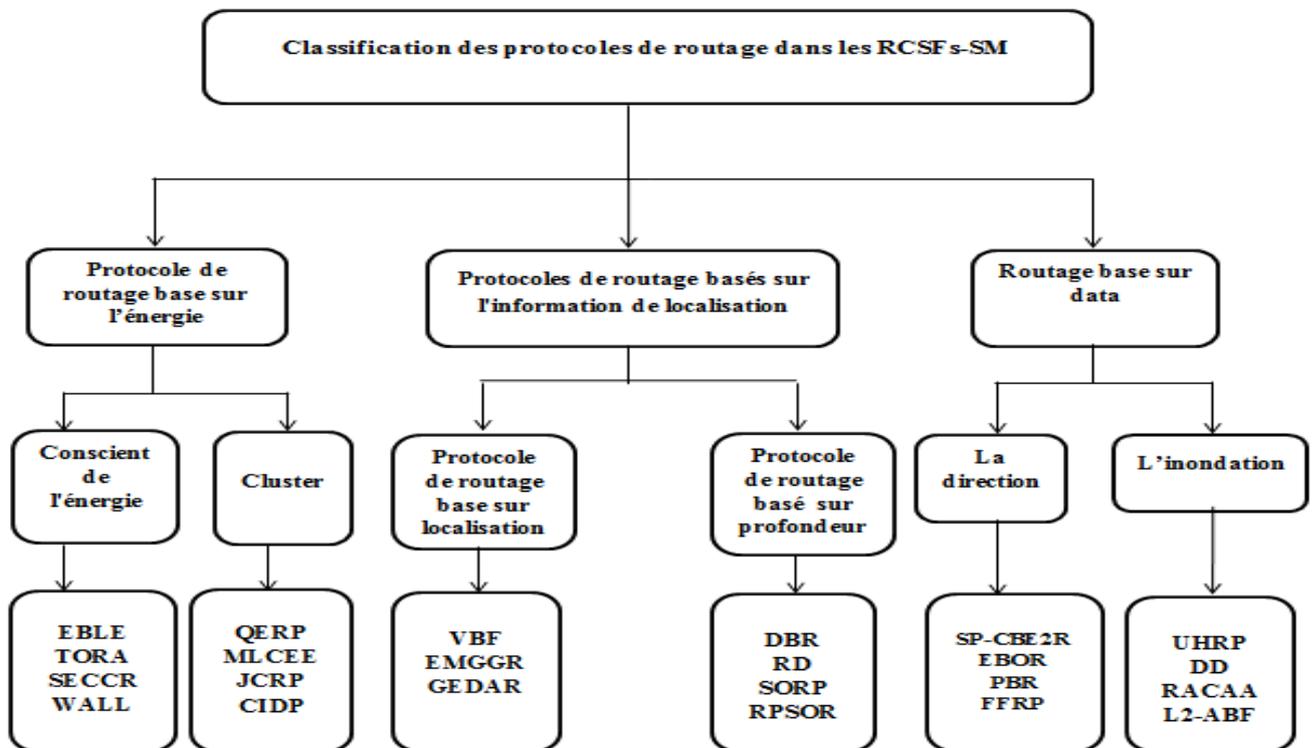


Figure II.1 Les classifications des protocoles de routage dans le RCSF_SM [51].

IV.1 Protocole de routage base sur l'énergie :

L'environnement sous-marin étant très complexe, la batterie des nœuds de capteurs sous-marins ne peut être remplacée régulièrement. Par conséquent, le facteur principal des protocoles de routage sous-marins est la limitation de l'énergie. Ces protocoles exigent une consommation d'énergie minimale des nœuds sur le chemin de transmission, ce qui est très important pour prolonger la durée de vie globale du réseau sous-marin. Les protocoles de routage à faible consommation d'énergie sélectionnent la route la plus appropriée entre le nœud source et la destination pour le transfert des données en fonction de l'énergie disponible du capteur (l'énergie résiduelle actuelle du nœud) ou de la demande d'énergie sur le chemin de transmission [51].

IV.1.1 Protocoles de routage conscient de l'énergie:

Le nœud capteur doit connaître le nœud de saut suivant du chemin vers le nœud de destination et sélectionner le nœud ayant le coût le plus bas. En même temps, il peut y avoir plus d'un chemin pour chaque capteur pour atteindre le nœud de destination, et le chemin avec la moindre consommation d'énergie doit être sélectionné en fonction de la situation énergétique du nœud. Les protocoles de routage basés sur la perception de l'énergie peuvent bien gérer le problème de la consommation d'énergie des nœuds et trouver la meilleure transmission. Des nœuds de capteurs et trouver le meilleur chemin de transmission. Un exemple de cette catégorie est décrit ci-dessous [51].

EBLE (energy balanced and life time extended) : Le protocole de routage EBLE est proposé pour prolonger la durée de vie du réseau pour les RCSF sous-marins. Le processus de transmission de données EBLE se compose de deux phases : la phase de sélection et la phase de transmission des données. Dans la première phase, le nœud met à jour les nœuds de transmission possibles en diffusant les informations sur l'emplacement et le niveau d'énergie résiduelle. La valeur du coût du nœud est calculée et stockée dans chaque nœud. Dans la phase de transmission des données, les nœuds transmettent principalement des paquets de données et mettent à jour les niveaux d'énergie résiduelle. Les chemins optimaux sont sélectionnés en fonction du coût et des informations sur le niveau d'énergie résiduelle. Le protocole EBLE peut équilibrer efficacement la consommation d'énergie du réseau et prolonger la durée de vie du réseau [52].

IV.1.2 Protocoles de routage à base de cluster:

Les protocoles de routage basés sur des grappes (cluster) divisent l'ensemble du réseau en cluster dynamiques en fonction des exigences du protocole de routage. Chaque cluster comprend un nœud de tête de cluster (CH) et plusieurs nœuds membres intra-cluster, et chaque cluster peut traiter les informations de données dans la zone du cluster selon les critères correspondants. Les nœuds voisins sont gérés par tête de cluster. Ce dernier peut transmettre les données traitées à la station de base afin de réduire le nombre de transmissions de données et la consommation d'énergie. Comme ils doivent coordonner le travail des nœuds de la zone de cluster et sont responsables de la fusion et de la transmission des données donc la consommation d'énergie est relativement importante. Par conséquent, les protocoles de

routage sous-marins basés sur les clusters adoptent généralement la méthode de sélection du nœud de tête de cluster pour équilibrer la consommation d'énergie des nœuds du réseau et maximiser la durée de vie du réseau [51].

QERP (quality-of-service aware evolutionary cluster-based routing protocol): Un nouveau protocole de routage évolutionnaire à base de grappes (QERP), qui tient compte de la qualité de service (QoS), est proposé pour améliorer la fiabilité du transfert de données pour les applications basées sur les réseaux sans fil intelligents. Le nœud CH dont la charge de trafic de données et la consommation d'énergie sont minimales est sélectionné comme nœud relais pour transmettre les informations. Pendant ce temps, les nœuds relais peuvent modifier leur niveau de puissance de transmission pour économiser d'énergie [53].

IV.2 Protocoles de routage basés sur les informations de localisation :

IV.2.1 Protocoles de routage basé sur la localisation :

La conception de protocoles de routage et le comportement des ondes acoustiques pour les réseaux de capteurs sans fil sous-marins RCSF_SM ont été étudiés pendant des décennies. Pour la transmission fiable des données à la destination et la découverte du réseau, les protocoles de routage jouent un rôle essentiel. Les protocoles de routage de réseau de capteurs sans fil sous-marin (RCSF_SM) ont été classés en trois catégories principales : le routage basé sur la localisation, le routage sans localisation et le routage coopératif, Nous traitons ces trois catégories séparément dans différentes sections. Dans cette section, les protocoles de routage basés sur la localisation sont discutés avec leurs avantages et leurs inconvénients [54].

VBF (Vecor-based Forwarding): Le VBF est un protocole de routage basé sur la localisation qui suppose que chaque capteur porte leurs informations de position, de la destination et de tous les expéditeurs. Les messages de contrôle ne sont pas utilisés pour la collecte d'informations dans ce protocole, et un seul puits est supposé dans le réseau. Une pipe de routage virtuel est créée en utilisant les informations de position des nœuds de la source et de la destination. Chaque champ d'en-tête d'un paquet comprend les informations de position de la source, du transitaire et de la destination, ainsi que la portée et le rayon de la pipe de routage. Les nœuds présents dans le rayon pré contrôlé du tuyau de routage le long du vecteur de routage sont sélectionnés. En tant que transitaires. Les nœuds qui sont présents dans la pipe de routage virtuel sont considérés comme des transitaires potentiels et participent au processus de routage. Le paquet est écarté par les nœuds qui sont présents en dehors de la pipe de routage virtuel [55].

Les avantages :

- 1) la réduction du trafic réseau en permettant à des transitaires spécifiques de contribuer à la transmission des paquets qui se trouvent à proximité de la pipe de routage virtuel.
- 2) Dans les réseaux denses, le taux de livraison des paquets (PDR) augmente, car il y a un plus grand nombre de transitaires potentiels [54].

Les inconvénients:

- 1) un faible taux de livraison des paquets (PDR) sur les réseaux clairsemés.
- 2) Le protocole VBF ne peut pas découvrir un chemin pour envoyer le paquet vers la destination et les paquets seront rejetés.
- 3) Le protocole VBF n'est pas capable de récupérer la région vide.
- 4) Le transfert de paquets ne permet pas d'équilibrer l'énergie, car les nœuds proches de la pipe de routage virtuel sont utilisés plus fréquemment [54].

IV.2.2 Protocole de routage basé sur la profondeur:

Dans cette section, la localisation au moyen du signal GPS n'est pas non plus efficace car le signal électromagnétique ne se propage pas efficacement dans l'environnement sous-marin. L'acquisition d'informations sur la localisation complète d'un nœud de capteur sous-marin est une tâche difficile. Les ressources des nœuds sont gaspillées pour obtenir les informations de localisation en raison de l'échange intensif de paquets de contrôle. Par conséquent, les algorithmes de routage sans localisation sont préférés car ces protocoles ne nécessitent que l'information de la profondeur des nœuds de capteurs pour le routage des données [54].

DBR (Depth-Based Routing): le DBR est un protocole de routage basé sur le récepteur sans localisation, où les nœuds de capteurs calculent la profondeur à l'aide d'un capteur de profondeur au lieu d'obtenir des dimensions de localisation complètes. Plusieurs stations de base sont positionnées à la surface de l'eau pour la collecte des données. Les décisions de routage reposent sur la valeur de la profondeur des nœuds de capteurs. Les nœuds de capteurs plus profonds transfèrent des paquets de données aux nœuds de capteurs moins profonds. Pendant la transmission des paquets, la valeur de la profondeur actuelle est insérée dans le champ d'en-tête. Lorsque les paquets de données sont reçus par les nœuds voisins, ils comparent le champ de profondeur dans l'en-tête du paquet avec leur propre profondeur par l'inspection du paquet. Le paquet de données ne sera transmis que si la profondeur actuelle est inférieure à celle de l'en-tête du paquet reçu. Le concept de temps de maintien est utilisé pour éviter les transmissions redondantes. Le paquet est transmis de cette manière vers le récepteur. Si le paquet est reçu sur n'importe quelle station de base, il est considéré comme délivré avec succès à la destination finale. Ce protocole présente certains inconvénients. Tout d'abord, dans les réseaux clairsemés, il n'est pas très performant. Le problème de la région vide peut se produire en raison du routage de manière avide. Deuxièmement, les défaillances des nœuds de capteurs proches de la station de base se produisent plus tôt en raison du comportement de convergence [56].

IV.3 Protocole de routage basé sur data :

La transmission des données est le but ultime de tout protocole de routage dans le réseau. Dans les protocoles de routage Traditionnels, la localisation des nœuds est généralement utilisée comme base pour l'identification des nœuds dans le routage. Dans le processus de déploiement, ce que nous voulons, c'est qu'un réseau de capteurs sans fil détecte les données de la zone plutôt que celles d'un nœud spécifique. Lorsque l'événement se produit, les nœuds dans la portée perçue détecteront et commenceront à collecter des données et les transmettront au nœud récepteur pour un traitement ultérieur. Les protocoles de routage basés sur les

données considèrent principalement les informations de données du nœud source au nœud de destination et sélectionnent le chemin le plus approprié basé sur les informations de données dans le processus de transmission [57].

IV.3.1 Protocoles adressant la conscience de la direction :

Les capteurs sélectionnent le meilleur saut suivant pour transmettre des données selon la méthode spécifique proposée dans les protocoles adressant la conscience de la direction. Ces protocoles de routage basés sur la conscience de la direction concernent principalement l'efficacité de la transmission des données [51].

SP-CBE2R (Shortest Path-Collision avoidance Based Energy efficient Routing): le SP-CBE2R est conçue pour répondre aux problèmes critiques de la forte consommation d'énergie, du retard de bout en bout, du faible taux de livraison des paquets et de la durée de vie minimale du réseau pour les RCSF_SM. Le prochain nœud d'acheminement est sélectionné à l'aide de l'algorithme de Dijkstra (du nœud source actuel vers le nœud de messagerie destinataire) avec un minimum de nœuds voisins pour éviter une collision. Ce protocole de routage évite le problème du vide en utilisant le concept de superposition pour améliorer l'efficacité de la transmission des données [58].

IV.3.2 Protocole de routage basé sur l'inondation :

Le protocole de routage basé sur l'inondation est le plus ancien des protocoles de routage proposés. Dans le protocole d'inondation, le nœud qui reçoit l'information transmet le paquet aux nœuds voisins sous forme de diffusion jusqu'à ce qu'il ait atteint son but. Le paquet est diffusé jusqu'à ce que les données atteignent le nœud de destination ou atteignent un préétabli nombre maximum d'ajustements. La plupart des protocoles de routage par inondation sont des algorithmes de routage simples et efficaces qui ne nécessitent pas la maintenance de la topologie du réseau et un routage computationnel. Les protocoles d'inondation ont les avantages suivants une mise en œuvre simple et une bonne tolérance aux pannes. Cependant, Il existe des problèmes tels que la diffusion interne du message et le gaspillage des ressources. Un protocole basé sur l'inondation est Décrit comme suit [59].

UHRP (Hybrid Underwater Routing Protocol): UHRP est proposé pour réduire la surcharge de routage pour les RCSF sous-marins. Le protocole proposé considère les caractéristiques hybrides des protocoles de routage basés sur l'inondation et des protocoles de routage ad-hoc réactifs afin d'assurer la continuité du routage pour assurer une transmission efficace des paquets de données. De nombreux protocoles de routage basés sur l'inondation reposent sur les informations de localisation des nœuds. Cependant, les techniques de localisation actuelles ne peuvent pas fournir l'information de localisation exacte à tous les nœuds de capteurs. Dans le protocole UHRP, l'information de localisation spécifique de certains nœuds de capteurs est connue. Les nœuds localisés transmettent des paquets vers le nœud récepteur en utilisant les nœuds non localisés établissent un chemin du nœud non localisé au nœud le mieux localisé (nœud transitaire d'inondation) par le biais d'un établissement de chemin effectué via une méthode de routage ad-hoc réactive [60].

V. Routage basé sur le méta heuristique pour les réseaux des capteurs sans fil sous-marins :

V.1 protocole de routage basé sur l'algorithme génétique pour le positionnement et le déploiement des réseaux de capteurs sous-marins:

Plusieurs techniques de recherche opérationnelle ont été proposées dans la littérature [61,62] pour optimiser le positionnement des nœuds de capteurs afin d'obtenir une couverture maximale. Cependant, en raison du grand nombre de paramètres et d'incertitudes découlant des caractéristiques anisotropes de l'environnement et des capteurs dans le milieu sous-marin, les approches conventionnelles de recherche opérationnelle pour l'optimisation deviennent coûteuses en termes de calcul en trois dimensions. Afin de surmonter l'explosion de l'espace d'état pour les positions, une technique d'optimisation basée sur les AG a été proposée. Les algorithmes génétiques fournissent une approche évolutive pour résoudre de tels problèmes en visant à améliorer la forme physique de chaque génération successive [63].

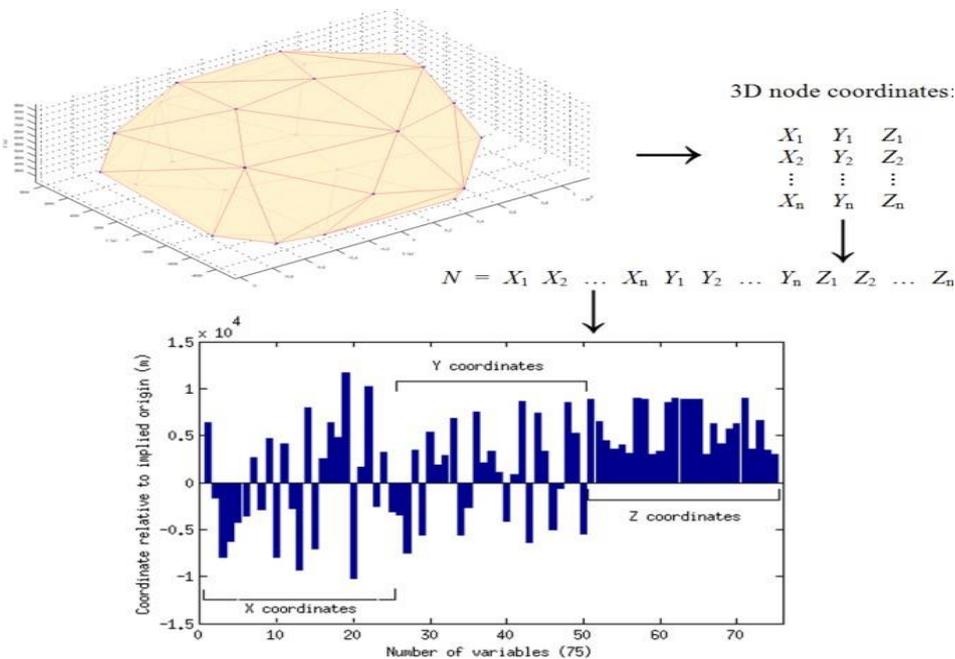


Figure II.2 Formation et visualisation du chromosome utilisé dans l'AG [63].

Un membre individuel d'une génération de population de l'AG est représenté par son chromosome, qui représente un certain arrangement spatial de nœuds en trois dimensions (figure II.2). Une population distribuée aléatoirement dans les limites souhaitées de l'espace de recherche. Une fonction de fitness est ensuite définie, qui attribue un score à chaque membre de la génération actuelle en fonction de l'évaluation des caractéristiques pertinentes. La fonction de sélection classe ensuite les membres de la population actuelle en fonction de leurs scores d'aptitude et leur attribue un poids, échelonnant ainsi le nombre de descendants qu'ils engendrent en fonction de leur rang. Une certaine fraction des individus les plus aptes est marquée élite, qui se propage telle quelle à la génération suivante. Il s'agit de préserver le génome des meilleures solutions trouvées jusqu'à présent pour participer à la sélection de la génération suivante. Après, la progéniture est formée par la fonction croisée consistant à choisir au hasard des points de croisement dans les chromosomes des parents respectifs et à

relier les sous-chaînes de gènes sélectionnées à ces points. Ce processus est répété avec différents groupes de parents, selon le facteur de sélection, jusqu'à ce que le nombre de descendants requis pour former une population soit généré à la génération suivante. Une fraction spécifiée de la génération suivante est formée par la progéniture créée par mutation du génome de parents individuels. Son but est de maintenir la diversité au sein de la population et d'empêcher une convergence prématurée vers un maximum local [63].

V.2 Algorithme de routage en grappe basé sur des algorithmes améliorés d'optimisation de colonies de fourmis pour les réseaux de capteurs sans fil sous-marins:

En raison de la complexité de l'environnement sous-marin, l'efficacité de la transmission des données des nœuds de capteurs sous-marins vers un nœud récepteur est confrontée à des problèmes de la consommation d'énergie. En vue de résoudre ces problèmes un algorithme de routage a été proposé basé sur des clusters et sur un algorithme d'optimisation de colonies de fourmis (ACO) amélioré [64].

Dans les algorithmes de routage en cluster, le réseau est divisé en plusieurs clusters, et chaque cluster est constitué d'un nœud de cluster head (CH) et de plusieurs nœuds de capteurs.

Dans [64], la sélection du CH est optimisée en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds et du facteur de distance. Le CH sélectionné recueille les données envoyées par les nœuds de capteurs et les transmet au nœud de station de base par plusieurs sauts. Les chemins multi-sauts optimaux entre les CH et la station de base sont trouvés par un algorithme ACO amélioré.

L'algorithme ACO est largement utilisé pour trouver un chemin optimal entre un nœud source et un nœud de destination. Lorsqu'elles recherchent le nœud de destination, les fourmis artificielles déposent une substance chimique appelée phéromone sur le chemin qu'elles empruntent [65]. La phéromone est le moyen utilisé par les fourmis pour communiquer et elle guide les autres fourmis. Les fourmis sont plus susceptibles de suivre un chemin dont la concentration en phéromone est plus élevée, et les fourmis suivantes libèrent également des phéromones sur le chemin, ce qui augmente la concentration en phéromone. Ce dernier attire davantage de fourmis, ce qui forme une boucle de rétroaction positive [66]. La matrice de phéromone est une matrice bidimensionnelle utilisée pour enregistrer les valeurs de phéromone sur chaque chemin partiel. De plus, la phéromone se volatilise avec le temps. Après que toutes les fourmis ont terminé une recherche de chemin, la matrice de phéromone doit être mise à jour.

V.3 L'algorithme de fusion d'ACOA-AFSA :

Algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (ACOA) et algorithme de l'essaim de poissons artificiel (AFSA) :

Les fourmis laissent des phéromones sur leurs chemins de passage afin que les autres fourmis puissent retrouver facilement les fourmis précédentes. De plus, la fourmi va prendre le chemin qui a des phéromones plus élevées laissées par d'autres fourmis que les autres chemins à proximité. Ainsi, la colonie de fourmis peut trouver sa fin facilement avec l'aide de l'information positive des phéromones. En d'autres termes, bien que la fourmi soit une espèce non intelligente, Les activités de la colonie de fourmis représentent l'intelligence vivante. Les avantages de l'ACOA sont l'auto-organisation, le processus distribué, La rétroaction positive, et une bonne robustesse. Ainsi, l'ACOA est pour la résolution de problèmes NP-hard comme le protocole de routage dans les RCSF sous-marins. Mais nous remarquons que l'ACOA peut converger vers une solution optimale locale au lieu d'une solution optimale globale Parfois [67].

Les poissons peuvent trouver des zones spécifiques riches en nutriments dans leurs eaux de vie par eux-mêmes ou en suivant d'autres poissons rapidement. Ainsi, la zone qui compte le plus grand nombre de poissons est la zone la plus nutritive de l'eau. Selon les caractéristiques, Xiaoli propose un algorithme d'essaimage artificiel de poissons [68]. L'algorithme d'essaimage artificiel de poissons (AFSA) peut produire une solution globale en simulant les activités de recherche de nourriture, de regroupement. L'AFSA a un modèle d'algorithme simple et de fortes capacités à sortir de la solution locale et de converger vers la solution globale. Cependant l'AFSA peut difficilement obtenir une solution de haute précision parfois.

De plus, dans la phase de recherche de nourriture de l'AFSA, les poissons artificiels individuels peut choisir un nouveau statut au hasard s'il ne peut pas obtenir un meilleur statut que le statut actuel. Cela signifie que les l'information bénéfique précédente n'est pas pleinement utilisée. Ainsi, les avantages et les Inconvénients de l'AFSA peuvent être utilisés et compensés par l'ACOA [67].

Fusion d'ACOA-AFSA :

L'idée de base de l'algorithme de fusion est qu'il prend l'algorithme de l'essaim de poissons artificiels et introduit l'idée de l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis. Ainsi, l'algorithme des colonies de fourmis profite de la rapidité de l'AFSA et de sa solution globale pour atteindre une convergence rapide dans le même temps, l'ACOA couvre les inconvénients de l'AFSA. Comme l'ACOA possède une forte capacité de rétroaction positive pour les fourmis qui recherchent les phéromones laissées par les fourmis précédentes, chaque prochain état de l'ACOA sera meilleur que son état actuel. Une telle supériorité peut couvrir efficacement les inconvénients de l'AFSA. Avec la calibration de l'ACOA, l'AFSA peut modifier son chemin de routage plus légèrement et avec plus de précision mise en œuvre de l'algorithme de fusion [69]. L'AFSA peut obtenir rapidement le domaine de solution optimale avec une précision moindre. En même temps, une caractéristique importante de l'ACOA est que l'algorithme utilise le retour positif des phéromones pour choisir la solution optimale.

Ainsi, en se basant sur l'idée de compenser les faiblesses de l'autre, l'algorithme de fusion ACOA-AFSA est proposé, qui peut converger vers la solution optimale de manière rapide. Pour résumer la réalisation de l'algorithme de routage par fusion proposé l'essaim de poissons essaie de trouver un chemin de routage en délivrant des données du nœud source au nœud de destination. Et chaque nœud du chemin de routage compare ensuite son énergie et la longueur du chemin avec les nœuds voisins à l'aide de l'algorithme ACOA [67].

V.4 Un algorithme de colonies d'abeilles artificielles pour le problème du regroupement du chemin d'acheminement moyen minimum dans les réseaux de capteurs sous-marins multi-sauts :

Compte tenu d'un ensemble de nœuds de capteurs et d'un ensemble de station de base placés de manière aléatoire dans un plan euclidien, le problème de regroupement du chemin de routage moyen minimum (MARPCP) cherche un sous-ensemble de capteurs qui fonctionneront comme des cluster Head (CH) de sorte que chaque nœud de capteur soit adjacent à au moins une tête de groupe et que la distance de saut attendue entre un nœud et son station de base le plus proche dans le schéma de routage basé sur le regroupement soit minimisée. Ce problème est particulièrement préoccupant dans les réseaux de capteurs sous-marins. Dans [70] a proposé une nouvelle approche de ce problème basée sur l'algorithme ABC (Artificial Bee Colony). L'algorithme ABC est un algorithme itératif. L'algorithme commence par associer chaque abeille employée à une source de nourriture générée aléatoirement. Ensuite, au cours de chaque itération, chaque abeille employée détermine une nouvelle source de nourriture dans le voisinage de sa source de nourriture actuellement associée et calcule la quantité de nectar de cette nouvelle source de nourriture. Si la quantité de nectar de cette nouvelle source de nourriture est supérieure à celle de sa source de nourriture actuellement associée, alors cette abeille employée se déplace vers la nouvelle source de nourriture en laissant l'ancienne, sinon elle continue avec l'ancienne. La procédure pour déterminer une source de nourriture dans le voisinage d'une source de nourriture particulière est spécifique au problème et, par conséquent, varie d'un problème à l'autre. Une fois que toutes les abeilles employées ont terminé ce processus, elles transmettent les informations sur leurs sources de nourriture aux spectateurs qui les observent. Les spectateurs sélectionnent les sources de nourriture de manière probabiliste en fonction de la quantité de nectar (fitness) de cette source de nourriture.

VI. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des protocoles de routage classés en trois catégories principales basés sur l'énergie, basés sur les données et basés sur les informations géographiques. Après avoir décrit les principaux protocoles de routage et leurs fonctionnements on conclut que les protocoles jouent un rôle important dans le transfert au maximum des données, comme nous avons mentionné dans certains d'entre eux leurs avantages et leurs inconvénients. Puis nous avons décrits les défis qui ciblent les réseaux de capteurs sous-marins.

A la fin du chapitre, nous avons présenté quelques exemples de Routage basés sur le méta heuristique pour les réseaux des capteurs sans fil sous-marins la solution de routage pour optimiser la durée de vie du réseau et c'est l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre III. Simulation et résultats de l'algorithme hybride proposé.

I. Introduction :

Le déploiement raisonnable des nœuds RCSF sous-marins permet d'économiser les ressources des capteurs, d'améliorer l'efficacité du réseau, d'équilibrer la consommation d'énergie du réseau et de prolonger sa durée de vie. La consommation d'énergie est un problème important lors de la conception et de l'évaluation globale des performances d'un système RCSF_SM.

Dans ce chapitre nous proposons un routage hybride qui fait la combinaison entre deux algorithmes C-Means flous (FCM) et l'algorithme génétique.

Le FCM essaie de partitionner l'ensemble des nœuds en multiple de clusters, et l'algorithme génétique pour former les chaînes et de l'élection de nœuds leaders.

II. Présentation du logiciel Matlab :

MATLAB (matrix laboratory) est un langage de haute performance pour le calcul technique. Il intègre le calcul, la visualisation et la programmation dans un environnement facile à utiliser où les problèmes et les solutions sont exprimés dans une notation mathématique familière [71]. Les utilisations typiques incluent :

- Les mathématiques et le calcul
- Développement d'algorithmes, ce dont nous avons besoin dans nos recherches
- Modélisation, simulation
- Analyse, exploration et visualisation de données
- Graphiques scientifiques et techniques
- Développement d'applications, y compris la création d'interfaces utilisateur graphiques

MATLAB comporte une famille de solutions spécifiques aux applications, appelées boîtes à outils. Très importantes pour la plupart des utilisateurs de MATLAB, les boîtes à outils vous permettent d'apprendre et d'appliquer une technologie spécialisée. Les boîtes à outils sont des collections complètes de fonctions MATLAB (M-files) qui étendent l'environnement MATLAB pour résoudre des catégories particulières de problèmes. Les domaines dans lesquels des boîtes à outils sont disponibles comprennent le traitement du signal, les systèmes de contrôle, les réseaux neuronaux, la logique floue, les ondelettes, la simulation et bien d'autres encore [71].

III. Fuzzy C-Means (FCM):

Le Fuzzy C-Means (FCM) est l'un des algorithmes de regroupement pour donner de bons résultats de modélisation dans de nombreux cas, bien qu'il ne soit pas capable de spécifier le nombre de clusters par lui-même, étant sensible aux conditions initiales, l'algorithme conduit généralement à des minimums résultats. [72].

FCM introduit le concept de sous-ensembles flous dans la définition des clusters : chaque nœud de la zone de déploiement appartient à chaque groupe dans une certaine mesure, et tous les clusters sont caractérisés par leur centre de gravité [73]. Comme d'autres algorithmes de classification non supervisés, FCM utilise les critères de minimisation de la distance intra-cluster et de maximisation de la distance inter-cluster, mais fournit un certain degré d'appartenance à chaque cluster à chaque nœud. L'algorithme nécessite une connaissance préalable du nombre de clusters et génère des clusters selon un processus itératif en minimisant la fonction objectif. Par conséquent, il fournit une partition floue de l'environnement en donnant à chaque nœud une appartenance entre 0 et 1 dans un cluster donné associé au nœud qui est le nœud avec le degré d'appartenance la plus élevée [74,75].

Le cycle de vie du réseau, la consommation d'énergie et la distance de communication sont les trois principales considérations pour la conception des RCSF sous-marins. Le contrôle de la topologie à l'aide de la méthode de clustering FCM est l'une des principales solutions aux problèmes de RCSF sous-marin. En fournissant un meilleur contrôle de la topologie qui pourrait réduire la consommation d'énergie des réseaux. Dans la méthode FCM, les échantillons sont classés en fonction de leurs appartenances, et cette méthode est plus susceptible de refléter le monde réel. Le processus de regroupement des nœuds du réseau RCSF sous-marin est similaire au processus de regroupement des données de la méthode FCM. RCSF sous-marin peut être mis en correspondance avec la partition floue de l'espace des échantillons. Dans le FCM, chaque nœud peut être considéré comme un échantillon du réseau. Du réseau, simultanément, les nœuds proches du centre du cluster sont les têtes de cluster, et les sous-ensembles obtenus par le clustering sont des clusters dans RCSF sous-marin [76].

Un programme complet utilisant le langage de programmation MATLAB a été développé pour trouver la valeur optimale d'exposant de pondération. Il commence par effectuer un regroupement soustractif pour les données d'entrée-sortie, construire le modèle flou à l'aide du clustering soustractif et optimise les paramètres en optimisant l'erreur quadratique la plus faible entre la sortie du modèle flou et la sortie de la fonction originale en entrant une entrant des données testées. L'optimisation s'effectue par itération. [76].

IV.L'algorithme génétique :

Un algorithme génétique est une méthode de résolution de problèmes d'optimisation, avec ou sans contraintes, basée sur un processus de sélection naturelle (processus analogue à celui de l'évolution biologique). Dans un tel algorithme, une population de solutions est modifiée à plusieurs reprises. À chaque fois, l'algorithme sélectionne au hasard des individus dans la population et les utilise comme parents pour produire les enfants de la génération suivante. Au fil des générations successives, la population « évolue » vers une solution optimale [77].

L'algorithme génétique est utilisé afin de résoudre des problèmes pour lesquels les algorithmes d'optimisation standard ne sont pas vraiment adaptés [76]. Il peut s'agir par exemple de problèmes avec une fonction-objectif discontinue, non dérivable, stochastique ou particulièrement non linéaire [77].

IV.1 Modèle de l'algorithme génétique :

1. L'algorithme génétique commence avec un ensemble initial de solutions aléatoires appelé population.
2. Chaque individu de la population est appelé un chromosome représentant une solution au problème posé.
3. Les chromosomes évoluent par itérations successives, appelées générations.
4. Au cours de chaque génération, les chromosomes sont évalués à l'aide de certaines mesures de fitness.
 1. Pour créer la génération suivante de nouveaux chromosomes appelés progénitures sont formés soit (a) en fusionnant deux chromosomes de la génération actuelle à l'aide d'un opérateur de croisement, soit (b) en modifiant un chromosome à l'aide d'un opérateur de mutation.
 2. Une nouvelle génération est formée (a) en sélectionnant en fonction des valeurs d'aptitude certains des parents et de la progéniture et (b) en rejetant les autres de manière à maintenir constante la taille de la population.
 3. Les chromosomes les plus aptes ont de plus grandes probabilités d'être sélectionnés.
 4. Après plusieurs générations, les algorithmes convergent vers le meilleur chromosome qui, espérons-le, représente la solution optimale ou sous-optimale au problème.

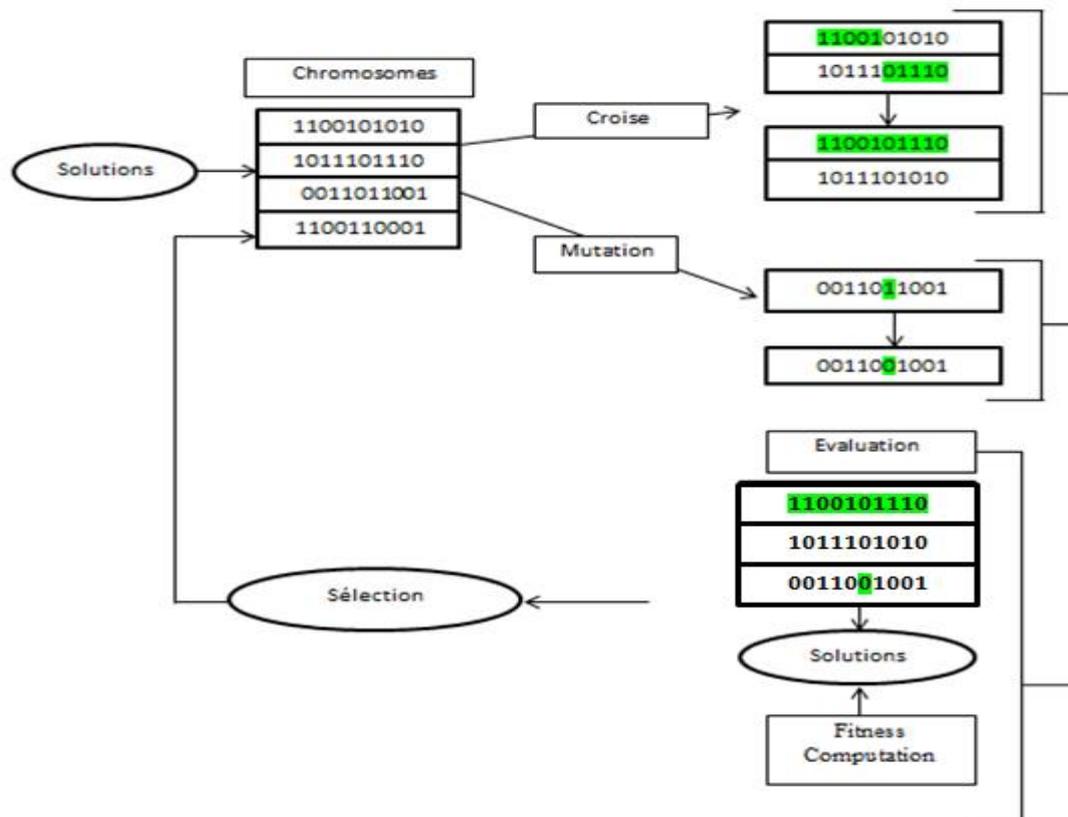


Figure III.1 Les étapes d'une model d'algorithme génétique.

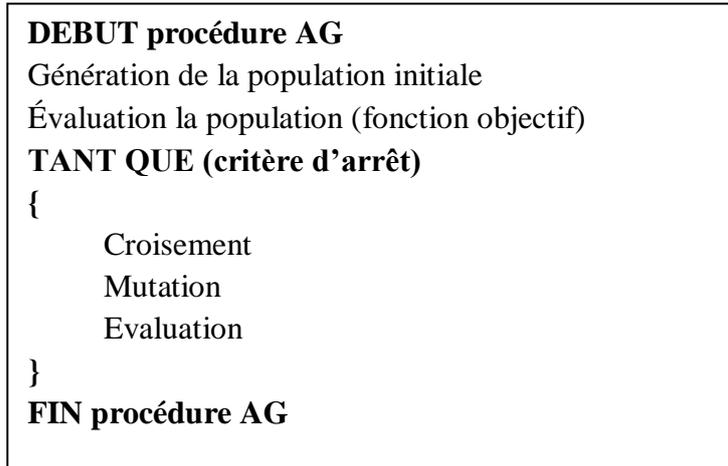


Figure III.2 Structure générale d'un AG [78].

IV.2 Description de l'algorithme proposé FAG :

L'algorithme FAG (une combinaison entre FCM et AG) est décomposé en trois phases :

Etape 01 : Construction du réseau et formation des chaînes :

Nous considérons le scénario d'application consistant à déployer N nœuds de capteurs Aléatoirement dans un domaine 3D de surface $(M * M * M) m^3$. Après avoir possédé nœuds distribués, en échangeant des informations entre station de base et nœuds capteurs, La station de base acquière une connaissance globale de toutes les énergies des Nœuds du réseau. La station de base divise alors la zone de détection en un nombre clusters prédéfinis de différentes tailles. Le nombre de clusters sélectionnés est égal à la racine carré du nombre total de nœuds utilisés. Ensuite, la station de base calcule le cluster et assigne tous les nœuds de capteurs à leur cluster en appliquant l'algorithme FCM. Une fois le cluster formé, les nœuds de chaque cluster seront regroupés en une forme de chaîne unique par l'utilisation de l'algorithme génétique. L'idée est d'empruntée au problème du voyageur de commerce (transport Salesman problème TSP) où une chaîne fermée la plus courte est construite puis la plus grande distance entre deux nœuds successifs est supprimée afin d'obtenir une chaîne ouverte la plus courte. Un supérieur hiérarchique appelé un « leader » sera élu pour chaque chaîne pour concurrencer un autre leader ou avec Station de base [78,79].

Etape 02: l'élection du nœud Leader :

Après avoir formé les clusters grâce à la technologie FCM, plusieurs clusters et la chaîne globale sont formées par les capteurs déployés, le processus d'élection du leader se fait localement dans chaque cluster. Initialement, le leader sera choisi aléatoirement au niveau de la chaîne car au début tous les nœuds ont la même quantité d'énergie, mais pour les itérations suivantes, La rotation des nœuds leaders est effectuée en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds. L'énergie restante de chaque nœud sera calculée et le nœud qui a le plus d'énergie sera choisi comme leader. Ainsi, la connexion des nœuds leaders avec la station de base forme une chaîne globale. Par conséquent, de cette manière, la consommation d'énergie est répartie équitablement [78].

Étape 03 : transmission des données :

Après la formation des chaînes et l'élection des leaders, les capteurs commencent à collecter et à transmettre des données. Cette dernière est réalisée en deux étapes : la transmission intra-cluster et la transmission inter-cluster [79].

Transmission intra-cluster : Dans cette étape, il y a trois cas : Le nœud leader peut être le premier nœud de la chaîne, le dernier ou situé entre les deux. Dans le premier cas, le nœud leader est le premier nœud de la chaîne. Comme le montre la figure III.3, les nœuds allant du nœud n-1 au nœud 2 effectuent à la fois la transmission et la réception, tandis que le premier nœud, qui est le nœud leader, reçoit des données et que le dernier nœud ne fait qu'une transmission [79].

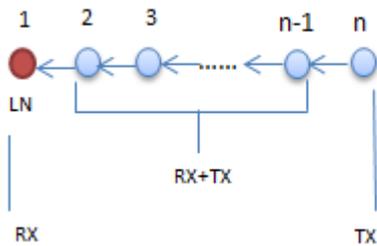


Figure III.3 Le nœud leader est le premier nœud de la chaîne [79].

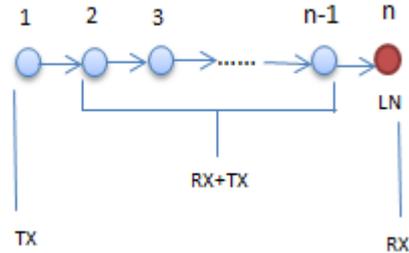


Figure III.4 Le nœud de tête est le dernier nœud de la chaîne [79].

Le deuxième cas est similaire au précédent, mais le nœud leader est situé à l'extrémité de la chaîne. Par conséquent, les nœuds allant du nœud 2 au nœud n-1 effectueront à la fois des transmissions et des réceptions. Le premier nœud effectuera une transmission tandis que le second effectuera une réception. La figure III.4 illustre cette situation [79].

Le troisième cas est illustré à la figure III.5 où le nœud leader est le nœud k situé entre le premier et le dernier nœud de la chaîne. Les nœuds allant du nœud 2 au nœud k-1 et les nœuds allant du nœud n-1 au nœud k+1 effectuent à la fois une transmission et une réception, tandis que le premier et le dernier nœud effectuent des transmissions et le nœud leader effectue deux réceptions [79].

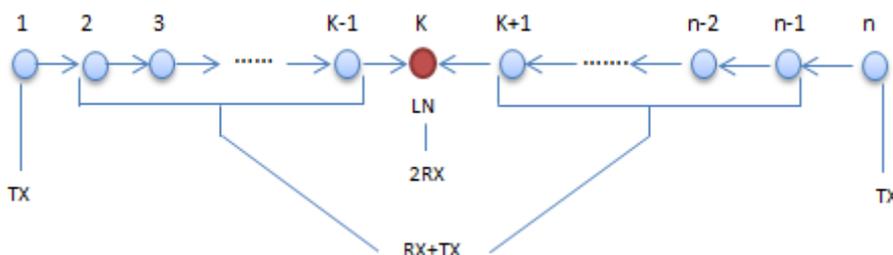


Figure III.5 Le nœud leader est à l'intérieur de la chaîne [79].

Transmission inter-cluster : Pour rassembler les données à chaque tour, le nœud leader de chaque cluster transmette les données entre eux. Ce processus sera répété jusqu'à atteindre la station de base [79]. Comme le présente la figure III.6.

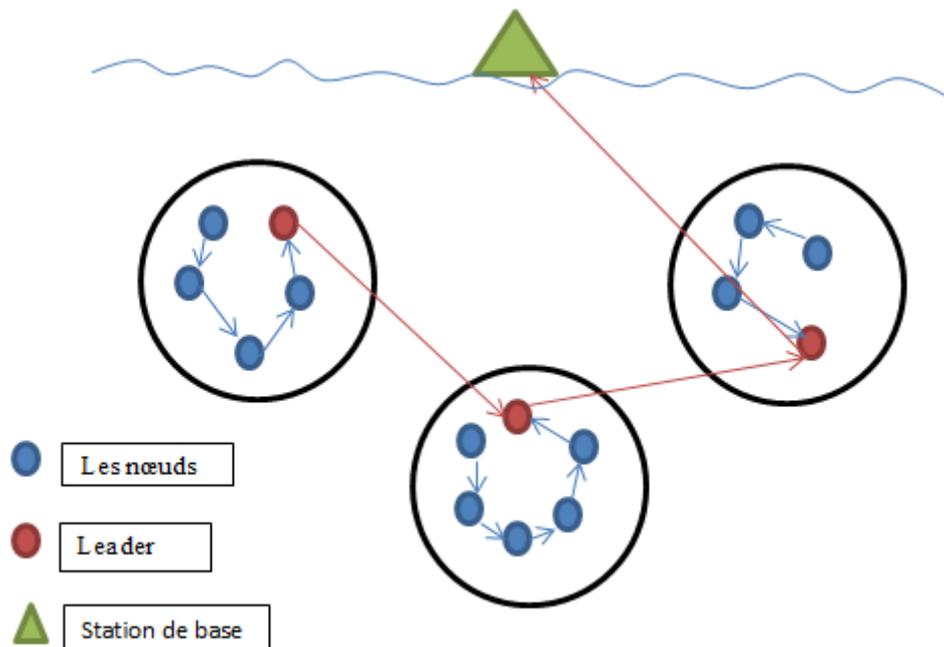


Figure III.6 Transmission inter-cluster.

Mise à jour de la chaîne :

La figure III.7 (a) ci-dessous représente une chaîne formée de six nœuds avant mise à jour, c'est-à-dire lorsque tous les nœuds ont un niveau d'énergie supérieur à 0. Si par exemple le nœud 5 épuise son énergie, le nœud 4 contourne le nœud 5 et envoie les données directement au nœud 6 lors de la transmission suivante [79].

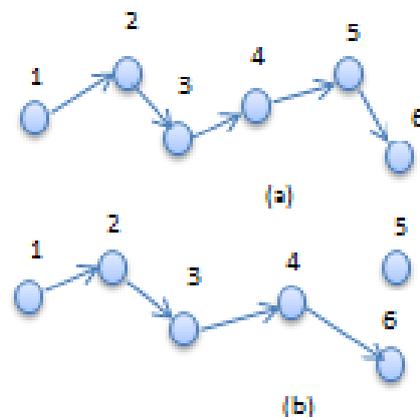


Figure III.7 Mise à jour de la chaîne [79].

V. Evaluation :

Dans notre travail, Nous avons étudié les principaux paramètres tels que l'énergie consommée par les nœuds et leur impact sur les compétences de notre algorithme à partir de plusieurs simulations numériques sous Matlab. Ensuite, le modèle énergétique et les résultats de la simulation sont présentés et analysés.

V.1 Hypothèses :

- Les nœuds capteurs et la station de base sont fixés une fois qu'ils sont déployés dans l'environnement.
- La station de base est localisée en dehors de la zone des nœuds de capteurs.
- Tous les nœuds capteurs ont la même quantité d'énergie au début.
- La station de base n'est pas restreinte en termes d'énergie, de mémoire et de puissance de calcul.
- Chaque nœud de capteur fonctionne selon deux modes :

Mode de détection pour contrôler les paramètres d'environnement et les transmettre à la station de base.

Le principal mode de collecte, de compression et de transmission des données vers la station de base.

V.2 Modèle d'énergie et leur consommation :

L'objectif de la conception du réseau est d'obtenir un bon compromis entre la qualité de service et l'utilisation d'énergie en particulier .une bonne qualité de service comprend un débit maximal d'informations avec un délai minimal [80], comme suivant :

$$E_{tx}(d) = P_0 * d^2 * 10^{\alpha(f)/10} \quad (III .1)$$

$$E_{RX} = (1/3) * E_{tx} \quad (III.2)$$

$$\text{Car: } \alpha(f) = 0,11(10^{-3}f^2/1+f) + 44(10^{-3}f^2/4100+f^2) + 2.75 * 10^{-7}f^2 + 3 * 10^{-6} \quad (III .3)$$

$E_{tx}(d)$: l'énergie de transmission.

d : distance d'un émetteur.

P_0 : puissance au niveau d'un récepteur.

$\alpha(f)$: le coefficient d'absorption en dB/m.

f : la fréquence porteuse pour la transmission en kHz.

Plus objectifs de minimiser la consommation d'énergie tout en assurant une connectivité fiable entre les nœuds du réseau et le cluster head [9] par son équation :

$$E(i)_{consumed} = E(i)_{initial} - E(i)_{residual} \quad (III .4)$$

$$ET_{\text{consume}} = \sum_{i=1}^N E(i)_{\text{consumed}} \quad (\text{III .5})$$

VI. Résultats de simulation:

VI.1 Les paramètres de simulation :

Dans Notre algorithme proposé est étudié sur un réseau de 100 nœuds. La station de base est positionnée sur les coordonnées (50, 50, 100) m, les nœuds de capteurs sont placés du manière aléatoire dans une zone de (100 x 100 x 100) m³. L'énergie initiale de chaque nœud capteur est égale à 10 Joules.

Notre modèle de simulation utilise les paramètres résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeurs
Taille du réseau	(100*100*100) m ³
Nombre des nœuds	100
L'énergie initiale des nœuds	10 joules
Position de station de base	(50, 50, 100) m
La taille de paquet	10 kbits
Nombre de cluster	10

Tableau III-1 Les paramètres de simulation.

VI.2 les résultats de l'énergie résiduelle de réseau :

Figure III.8 présente le reste d'énergie dans le réseaux et le nombre d'itération dans le système. On constate tout d'abord à l'itération 0 l'énergie du réseaux est maximal 1000 joule juste après la première itération la quantité d'énergie a reculé de manière importante jusqu'à la valeur 0 à l'itération 280 .

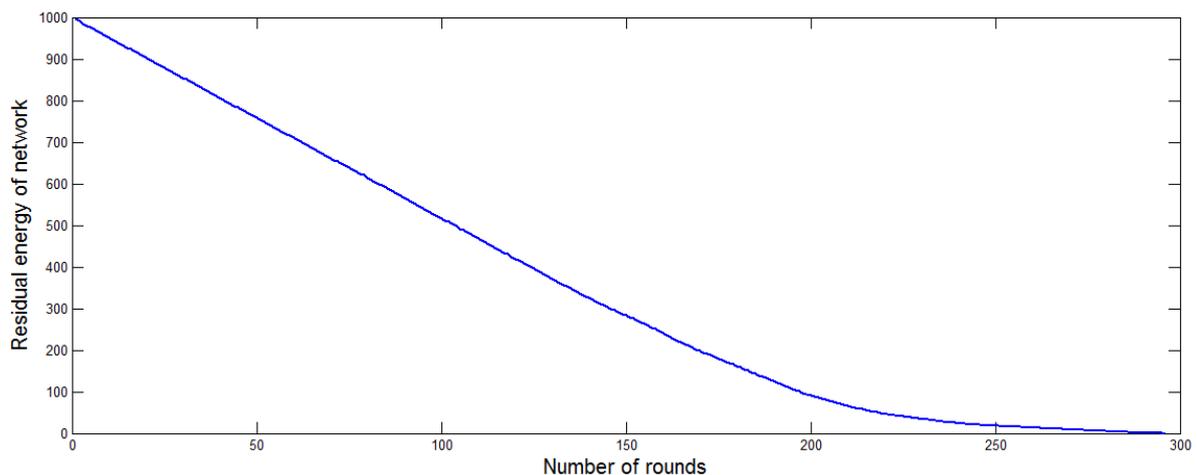


Figure III.8 L'énergie résiduelle des réseaux en fonction de nombre d'itérations.

VI.3 les résultats des nombres des nœuds :

La Figure III.9 montre le nombre des nœuds actifs dans le réseau qui indique la durée de vie en fonction du nombre d'itération. On voit que le nombre des nœuds vivant a diminué avec

l'évolution des itérations. On peut voir clairement que le nombre des nœuds est resté stable et maximal jusqu'à le nombre d'itération 120 juste après il est dégradé à 0 à l'itération 296 lorsque son consommation d'énergie fini.

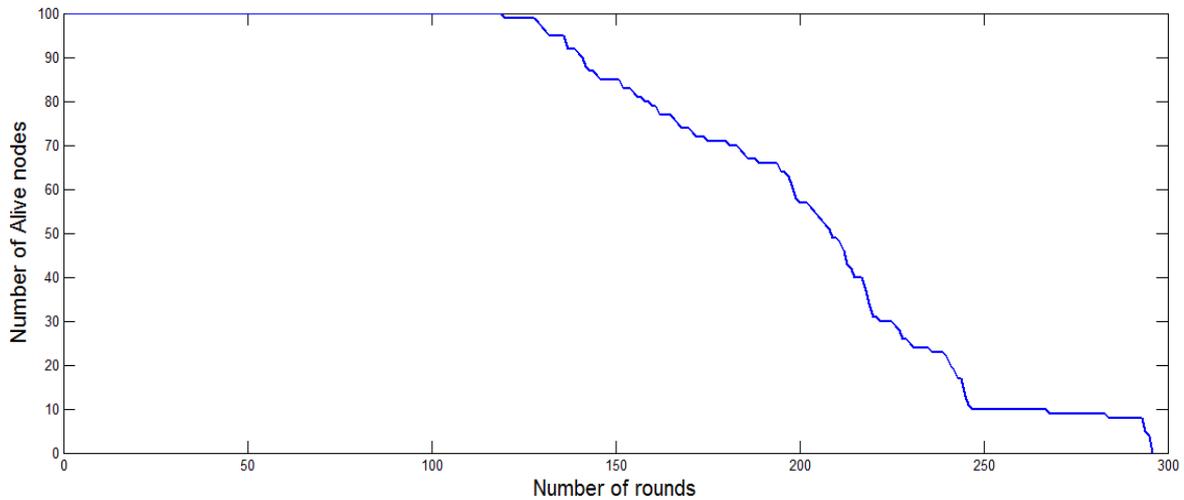


Figure III.9 Le nombre des nœuds vivant en fonction de nombre d'itération.

VI.4 Comparaison entre FAG et un autre algorithme basé sur l'ACO :

VI.1.1 Description de l'algorithme basé sur l'ACO :

Cet algorithme est basé sur le principe des chaînes utilisant une zone de déploiement divisée en un nombre de niveaux prédéfinis qui sont supposés être égaux à 5% du nombre total de nœuds. Dans chaque niveau, une chaîne ouverte la plus courte qui relie tous les nœuds du niveau est formée à l'aide d'un algorithme ACO. Dans la première itération, sur la chaîne la plus proche de la station de base où le nœud le plus proche est élu comme nœud leader. Le nœud leader dans la chaîne immédiatement suivante est choisi en fonction de la proximité du nœud leader précédent et ce processus sera répété pour tous les niveaux restants. À partir de la deuxième itération la rotation des nœuds leader est réalisée en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds. Chaque nœud situé à l'extrémité de la chaîne commence la transmission vers le nœud suivant de la chaîne en dessous. Le nœud de la position suivante reçoit les données et les fusionne avec les siennes, puis les envoie à un autre voisin dans la chaîne. De cette façon, les données se propagent du nœud le plus éloigné de la chaîne au leader. Ensuite, la même approche de la transmission des données est utilisée dans la chaîne globale [81].

VI.1.2 l'énergie résiduelle :

La Figure III.10 montre l'énergie résiduelle du réseau de l'algorithme proposé basé sur l'ACO et l'algorithme FAG en fonction de nombres d'itération. L'énergie résiduelle est diminuée dans les deux algorithmes mais l'énergie résiduelle dans l'algorithme basé sur ACO est diminuée un peu plus rapidement par rapport à l'algorithme FAG. On voit que l'énergie du réseau dans l'algorithme FAG est épuisée à l'itération 296 par contre l'énergie dans l'algorithme basé sur l'ACO est épuisée à l'itération 386.

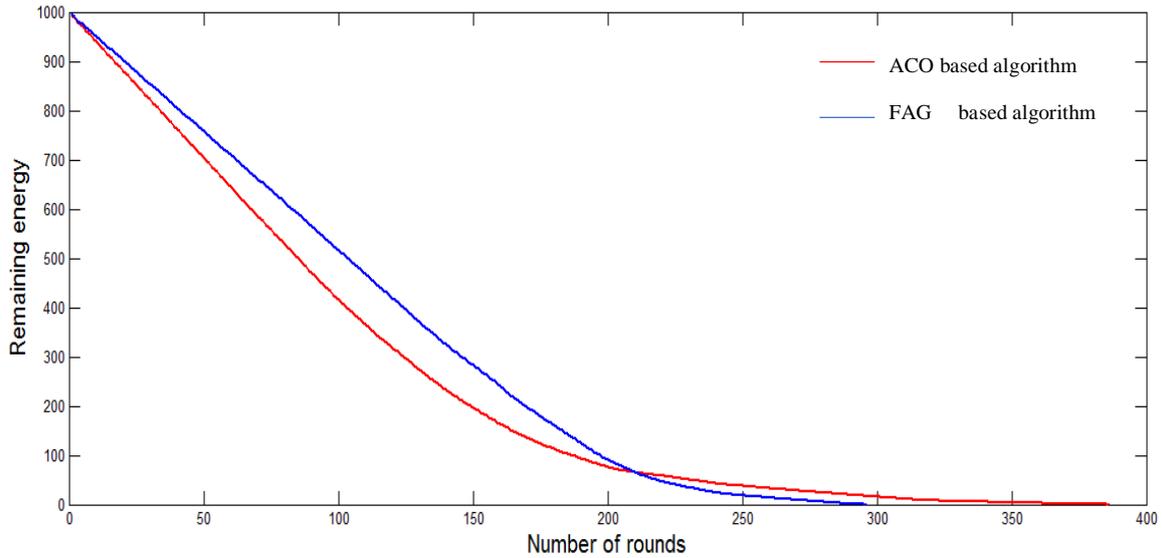


Figure III.10 L'énergie résiduelle en fonction le nombre d'itération.

VI.1.3 La durée de vie :

La Figure III.11 montre la comparaison entre la durée de vie des nœuds sur l'algorithme basé sur ACO et FAG. Tout d'abord, on remarque que FAG dans les premières itérations conserve l'énergie d'une manière plus importante par rapport l'algorithme basé sur ACO. Dans l'algorithme FAG, le nombre des nœuds reste maximale 100 jusqu'à l'itération 120 par contre l'algorithme basé sur l'ACO son premier nœud mort à l'itération 69. À la fin de simulation, l'algorithme basé sur l'ACO donne de bonne résultats par rapport à FAG où les nœuds de FAG sont épuisés à l'itération 296 par contre l'algorithme basé sur l'ACO sont épuisés à l'itération 386 car le FCM lorsqu'il calcule la distance entre les nœuds il consomme beaucoup l'énergie.

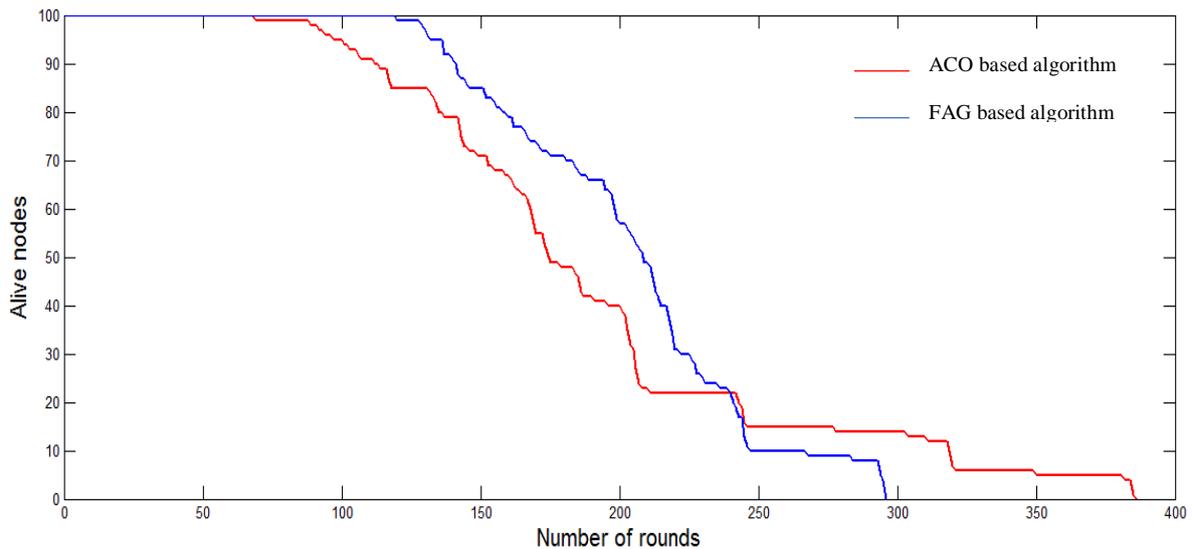


Figure III.11 Le nombre des nœuds vivant en fonction nombre d'itérations.

VII. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons définis les algorithmes du clustering Fuzzy C-means. Nous avons aussi décrit l'algorithme de routage basé sur des chaînes en exploitant l'algorithme génétique dédiés aux réseaux de capteurs sans fil sous-marins.

Les simulations ont montré que l'algorithme proposé FAG fonctionne d'une manière efficace dans les premières itérations par rapport à l'algorithme basé sur ACO vue qu'il a conservé l'énergie pendant un nombre important d'itérations. Cependant l'algorithme basé sur ACO a pu prolonger la durée de vie du réseau plus longtemps que l'algorithme FAG dans les dernières itérations.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins sont des thèmes de recherche d'actualité depuis ces dernières années en raison de leur large éventail d'applications dans les milieux aquatiques. Dans cette catégorie de réseau on peut rencontrer des nombreux problèmes l'un de ces problèmes c'est la Conservation de l'énergie.

Dans ce mémoire nous avons présenté un aperçu sur les définitions et applications des réseaux de capteurs sans fil sous-marins et de l'état de l'art des protocoles de routage pour résoudre ces problèmes où la conception de tout protocole de routage dépend des objectifs et des exigences de l'application, ainsi que de son adéquation, qui dépend de la disponibilité des ressources du réseau. Le développement de techniques de routage adaptées à ces environnements est donc considéré comme un domaine de recherche essentiel, qui rendra ces réseaux beaucoup plus fiables et efficaces.

Dans notre simulation, nous avons adopté une combinaison entre deux algorithmes, le FCM pour former les clusters et AG pour la formation des chaînes. Les simulations ont montré de bons résultats, une très faible consommation d'énergie et par conséquent une extension remarquable de la durée de vie des réseaux. On finit cette étude par une comparaison entre l'algorithme proposé FAG et l'algorithme basé sur ACO.

L'algorithme basé sur ACO a de bons résultats par rapport à le FAG de notre comparaison sur l'énergie résiduelle et la dure de vie de nœud, ce qui est dû à la technique utilisée le FCM (les clusters) dans AG et multi couche dans l'algorithme basé sur ACO.

Perspectives :

Les réseaux de capteurs sans fil sous-marins constituent un domaine de recherche très vaste. Ils ont de riches perspectives d'application dans différents domaines. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine pour les utiliser en conditions réelles. Nous pouvons proposer comme perspectives de continuité à ce travail les points suivants :

- Utiliser d'autres algorithmes Meta heuristiques.
- Utiliser d'autres techniques de clustering.
- testé cet algorithme avec des nœuds mobiles.

References

References:

- [1] A. Bojovschi, “from sensors to sensor networks: A journey of innovation,” in Proc. 2nd Int. Conf. Telecommun. Netw. (TEL-NET), Aug. 2017, pp. 1–11, doi: 10.1109/TEL-NET.2017.8343493.
- [2] C. Perra, A. Kumar, M. Losito, P. Pirino, M. Moradpour, and G. Gatto, “Monitoring indoor people presence in buildings using low-cost infrared sensor array in doorways,” *Sensors*, vol. 21, p. 4062, Dec. 2021, doi: 10.3390/s21124062.
- [3] C. Li, J. Li, M. Jafarizadeh, G. Badawy, and R. Zheng, “LEMoNet: Low energy wireless sensor network design for data center monitoring,” in Proc. IFIP Netw. Conf., 2019, pp. 1–9, doi: 10.23919/IFIPNetworking46909.2019.8999456.
- [4] Y. Spyridis, T. Lagkas, P. Sarigiannidis, V. Argyriou, A. Sarigiannidis, G. Eleftherakis, and J. Zhang, “Towards 6G IoT: Tracing mobile sensor nodes with deep learning clustering in UAV networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3936, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21113936.
- [5] C.-M. Yu, M.-L. Ku and C.-W. Chang, “Hybrid multi-hop/singlehop opportunistic transmission of WSNs,” in Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. - Taiwan (ICCE-TW), Jun. 2017, pp. 111–112, doi: 10.1109/ICCE-China.2017.7991020
- [6] S. Z. Zakaria, A. A. Aziz, and M. Drieberg, “Multi-hop wireless sensor network for remote monitoring of soil moisture,” in Proc. IEEE 3rd Int. Symp. Robot. Manuf. Autom. (ROMA), Sep. 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ROMA.2017.8231829.
- [7] Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges by ZHANSEK NURLAN 1, 2, (Member, IEEE), TAMARA ZHUKABAYEVA 2, MOHAMED OTHMAN 3,4, (Senior Member, IEEE), AIGUL ADAMOVA5, AND NURKHAT ZHAKIYEV6, (Member, IEEE) in 2022
- [8] L. Q. Zhuang, K. M. Goh, and J. B. Zhang, “the wireless sensor networks for factory automation: Issues and challenges,” in Proc. IEEE Conf. Emerg. Technol. Factory Autom., Oct. 2007, pp. 141–148, doi: 10.1109/EFTA.2007.4416764.
- [9] A. Porras-Hermoso, D. Alfonso-Corcuera, J. Piqueras, E. Roibás-Millán, J. Cubas, J. Pérez-Álvarez, and S. Pindado, “Design, ground testing and on-orbit performance of a sun sensor based on COTS photodiodes for the UPMSat-2 satellite,” *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4905, Jul. 2021, doi: 10.3390/s21144905.
- [10] A. Riaz, M. R. Sarker, M. H. M. Saad, and R. Mohamed, “Review on comparison of different energy storage technologies used in microenergy harvesting, WSNs, low-cost microelectronic devices: Challenges and recommendations,” *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5041, Jul. 2021, doi: 10.3390/s21155041.

- [11] Y. Han, Y. Feng, Z. Yu, W. Lou, and H. Liu, "A study on piezoelectric energy-harvesting wireless sensor networks deployed in a weak vibration environment," *IEEE Sensors J.*, vol. 17, no. 20, pp. 6770–6777, Oct. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2747122.
- [12] Ari, A.A.A.; Gueroui, A.; Labraoui, N.; Yenke, B.O. Concepts and evolution of research in the field of wireless sensor networks. *Int. J. Comput. Netw. Commun.* 2015, 7, 81–98.
- [13] Rawat, P.; Singh, K.D.; Chaouchi, H.; Bonnin, J.M. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *J. Supercomput.* 2014, 68, 1–48.
- [14] Akyildiz, I.F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. Wireless sensor networks: A survey. *Comput. Netw.* 2002, 38, 393–422.
- [15] Innovative services and applications of wireless sensor networks: Research challenges and opportunities in 2018.
- [16] A Survey on Software-Defined Wireless Sensor Networks: Challenges and Design Requirements by Hlabishi I. Kobo, Adnan M. Abu-Mahfouz and Gerhard P. Hancke in 2017.
- [17] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Comput. Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [18] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [19] IEEE Standard, "IEEE Standard for Part 15. 4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," *IEEE Stand.*, pp. 1–26, 2006.
- [20] D. Christin, A. Reinhardt, P. S. Mogre, and R. Steinmetz, "Wireless Sensor Networks and the Internet of Things : Selected Challenges," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 5970, pp. 31–33, 2009.
- [21] H. Modares, R. Salleh, and A. Moravejosharieh, "Overview of Security Issues in Wireless Sensor Networks," 2011 Third Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul., pp. 308–311, 2011.
- [22] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2005.
- [23] S. Iyer and D. V. Rao, "Genetic algorithm based optimization technique for underwater sensor network positioning and deployment," in *Proceedings of the IEEE Underwater Technology (UT '15)*, pp. 1–6, IEEE, Chennai, India, February 2015.
- [24] E. Felemban, "Advanced border intrusion detection and surveillance using wireless sensor network technology," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 06, no. 05, pp. 251–259, 2013.

- [25] Underwater Sensor Network Applications: A Comprehensive Survey by EmadFelemban, Faisal KarimShaikh,, UmairMujtabaQureshi, Adil A. Sheikh, and Saad Bin Qaisar in 2015.
- [26] J. Partan, J. Kurose, and B.N. Levine, "A survey of practical issues in underwater networks," in 1st ACM international workshop on Underwater networks, New York, 2006, pp. 17-24.
- [27] Underwater Wireless Sensor Networks by Almir Davis and Hwa Chang in 2012.
- [28] I.F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," Elsevier, vol. Ad Hoc Networks, no. 3, pp. 257-279, February 2005.
- [29] G. Tuna, O. Arkoc, and K. Gulez, "Continuous monitoring of water quality using portable and low-cost approaches," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2013, Article ID 249598, 11 pages, 2013.
- [30] P. Kumar, P. Kumar, P. Priyadarshini, and Srija, "Underwater acoustic sensor network for early warning generation," in Proceedings of the Oceans, pp. 1–6, IEEE, Hampton Roads, Va, USA, October 2012.
- [31] T. Le Sage, A. Bindel, P. Conway, S. Slawson, and A. West, "Development of a wireless sensor network for embedded monitoring of human motion in a harsh environment," in Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN '11), pp. 112–115, May 2011.
- [32] N. Chakravorti, T. Le Sage, S. E. Slawson, P. P. Conway, and A. A. West, "Design and implementation of an integrated performance monitoring tool for swimming to extract stroke information at real time," IEEE Transactions on HumanMachine Systems, vol. 43, no. 2, pp. 199–213, 2013.
- [33] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," Ad Hoc Networks, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2005.
- [34] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," in Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '06), pp. 228–235, April 2006.
- [35] J. Lloret, S. Sendra, M. Garcia, and G. Lloret, "Group-based underwater wireless sensor network for marine fish farms," in Proceedings of the IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps '11), pp. 115–119, IEEE, Houston, Tex, USA, December 2011.
- [36] M. Jaroensutasinee, K. Jaroensutasinee, T. F. S. Bainbridge et al., "Sensor networks applications for reefs at Racha Island, Thailand," in Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia, July 2012.
- [37] Modelling and Performance Enhancement of Underwater Wireless Sensor Networks by Petri Nets.

- [38] Routing security in multipath routing protocols in 2021 (TAMI Abdelaziz).
- [39] Clustered-Based Energy Efficient Routing Protocol for Underwater Wireless Sensor Network (Mukhtiar Ahmed, MazleenaSalleh, M.IbrahimChanna) in 2018.
- [40] Kamel Beydoun ; « Conception D'un Protocole De Routage Hiérarchique Pour Les Réseaux De Capteurs »; Thèse ; Présentée A L'u.F.R Des Sciences Et Techniques De L'université De Franche-Comté ; 2009.
- [41] SOUIKI Sihem ; «Protocoles De Routage Performants Dédies Aux Réseaux De Capteurs Sans Fil Sous L'eau» ; Thèse Doctorat ; Présentée A L'université De Tlemcen Faculté De Technologie Département De Télécommunications; 2015.
- [42] Benabdallah Souad, Hammadkelthoum, «Routage Dans Les Réseaux De Capteur Sous-marin», Projet de Fin d'Etudes, Master : Télécommunications, 2012-2013.
- [43] Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges (Khalid MahmoodAwan, Peer Azmat Shah, Khalid Iqbal, 2 SairaGillani, Waqas Ahmad, and Yunyoung Nam) in 2019.
- [44] of underwater wireless sensor networks: A study in 2021 (ChaoxingRen, Yun Li, Xuejun Wang, Ling Xia Liao, Roy Xiaorong Lai).
- [45] F.Tomsen, "Assessment of the environmental impact of underwater noise," OSPAR Commission. Biodiversity Series, 2009.
- [46] L. Liu, S. Zhou, and J. H. Cui, "Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, no. 8, pp. 977–994, 2008.
- [47] A. Rahman, V. Muthukkumarasamy, and E. Sithirasenan, "Te analysis of temperature, depth, salinity efect on acoustic speed for a vertical water column," in *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCoSS 2013*, pp. 310–312, USA, May 2013.
- [48] M. Ayaz and A. Abdullah, "Underwater wireless sensor networks: Routing issues and future challenges," in *Proceedings of 7th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia, MoMM2009*, pp. 370–375, Malaysia, December 2009.
- [49] M. Garcia-Pineda, S. Sendra, M. Atenas, and J. Lloret, "Underwater wireless ad-hoc networks: A survey," *Mobile ad hoc Networks: Current Status and Future Trends*, pp. 379–411, 2011.
- [50] J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, *Challenges: Building Scalable and Distributed Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) for Aquatic Applications*, 2005.
- [51] A Survey of Routing Protocols for UnderwaterWireless Sensor Networks by JunhaiLuo , Member, IEEE, Yanping Chen, Man Wu, and Yang Yang in 2021.

- [52] H. Wang, S. Wang, E. Zhang, and L. Lu, "An energy balanced and lifetime extended routing protocol for underwater sensor networks," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 5, pp. 1–26, 2018.
- [53] M. Faheem, G. Tuna, and V. C. Gungor, "QERP: Quality-of-service(QoS) aware evolutionary routing protocol for underwater wireless sensor networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 2066–2073, Sep. 2018.
- [54] On the routing of underwater wireless sensor networks routing protocols: (Hashim Khan, Student Member, IEEE, Syed Ali Hassan, Senior Member, IEEE, ETHaejoon Jung, Member, IEEE) A review in 2020 .
- [55] P. Xie, J.-H. Cui, and L. Lao, "VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks," in *Proc. International Conference on Research in Networking*, Springer, pp.1216–1221, 2006.
- [56] H. Yan, Z. J. Shi, and J.-H. Cui, "DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks," in *Proc. International Conference on Research in Networking*, Springer, pp. 72–86, 2008.
- [57] S. Jiang and S. Member, "On reliable data transfer in underwater acoustic networks: A survey from networking perspective," *IEEE Commun. Surveys Tuts.* vol. 20, no. 2, pp. 1036–1055, 2nd Quart. 2018.
- [58] M. Awais, N. Javaid, N. Naseer, and M. Imran, "Exploiting energy efficient routing protocols for void hole alleviation in IoT enabled underwater WSN," in *Proc. 15th Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf.*, Tangier, Morocco, 2019, pp. 1797–1802.
- [59] A survey of routing protocols for underwater wireless sensor networks (JunhaiLuo, Member, IEEE, Yanping Chen, Man Wu, and Yang Yang)in 2021
- [60] S. Lee and D. Kim, "Underwater hybrid routing protocol for UWSNs," in *Proc. 5th Int. Conf. Ubiquitous Future Netw. (ICUFN)*, Da Nang, Vietnam, 2013, pp. 472–475.
- [61] S. Pashko, A. Molyboha, M. Zabarankin, S. Gorovyy, "Optimal Sensor Placement for Underwater Threat Detection," *Naval Research Logistics* vol. 55, Issue 7, October 2008, pp. 684-699.
- [62] M. L. Incze, "Optimized deployment of autonomous underwater vehicles for characterization of coastal waters," *Journal of Marine Systems* 78, 2009, Elsevier B.V., pp. 415-424.
- [63] Genetic Algorithm based Optimization Technique for Underwater Sensor Network Positioning and Deployment by D. Vijay Rao, Senior Member, SidharthIyer.
- [64] A Clustering Routing Algorithm Based on Improved Ant Colony Optimization Algorithms for Underwater Wireless Sensor Networks by Xingxing Xiao and Haining Huang in 2020.

- [65] Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* 1996, 26, 29–41.
- [66] Dorigo, M.; Gambardella, L.M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. Evol. Comput.* 1997, 1, 53–66.
- [67] An ACOA-AFSA Fusion Routing Algorithm for Underwater Wireless Sensor Network by Huafeng Wu,¹ Xinqiang Chen,¹ Chaojian Shi,¹ Yingjie Xiao,¹ and Ming Xu² in 2012.
- [68] L. Xiaolei, A New Intelligent Optimization Method-Artificial Fish Swarm Algorithm, Zhe Jiang University, Hangzhou, China, 2003.
- [69] J. Chengzhi, Artificial Intelligent Technique, Tsinghua University Press, Beijing, China.
- [70] An Artificial Bee Colony Algorithm for the Minimum Average Routing Path Clustering Problem in Multi-hop Underwater Sensor Networks by VenkateswaraRaoDokku and Alok Singh.in 2012
- [71]<https://cimss.ssec.wisc.edu/wxwise/class/aos340/spr00/whatismatlab.htm#:~:text=What%20Is%20MATLAB%3F,expressed%20in%20familiar%20mathematical%20notation>.
- [72] Kernel-Based Fuzzy C-Means Clustering Algorithm Based on Genetic Algorithm by Yi Ding, Xian Fu in 2015.
- [73]: PROTOCOLES DE ROUTAGE PERFORMANTS DEDIES AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL SOUS L’EAU by souki sihem in 2015.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] Energy-Efficient Clustering Algorithm in Underwater Sensor Networks Based on Fuzzy C Means and Moth-Flame Optimization Method by WANG FEI 1 , BAI HEXIANG1 , LI DEYU 1 , AND WANG JIANJUN2 in 2020.
- [77] <https://fr.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>.
- [78] Comparaison de l’optimisation par colonies de fourmis et des Algorithmes Génétiques pour la résolution du TSP by EL HASSANI Hicham, SABRY Ahmed Haroun, BENKACHCHA Said, BENHRA Jamal Laboratoire LISER, ENSEM, UH2C KM7, BP 8118 Route El Jadida Casablanca, Morocco in 2015.
- [78] PROTOCOLES DE ROUTAGE PERFORMANTS DEDIES AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL SOUS L’EAU by souki sihem.in 28 Novembre 2015

[79] An Energy Aware Scheme for Layered Chain in Underwater Wireless Sensor Networks using Genetic Algorithm by Sihem Souiki, Sidi Mohammed Hadj Irid, and Mourad Hadjila in 2020.

[80] Underwater Acoustic Networks by Ethem M. Sozer, Milica Stojanovic, and John G. Proakis, Life Fellow, IEEE in 2000.

[81] Routage basé sur les chaînes pour les réseaux de capteurs sans fil sous-marins par Habibi Asma et Hallouz Sarra en 2020/2021.